

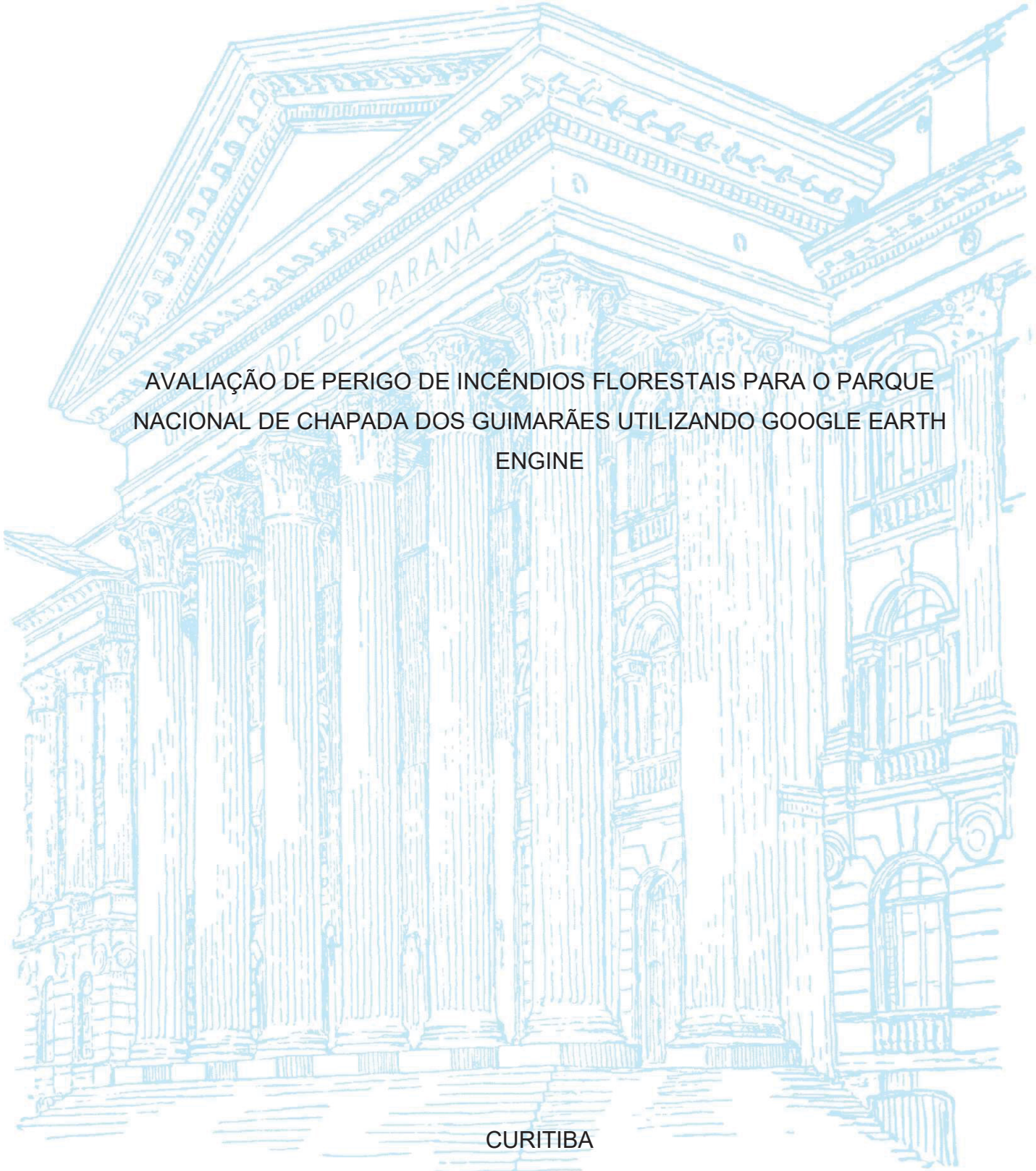
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSAMAR GOMES DA SILVA JUNIOR

AVALIAÇÃO DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS PARA O PARQUE
NACIONAL DE CHAPADA DOS GUIMARÃES UTILIZANDO GOOGLE EARTH
ENGINE

CURITIBA

2023



JOSAMAR GOMES DA SILVA JUNIOR

AVALIAÇÃO DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS PARA O PARQUE
NACIONAL DE CHAPADA DOS GUIMARÃES UTILIZANDO GOOGLE EARTH
ENGINE

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientadores: Prof. Dr. Marcos Vinicius Giongo Alves
Prof. Dr. Alexandre França Tetto

CURITIBA

2023

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Silva Junior, Josamar Gomes da

Avaliação de perigo de incêndios florestais para o Parque Nacional de Chapada dos Guimarães utilizando Google Earth Engine / Josamar Gomes da Silva Junior. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientadores: Prof. Dr. Marcos Vinicius Giongo Alves

Prof. Dr. Alexandre França Tetto

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 22/09/2023.

1. Incêndios florestais - Parque Nacional de Chapada dos Guimarães (MT). 2. Incêndios florestais - Previsão. 3. Incêndios florestais - Prevenção. 4. Evapotranspiração. 5. Radiação. I. Batista, Antonio Carlos. II. Alves, Marcos Vinicius Giongo. III. Tetto, Alexandre França. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.43(817.2)

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JOSAMAR GOMES DA SILVA JUNIOR** intitulada: **Avaliação de perigo de incêndios florestais para o Parque Nacional da Chapada dos Guimarães utilizando Google Earth Engine**, sob orientação do Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BATISTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica
25/09/2023 12:24:18.0

ANTONIO CARLOS BATISTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
26/09/2023 22:58:51.0

MARCOS PEDRO RAMOS RODRÍGUEZ
Avaliador Externo (UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABI)

Assinatura Eletrônica
26/09/2023 10:56:48.0

JADER NUNES CACHOEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS)

Assinatura Eletrônica
26/09/2023 11:11:29.0

ARLINDO DE PAULA MACHADO NETO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica
27/09/2023 07:23:49.0

ALLAN DEYVID PEREIRA DA SILVA
Avaliador Externo (SEDUC)

Assinatura Eletrônica
25/09/2023 16:27:10.0

ERNANDES APARECIDO SARAIVA
Avaliador Externo (AUTÔNOMO)

Em memória da minha vó Zilma Perez da Silva e meu amigo Jefferson Yuri
Barbosa.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal e ao laboratório de Incêndios Florestais pelo apoio e irremediável aprendizado nos quatro anos de doutorado.

À CAPES pela bolsa.

Ao meu orientador Dr. Antonio Carlos Batista mais que orientador foi meu maior incentivador e amigo. Me recebeu de braços abertos mesmo sem me conhecer e mesmo depois de algumas propostas frustradas acreditou que tudo daria certo. Nada disso seria possível sem ele.

Aos professores Dr. Marcos Giongo Alves e Dr. Alexandre França Tetto, pela coorientação, conversas e palavras de incentivo.

A minha mãe, minha melhor amiga, que sempre me ajudou a estudar independente de tudo. Ela, junto ao meu pai já falecido, deu-me a oportunidade que nunca tiveram fácil que foi estudar. Mesmo indo para uma cidade diferente da dela sabia que foi o melhor para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

As técnicas do laboratório de Proteção Florestal Veruza Cristina Mendonça e do laboratório de Unidades de Conservação Andreia Ticiane Pires de Carvalho pelas conversas descontraídas e aprendizado técnico e cultural.

Aos amigos professores Dr. Nilton Jose Sousa, Dr. Ricardo e Dr^a Daniela Biondi pelos conselhos, conversas e acolhimento.

Aos amigos que fiz em Curitiba Bruno, Karol, Junior, Daiane, Cláudio, Roseane, Robson e Katrine.

A Jéssica Kummer pela paciência e companheirismo.

Salvando árvore por árvore criaremos florestas e assim salvaremos o planeta.
(AUTOR, 2023)

RESUMO

A frequência dos incêndios florestais no Parque Nacional da chapada dos Guimarães (PNCG) tem sido recorrente por vários anos seguidos. A redução desses incêndios pode ser realizada por meio de um gerenciamento de perigo eficiente utilizando técnicas de SIG combinadas com dados meteorológicos. Essas ações podem proteger e preservar o PNCG. O objetivo geral da pesquisa foi analisar o perigo de incêndios florestais com base na correlação das variáveis de vulnerabilidade, com os focos de calor e o Índice de Queima Normalizada (NBR) dos anos de 2000 a 2019 do Parque Nacional da chapada dos Guimarães (PNCG). Para determinação da área de influência considerou-se o plano de manejo do parque e o sistema de coordenada usado foi a geográfica com Datum SIRGAS 2000 com exceção da função K de *Ripley*, que usou o sistema de coordenada UTM com Datum SIRGAS 2000 fuso 21 sul. As variáveis foram obtidas pelo GEE e INPE e foram classificadas como variáveis de vulnerabilidade: Evapotranspiração (ET), Temperatura de Superfície (LST), Radiação (RAD), Índice de Seca pela Diferença Normalizada (NDDI), Exposição de Vertente (EV), Cobertura de Copa (CC) e variáveis de Incêndios Florestais ou Validação: Índice de Queima Normalizada (NBR) e Focos de Calor (FC). A preparação dos dados contou com a Imputação Múltipla dos dados faltantes e suavização dos *Outliers*. O teste de normalidade aplicado foi o *Kolmogorov-Smirnov*. Foi gerado o gráfico da matriz de correlação das variáveis. O nível de significância foi de 5% usando o p-valores. Na análise do padrão espacial dos FC foi usada a função K de *Ripley*. A formação florestal de menor porte, com alto índice de seca e baixa ET pode ser relacionada com suscetibilidade ao resultado, semelhante ao encontrado nessa pesquisa na correlação positiva de ET e NDDI ($r = 0,56$). Em períodos chuvosos ocorreram maior perda de água para atmosfera. Esse fato pode explicar a correlação negativa entre LST e NDDI em relação a ET ($r = -0,47$) e ($r = -0,56$). As condições meteorológicas do PNCG no período estudado podem se assemelhar as do semiárido brasileiro. Essa constatação pode explicar a correlação negativa entre RAD e FC ($r = -0,46$) e positiva entre NDDI e LST ($r = 0,38$). NBR e NDDI ($r = -0,95$) podem ser explicados pela característica do cerrado que atribuiu a redução de disponibilidade de água a perdas de folhas para diminuir a perda d'água pela vegetação. A correlação positiva entre NBR e CC ($r = 0,77$) pode ser explicado pela presença de vegetação fotossinteticamente ativa. A fitofisionomia florestal se adapta a sazonalidade das

condições meteorológicas do local. Variáveis como ET, NDDI e CC apresentam boa correlação com perigo de incêndio florestal. Pode haver uma relação entre as características da vegetação e a ocorrência de incêndios florestais. Entender os padrões dos incêndios florestais é fundamental para a prevenção e controle.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Radiação. Temperatura de Superfície. Focos de Calor. Índices Normalizados.

ABSTRACT

The frequency of wildfires in the Chapada dos Guimarães National Park (PNCG) has been recurring for several years in a row. Reducing these fires can be accomplished through efficient hazard management using GIS techniques combined with meteorological data. These actions can protect and preserve the PNCG. The general objective of the research was to analyze the danger of wildfires based on the correlation of vulnerability variables, with hot spots and the Normalized Burning Index (NBR) from the years 2000 to 2019 of the Chapada dos Guimarães National Park (PNCG). To determine the area of influence, the park's management plan was considered, and the coordinate system used was geographic with Datum SIRGAS 2000, except for Ripley's K function, which used the UTM coordinate system with Datum SIRGAS 2000 zone 21 south. The variables were obtained by GEE and INPE and were classified as vulnerability variables: Evapotranspiration (ET), Surface Temperature (LST), Radiation (RAD), Normalized Difference Drought Index (NDDI), Slope Exposure (EV), Canopy Coverage (CC) and Forest Fire variables or Validation: Normalized Burning Index (NBR) and Hot Spots (FC). Data preparation included Multiple Imputation of missing data and smoothing of Outliers. The normality test applied was the Kolmogorov-Smirnov test. The variables correlation matrix graph was generated. The significance level was 5% using p-values. Ripley's K function was used to analyze the spatial pattern of CF. Smaller Forest formation, with a high drought index and low ET can be related to susceptibility to the result, like what was found in this research in the positive correlation of ET and NDDI ($r = 0.56$). During rainy periods, there was greater loss of water to the atmosphere. This fact may explain the negative correlation between LST and NDDI in relation to ET ($r = -0.47$) and ($r = -0.56$). The meteorological conditions of the PNCG during the studied period may resemble those of the Brazilian semi-arid region. This finding may explain the negative correlation between RAD and HR ($r = -0.46$) and positive correlation between NDDI and LST ($r = 0.38$). NBR and NDDI ($r = -0.95$) can be explained by the characteristic of the Cerrado that attributed the reduction in water availability to leaf losses to reduce water loss through vegetation. The positive correlation between NBR and CC ($r = 0.77$) can be explained by the presence of photosynthetically active vegetation. Forest phytophysiology adapts to the seasonality of local meteorological conditions. Variables such as ET, NDDI and CC show good correlation with forest fire danger.

There may be a relationship between vegetation characteristics and the occurrence of wildfires. Understanding forest fire patterns is essential for prevention and control.

Keywords: Evapotranspiration. Radiation. Land Surface Temperature. Hot Spots. Normalized Indexes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES..... | 47 |
| FIGURA 2 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (1991-2020) DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CUIABÁ - MT..... | 49 |
| FIGURA 3 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES..... | 52 |
| FIGURA 4 - MODELO ESQUEMÁTICO DA EXPOSIÇÃO DE VERTENTE..... | 60 |
| FIGURA 5 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO..... | 62 |
| FIGURA 6 - REDE DE CAPTURA DE <i>PIXELS</i> | 63 |
| FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE <i>PIXELS</i> | 64 |
| FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DA ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 65 |
| FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS DO TESTE DE NORMALIDADE..... | 68 |
| FIGURA 10 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 72 |
| FIGURA 11 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 74 |
| FIGURA 12 - RADIAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 75 |
| FIGURA 13 - ÍNDICE DE SECA PELA DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 77 |
| FIGURA 14 - EXPOSIÇÃO DE VERTENTE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 78 |
| FIGURA 15 - COBERTURA DE COPA OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 79 |
| FIGURA 16 - FOCOS DE CALOR OBTIDOS PELO INPE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 81 |
| FIGURA 17 - DENSIDADE DE KERNEL OBTIDA PELO ARCGIS PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 82 |
| FIGURA 18 - ÍNDICE DE QUEIMA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 84 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 1 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 71 |
| GRÁFICO 2 - PADRÃO ESPACIAL OBSERVADO PARA FOCOS DE CALOR PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 83 |
| GRÁFICO 3 - DADOS FALTANTES DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 101 |
| GRÁFICO 4 - INSERÇÕES DOS DADOS POR IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 103 |
| GRÁFICO 5 - DENSIDADE DOS DADOS IMPUTADOS E EXISTENTES DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 103 |
| GRÁFICO 6 - HISTOGRAMAS ANTES DA REMOÇÃO DAS <i>OUTLIERS</i> DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 104 |
| GRÁFICO 7 - HISTOGRAMAS APÓS A REMOÇÃO DAS <i>OUTLIERS</i> DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 104 |
| GRÁFICO 8 - <i>BOXPLOT</i> ANTES DA REMOÇÃO DAS <i>OUTLIERS</i> DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 105 |
| GRÁFICO 9 - <i>BOXPLOT</i> APÓS A REMOÇÃO DAS <i>OUTLIERS</i> DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 105 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 1 - FORMAÇÕES FLORESTAIS DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES | 50 |
| QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DE EXPOSIÇÃO DE VERTENTE | 59 |
| QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS | 53 |
| TABELA 2 - INDICADORES DE SEVERIDADE DE SECA..... | 57 |
| TABELA 3 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 73 |
| TABELA 4 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 74 |
| TABELA 5 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA RADIAÇÃO DE FLUXO DESCENDENTE FOTOSSINTÉTICO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 76 |
| TABELA 6 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DO ÍNDICE DE SECA PELA DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 77 |
| TABELA 7 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA EXPOSIÇÃO DE VERTENTE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 79 |
| TABELA 8 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA COBERTURA DE COPA OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 80 |
| TABELA 9 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DOS FOCOS DE CALOR OBTIDO PELO INPE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 82 |
| TABELA 10 - INDICADORES ESTATÍSTICOS ÍNDICE DE QUEIMA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 85 |
| TABELA 11 - INDICADORES ESTATÍSTICOS ANTES DA IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019..... | 102 |
| TABELA 12 - INDICADORES ESTATÍSTICOS APÓS IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019 | 102 |
| TABELA 13 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES..... | 106 |

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

| | |
|--------|--|
| CAE | - Completa Aleatoriedade Espacial |
| CC | - Cobertura de Copa |
| CPTEC | - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| ET | - Evapotranspiração |
| EV | - Exposição de Vertente |
| FC | - Focos de Calor pela Densidade de Kernel |
| GEE | - Google Earth Engine |
| IM | - Imputação Múltipla |
| LST | - Temperatura de Superfície |
| NBR | - Índice de Queima Normalizada |
| NDDI | - Índice de Seca pela Diferença Normalizada |
| NDVI | - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada |
| NDWI | - Índice de Diferença Normalizada da Água Presente na Vegetação |
| PNCG | - Parque Nacional da chapada dos Guimarães |
| PNCGZA | - Zona de Amortecimento do Parque Nacional da chapada dos Guimarães |
| RAD | - Radiação |
| SIG | - Sistema de Informações Geográficas |

LISTA DE SÍMBOLOS

λE - Evapotranspiração

ΔR_n - Variação da densidade líquida de fluxo de radiação

ρ - Coeficiente de reflexão

c_p - Calor específico do ar a pressão constante

$e_s(T)$ - Pressão de vapor de saturação do vapor de água na temperatura T

e - Pressão parcial do vapor de água no ar

Δ - Taxa de mudança da pressão de vapor de saturação com a temperatura

γ - Comprimento de onda da radiação eletromagnética

r_s - Resistência de um conjunto de estômatos

r_H - Resistência de transferência de massa

K - Função de Kernel

h - Raio de busca

x - Posição do centro de cada célula do *raster* de saída

X_i - Posição do ponto "i" proveniente do centroide de cada polígono

n - Número total de focos de calor

Dt - Dados transformados

\bar{x} - Média aritmética

σ - Desvio padrão

n - Número de focos de calor na região de estudo

x_i e x_j - Coordenadas dos pontos do mapa

$\|x_i - x_j\|$ - Distância euclidiana entre as localizações x_i e x_j

s - Vetor arbitrário de distâncias

$w_i(x_i, x_j)$ - Função de correção isotrópica de bordadura

$I(U)$ - Função indicadora que assume valor 1 (um) quando a condição U for verdadeira

e - Valor Zero quando falsa

n - Número de focos de calor

$\|A\|$ - Quantitativo da área de estudo

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 22 |
| 1.2 OBJETIVOS | 23 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 23 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 23 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 2.1 RISCO E PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS..... | 16 |
| 2.1.1 Fatores de ameaça de incêndios florestais | 17 |
| 2.1.1.1 Antropização | 18 |
| 2.1.2 Fatores de vulnerabilidade de propagação do fogo | 19 |
| 2.1.2.1 Vegetação e material combustível | 20 |
| 2.1.2.2 Topografia | 22 |
| 2.1.2.3 Fatores meteorológicos | 24 |
| 2.1.3 Índice de Perigo de Incêndios Florestais..... | 26 |
| 2.2 GOOGLE EARTH ENGINE | 27 |
| 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E INDÍCES | 29 |
| 2.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO..... | 34 |
| 2.4.1 Estimativa da evapotranspiração | 36 |
| 2.5 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE (LST)..... | 38 |
| 2.6 SALDO DE RADIAÇÃO..... | 41 |
| 2.7 MONITORAMENTO DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS | 43 |
| 2.7.1 Focos de calor..... | 44 |
| 2.7.1.1 Mapa de calor (Kernel)..... | 46 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 47 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO..... | 47 |
| 3.2 ACESSOS | 48 |
| 3.3 CLIMA | 48 |
| 3.4 TOPOGRAFIA..... | 49 |
| 3.5 COBERTURA VEGETAL | 49 |
| 3.6 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO | 51 |
| 3.7 OBTENÇÃO DAS IMAGENS E DADOS | 53 |
| 3.7.1 Evapotranspiração (ET)..... | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 3.7.2 Focos de calor..... | 55 |
| 3.7.2.1 Densidade de Kernel..... | 55 |
| 3.7.3 Temperatura de Superfície (LST)..... | 56 |
| 3.7.4 Radiação (RAD) | 56 |
| 3.7.5 Índice de Seca pela Diferença Normalizada (NDDI) | 57 |
| 3.7.6 Índice de Queima Normalizada (NBR) | 58 |
| 3.7.7 Exposição de Vertente (EV) | 58 |
| 3.7.8 Cobertura de copa (CC) | 60 |
| 3.8 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS..... | 60 |
| 3.9 JANELA TEMPORAL | 61 |
| 3.10 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO..... | 62 |
| 3.11 EXTRAÇÃO DOS <i>PIXELS</i> | 63 |
| 3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA | 65 |
| 3.12.1 Dados faltantes | 66 |
| 3.12.2 <i>Outliers</i> | 67 |
| 3.12.3 Teste de normalidade e matriz de correlação | 68 |
| 3.12.4 Função K de <i>Ripley</i> | 69 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 71 |
| 4.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS | 71 |
| 4.1.1 Matriz de correlação..... | 71 |
| 4.2 VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE | 72 |
| 4.2.1 Evapotranspiração (ET)..... | 72 |
| 4.2.2 Temperatura de Superfície (LST)..... | 73 |
| 4.2.3 Radiação (RAD) | 75 |
| 4.2.4 Índice de seca pela diferença normalizada (NDDI) | 76 |
| 4.2.5 Exposição de vertente (EV)..... | 78 |
| 4.2.6 Cobertura de copa (CC) | 79 |
| 4.3 VARIÁVEIS DE VALIDAÇÃO..... | 81 |
| 4.3.1 Focos de calor e densidade de Kernel | 81 |
| 4.3.1.1 Distribuição espacial dos focos de calor..... | 82 |
| 4.3.2 Índice de queima normalizada (NBR)..... | 84 |
| 5 CONCLUSÕES | 86 |
| 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 86 |
| REFERÊNCIAS..... | 87 |

| | |
|--|------------|
| APÊNDICE 1 – DADOS FALTANTES..... | 101 |
| APÊNDICE 2 – IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA (IM)..... | 102 |
| APÊNDICE 3 – REMOÇÃO DE <i>OUTLIERS</i> | 104 |
| APÊNDICE 4 – <i>BOXPLOT</i>..... | 105 |
| APÊNDICE 5 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO..... | 106 |

1 INTRODUÇÃO

A descoberta do fogo foi um momento importante na história. Acredita-se que tenha ocorrido há milênios, quando uma faísca acidental ou a fricção de pedras gerou uma chama brilhante e fascinante. Esse fato iluminou o caminho das gerações futuras, fornecendo calor, luz e uma fonte de poder inigualável. O fogo se tornou uma ferramenta essencial para cozinhar alimentos, proporcionando nutrição e permitindo que os seres humanos explorassem novos territórios. Além disso, tornou-se uma metáfora poderosa para o conhecimento, a criatividade e o avanço da civilização humana. A descoberta do fogo marcou um momento de profunda transformação e definiu o curso do desenvolvimento humano.

Os incêndios florestais no estado de Mato Grosso são uma preocupação recorrente e desafiadora. Devido à sua extensa área de cobertura vegetal, que inclui a Floresta Amazônica, Cerrado e Pantanal, o Estado é propenso a incêndios durante a estação seca. Os incêndios florestais podem ocorrer tanto de forma natural, raios, quanto a forma antrópica, como o desmatamento ilegal e na prática limpeza de terras. Esses incêndios, além de destruírem vastas áreas de vegetação, representam uma ameaça à biodiversidade, à saúde humana e ao clima global, liberando grandes quantidades de gases de efeito estufa na atmosfera. Enfrentar e prevenir os incêndios florestais no Mato Grosso exige esforços contínuos de monitoramento, educação ambiental, fiscalização e implementação de políticas de conservação, visando preservar esse rico ecossistema e garantir um futuro sustentável para as gerações vindouras.

A análise de perigo de incêndios florestais desempenha um papel crucial na prevenção e no combate a essas ocorrências devastadoras. Por meio dessa análise, especialistas avaliam uma série de fatores para determinar a probabilidade e a gravidade dos incêndios em determinada região. Isso inclui a análise das condições meteorológicas, como temperatura, umidade do ar e vento, além da presença de vegetação seca e inflamável. A identificação de áreas de maior vulnerabilidade e de potenciais fontes de ignição humana contribuem para a tomada de decisões estratégicas, como a implementação de medidas preventivas, a alocação de recursos e o planejamento de evacuações em casos de necessidade. Assim, a análise de perigo de incêndios florestais é uma ferramenta fundamental para orientar ações de

manejo e proteção dos ecossistemas, visando a preservação da biodiversidade, a segurança das comunidades e a conservação dos recursos naturais.

Neste contexto o *Google Earth Engine* (GEE) oferece uma variedade de coleções valiosas de dados sobre incêndios florestais, que fornecem *insights* e informações essenciais para a compreensão e monitoramento desses eventos. Uma das coleções disponíveis é a de imagens de satélite, que capturam áreas afetadas por incêndios em diferentes momentos, permitindo a análise da evolução e extensão dos danos ao longo do tempo. Além disso, o GEE disponibiliza o acesso a dados sobre a temperatura da superfície, a emissão de gases e partículas, bem como a densidade da vegetação, que auxiliam na identificação de áreas propensas a incêndios e no monitoramento da qualidade do ar durante esses eventos. Com acesso a essas coleções, cientistas, pesquisadores e gestores ambientais podem realizar análises avançadas, criar modelos preditivos e desenvolver estratégias de prevenção e combate aos incêndios florestais, contribuindo para a preservação dos ecossistemas e a segurança das comunidades afetadas.

O Parque Nacional da Chapada dos Guimarães tem enfrentado a recorrência de incêndios florestais, representando uma séria ameaça à rica biodiversidade e à beleza natural desse ecossistema único. Os fatores meteorológicos contribuem para o aumento do perigo de incêndios na região. Além disso, vulnerabilidades de fatores associados desempenham um papel significativo nos incêndios florestais no parque. Esses incêndios não apenas causam danos irreversíveis à vegetação, mas também impactam negativamente a vida selvagem e comprometem os recursos hídricos da região.

1.1 JUSTIFICATIVA

A frequência dos incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães tem sido recorrente por vários anos seguidos. A redução desses incêndios pode ser realizada através de um gerenciamento de perigo eficiente, utilizando técnicas de SIG combinadas com dados meteorológicos. Essas ações podem ser usadas pela gestão para proteger e preservar o Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, garantindo sua beleza natural e importância ecológica para as gerações futuras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o perigo de incêndios florestais com base na correlação das variáveis de vulnerabilidade, com os focos de calor e o Índice de Queima Normalizada (NBR) dos anos de 2000 a 2019 do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (PNCG).

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar Evapotranspiração, Exposição de vertente, Índice de Seca pela Diferença Normalizada, Cobertura de Copa, Temperatura de Superfície, Fluxo Radiativo Fotossintético Descendente de Superfície do Ar e Índice de Queima Normalizada do PNCG;
- Estimar a densidade de Kernel dos focos de calor do PNCG e sua zona de amortecimento, de forma a oferecer subsídios de validação do modelo de perigo de incêndios florestais juntamente com o NBR;
- Avaliar a eficiência das estimativas das variáveis obtidas em indicar perigo de incêndios florestais no PNCG;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RISCO E PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

Conforme Sousa, Barbosa e Pereira (2021), os incêndios em florestas surgem de eventos naturais ou da ação humana. Geralmente, eles são iniciados por raios, queima de resíduos, gases liberados por escapamentos de máquinas e equipamentos, queimadas em áreas agrícolas, cigarros descartados de forma negligente e incêndios criminosos. Portanto, essa questão envolve diversos aspectos interligados em suas consequências e desdobramentos.

O ambiente tem enfrentado inúmeros impactos negativos causados pela atividade humana, especialmente pelo uso expansivo de novas áreas para o desenvolvimento de atividades rurais. Essas atividades acabam criando as condições necessárias para a ocorrência do fogo, que está associado a períodos de seca, resultando em incêndios florestais (SALES *et al.*, 2019).

Segundo Bernardes (2019), o fogo geralmente passa por cinco fases: pré-ignição, combustão em chama, combustão em fumaça, combustão em brasa e extinção. Embora todas as fases de combustão tenham impacto na sustentabilidade das camadas do solo, a transferência de calor da parte orgânica e mineral dos horizontes do solo tem os efeitos mais profundos nos processos físicos, químicos e biológicos que sustentam os ecossistemas.

Vários parâmetros ambientais têm influência significativa no início, propagação e intensidade dos incêndios florestais. Os aspectos mais relacionados à determinação do risco de incêndio incluem o tipo de material combustível, as condições meteorológicas, a topografia e o tipo de vegetação presente (SILVA JUNIOR *et al.*, 2018).

De acordo com Brown e Davis (1973), risco de incêndios está relacionado com a probabilidade de um incêndio iniciar em função da presença de agentes causadores, enquanto perigo de incêndios está relacionado com as características do material combustível que o predispõe à ignição ou representam a dificuldade para a extinção do incêndio. Segundo Chuvieco *et al.* (2010), a avaliação de risco de incêndio inclui os dois aspectos: perigo de incêndio (ignição ou propagação potencial) e a vulnerabilidade (dano potencial), sendo o risco total o produto dos dois.

Assim, diversos fatores podem auxiliar na determinação do risco de incêndios florestais. As áreas de risco são aquelas em que o fogo é iminente e pode se espalhar facilmente para outras regiões, podendo ser classificadas como dinâmicas ou constantes. Os aspectos dinâmicos estão relacionados às condições meteorológicas, como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica (WHITE; WHITE; RIBEIRO, 2016).

Por sua vez, os aspectos constantes costumam variar em menor intensidade, como o relevo e o material combustível. No entanto, a utilização de índices de perigo e o mapeamento das áreas de maior risco são ferramentas para analisar os incêndios florestais (WHITE; WHITE; RIBEIRO, 2016).

2.1.1 Fatores de ameaça de incêndios florestais

Os principais fatores responsáveis por desencadear incêndios florestais e possibilitar a identificação de regiões com diferentes níveis de suscetibilidade é a ignição. Esse fator é amplamente observado pois a maioria dos incêndios em áreas florestais resulta de atividades humanas relacionadas ao uso e ocupação da terra. As estatísticas referentes às ocorrências de incêndios florestais comprovam que, tanto no Brasil quanto em diversos outros países, as causas primárias desses incêndios são predominantemente originadas por ações humanas. As ocorrências de incêndios causados por raios são uma parcela relativamente pequena do número total de incêndios em escala global (BROWN; DAVIS, 1973; CALABRI, 1982; GOLDAMMER, 1982a; DROLET, 1998).

Esses incêndios são os únicos que se enquadram na categoria de ocorrências de origem natural. No entanto, eles tendem a ocorrer em áreas de difícil acesso e distantes dos recursos de combate ao fogo (PYNE, 1984), resultando em poucas ocorrências, mas com grandes extensões queimadas (DROLET, 1998). No Canadá, conforme relatado por RAMSEY e HIGGINS¹ *apud* SOARES (1989), os incêndios causados por raios correspondem a 30% das ocorrências e são uma das principais causas de incêndios florestais. Os países escandinavos, como a Finlândia com 26%

¹ RAMSEY, G. S.; HIGGINS, D. G. **Canadian forest fire statistics**. Ontário: Canadian Forestry Service, 1981. (Information Report PI-X-9)

e a Suécia com 12%, e algumas regiões da antiga União Soviética (BARDAN, 1982) frequentemente sofrem com incêndios causados por raios.

De acordo com Vélez (1982), na região mediterrânea, quase um terço de todos os incêndios ocorre devido ao descuido de pessoas em atividades recreativas, acendendo fogueiras, e por fumantes. Incêndios intencionais também são numerosos e estão se tornando mais frequentes no oeste mediterrâneo. Calabri (1982) afirma que entre os incêndios causados pelo homem, existem aqueles decorrentes de negligência e os de natureza criminosa.

Goldammer (1982a), menciona que na Alemanha, a maioria dos incêndios é causada por acidentes, alguns por incendiários ou outras causas. Bardan (1982), em um estudo sobre incêndios nas regiões central, norte e leste da Europa, observou que em muitos países, os incêndios são causados por faíscas de trens e atividades relacionadas ao uso do fogo. Infelizmente, há muitos casos de incêndios causados pela ação de piromaníacos. Na Suécia, um número relativamente alto de incêndios é atribuído ao rompimento de linhas de alta tensão.

Nos últimos anos, os incendiários se tornaram a principal causa de incêndios na Finlândia. Em muitos países, o número de incêndios causados por incendiários tem aumentado consideravelmente, e a prevenção desse tipo de agente de ignição é complexa (HEIKILLÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 1993). De acordo com Salas e Chuvieco (1994), os fatores humanos são a fonte mais comum de incêndios florestais na região oeste da Espanha, bem como em todo o país. Castañeda (1997) afirma que, na Colômbia, a grande maioria dos incêndios florestais está relacionada à atividade humana.

Soares (2000), ao comentar sobre as causas de incêndios florestais no Brasil, menciona que, em um estudo sobre estatísticas de incêndios no período de 1983 a 1987, a principal causa foi "queimas para limpeza", seguida por "incendiários". No entanto, em uma análise mais recente (1994 a 1997), a categoria "incendiários" passou a ocupar o primeiro lugar, seguida pela categoria "queimas para limpeza". O aumento de incêndios causados por incendiários é um fenômeno global que está relacionado ao agravamento das questões sociais, como desemprego e pressão sobre a terra, por exemplo.

2.1.1.1 Antropização

A infraestrutura de transporte é fundamental para diversas atividades, especialmente no transporte de matérias-primas. No entanto, o acesso de pessoas e veículos a essas áreas também apresenta riscos de incêndio devido a vários fatores, tais como incêndios criminosos, práticas religiosas, incêndios causados por cigarros e pequenas fogueiras, entre outros incidentes (MOREIRA; MENDES e SANTOS, 2020).

De acordo com Goldammer (1982b), o mapa de incêndios florestais deve conter, de forma codificada, as atividades realizadas nas áreas adjacentes à propriedade. Essa recomendação está alinhada com o diagnóstico anterior de que a maioria dos incêndios florestais ocorre devido à interferência humana. Portanto, a identificação e o georreferenciamento das alterações humanas presentes no interior e no entorno da área florestal são fundamentais para o desenvolvimento de medidas preventivas contra incêndios, bem como para a construção do mapa de risco de incêndios.

Áreas ao longo de estradas, ferrovias e áreas recreativas foram indicadas por Salas e Chuvieco (1994), como importantes para a ignição com base no estudo de relatórios de ocorrência de incêndios. Ferraz e Vettorazzi (1998), identificaram as regiões ao longo de estradas internas, rodovias e caminhos como áreas de risco, devido à ocorrência de incêndios criminosos, práticas religiosas, cigarros e pequenas fogueiras.

De acordo com Castañeda (1997), as características relacionadas à presença humana e às alterações humanas no ambiente, que representam perigo para a ocorrência de incêndios, são as vias de comunicação, as atividades associadas ao uso do fogo, as áreas recreativas, as vilas e povoados, os oleodutos, as linhas de alta tensão e as áreas com tensões sociais.

As vias de comunicação incluem estradas municipais, estaduais e federais, além de ferrovias, corta-fogos e trilhas. De acordo com Chuvieco e Congalton (1989), o risco oferecido pelas estradas pode ser associado ao nível de interação das pessoas com o ambiente. Nesse sentido, uma estrada pavimentada possui uma área de influência de atividade humana e por isso apresentam grandes riscos de incêndios florestais.

2.1.2 Fatores de vulnerabilidade de propagação do fogo

Existem várias características ambientais que exercem uma influência significativa no surgimento, propagação e intensidade dos incêndios florestais. Dentre esses fatores ambientais, destacam-se o material combustível, as condições climáticas, a topografia e o tipo de cobertura vegetal (BROWN; DAVIS, 1973).

Em um estudo conduzido por Jemison, Lindenmuth e Keetch (1949) na região da *Coastal Plain*, nos Estados Unidos, os fatores determinantes do risco de incêndios florestais foram identificados como o teor de umidade do material combustível, a velocidade do vento, as condições da vegetação e a estação do ano.

De acordo com Mcarthur (1962), as principais variáveis relacionadas à propagação dos incêndios incluem características do material combustível, como quantidade, umidade, tamanho e arranjo, além da velocidade do vento, a capacidade de transporte de faíscas, a inclinação do terreno e a instabilidade atmosférica. Soares (1985) indica que os fatores que mais influenciam a propagação dos incêndios florestais são o material combustível (quantidade, tipo, arranjo e umidade), as condições meteorológicas, topografia e o tipo de floresta presente na área.

2.1.2.1 Vegetação e material combustível

A disponibilidade de materiais combustíveis e a resistência das vegetações são fatores determinantes quando se trata de incêndios, especialmente no caso das formações florestais. Assim, o avanço da agricultura e da pecuária têm um impacto significativo, aumentando o risco de incêndios, principalmente quando essas áreas estão secas e são mal administradas (TORRES *et al.*, 2018).

A vegetação presente em uma determinada área desempenha um papel fundamental na disponibilidade do material combustível necessário para a ocorrência de incêndios. A composição química da vegetação pode influenciar tanto a velocidade quanto a quantidade de calor liberada durante um incêndio (SOARES; BATISTA, 1997).

Segundo os mesmos autores, em florestas ralas ou abertas, o ar circula com mais facilidade, o que contribui para acelerar a secagem do material combustível. Por outro lado, em florestas densas, o ar não circula livremente, a cobertura vegetal intercepta a radiação solar e reduz a evaporação, resultando em um aumento da umidade relativa e uma diminuição da temperatura do ar. As características das espécies presentes também podem influenciar as condições de propagação dos

incêndios, sendo que, em geral, um cultivo de coníferas apresenta condições mais favoráveis para a propagação do fogo do que uma floresta de folhosas.

Segundo Jemison, Lindenmuth e Keetch (1949), as temperaturas do solo e do ar, a umidade, o vento, a radiação e a evaporação variam consideravelmente entre florestas densas e abertas. Portanto, o equilíbrio da umidade do material combustível e as taxas de ganho e perda de umidade diferem de acordo com o grau de exposição.

O tipo e a composição da floresta desempenham um papel crucial na determinação do potencial de uma área para desenvolver e sustentar incêndios. A presença ou ausência de arbustos e espécies de sub-bosque em uma determinada área também pode afetar o comportamento do fogo, fornecendo combustível adicional para a queima e influenciando o microclima (MCARTHUR, 1962).

Conforme Gaylor (1974), é possível identificar zonas de risco considerando as características dos combustíveis vegetais. Áreas que apresentam acúmulo de resíduos de exploração, combustíveis perigosos e semi-perigosos, árvores danificadas por insetos ou doenças, ou concentração de combustíveis altamente inflamáveis representam um grande potencial para a propagação de incêndios.

A quantidade de combustível disponível é um fator determinante para a propagação do fogo e a quantidade de calor liberada durante a queima, conforme mencionado por McArthur (1962), Batista (1990) e Heikillä, Grönqvist e Jurvélius (1993). A intensidade do fogo está diretamente relacionada à quantidade de combustível que queima. Em uma floresta, apenas uma parte do combustível existente está disponível para queimar, sendo chamada de combustível disponível. Esse valor depende de vários fatores, como a proporção de material combustível vivo e morto, o tamanho das partículas de combustível, o teor de umidade e a continuidade do combustível (MCARTHUR, 1962).

O combustível disponível é a quantidade de material combustível que normalmente é consumida em um incêndio florestal, correspondendo aproximadamente a 70 a 85% do material com diâmetro inferior a 2,5 cm (BATISTA, 1990).

O volume de combustível disponível que queima por unidade de área afeta a intensidade do fogo. Quanto maior o volume de combustível, maior será a intensidade da queima e a quantidade total de calor produzido pelo fogo. A quantidade de combustível pode variar consideravelmente, por exemplo, entre um ambiente com gramíneas finas e outro com resíduos de exploração florestal mais grossos. O volume

de combustível disponível desempenha um papel importante na propagação do fogo (HEIKILLÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 1993), sendo uma das variáveis mais significativas no comportamento do fogo, afetando tanto a taxa de propagação quanto a intensidade de um incêndio, conforme destacado por McArthur (1962).

A importância da carga de combustível é justificada por Rego e Botelho (1990), considerando a fórmula para o cálculo da intensidade do fogo, tornando fundamental o estudo da quantidade de material combustível e sua distribuição espacial em toda a propriedade florestal. Pyne (1984), avaliou que a quantidade de material combustível por unidade de área varia amplamente de acordo com o ecossistema em estudo.

Segundo Heikillä, Grönqvist e Jurvélius (1993), a distribuição da carga de combustível é semelhante, observando que em florestas mistas a quantidade de combustível pode variar de 100 a 1000 Mg/ha.

2.1.2.2 Topografia

A avaliação dos impactos da topografia na propagação de incêndios é realizada por meio do estudo de três elementos essenciais: a elevação do terreno, a orientação das encostas e a inclinação do terreno (CAMELO; SANCHES; NAKAGOMI, 2020).

Segundo os mesmos autores, a relação entre a declividade do terreno e a propagação do fogo é direta, influenciando a direção, velocidade e intensidade do avanço das chamas. Isso ocorre devido ao ar quente proveniente da área em chamas pré-aquecer os materiais combustíveis à frente do fogo, resultando em uma maior velocidade de propagação nas áreas inclinadas. Em alguns casos, a inclinação do terreno pode ser mais relevante que a influência do vento na determinação da taxa de propagação do fogo, dependendo do ângulo em questão.

A inclinação exerce impacto na composição da vegetação, na umidade atmosférica, na temperatura e nos materiais combustíveis. Geralmente, as regiões de maior altitude são caracterizadas por apresentarem condições mais úmidas e frias, o que faz com que o fogo seja mais influenciado pela umidade e pela temperatura. Além disso, a altitude desempenha um papel importante no gradiente da vegetação e no aumento da fragilidade do ecossistema em caso de incêndios (SILVA JUNIOR *et al.*, 2018).

A elevação do terreno, em relação ao nível médio do mar, influencia as condições climáticas da área. Segundo Fuller (1991), altitudes elevadas estão associadas a um clima frio e úmido, o que resulta em uma estação de incêndios mais curta. Pyne (1984), indica que a altitude regula a temperatura e a precipitação. Brown e Davis (1973), destacam que tanto a altitude quanto o ângulo de orientação das encostas têm efeitos significativos nas condições climáticas.

A inclinação do terreno está diretamente relacionada à velocidade e à direção de propagação do fogo. O ar aquece conforme o terreno se torna mais inclinado, pré-aquecendo os combustíveis à frente do fogo, facilitando assim seu avanço com maior rapidez nas encostas. Terrenos inclinados atuam como uma chaminé, transportando o calor e as chamas ladeira acima. Portanto, dependendo do ângulo de inclinação e da velocidade do vento, a inclinação pode ter um papel mais relevante do que o próprio vento na determinação da taxa de propagação do fogo (FULLER, 1991).

O fogo se desenvolve com maior velocidade nos alicives do que nas descidas ou terrenos planos. A coluna de convecção e a transmissão de calor são mais lentas nas descidas em relação a uma superfície plana, enquanto a velocidade é maior nas encostas. A velocidade de propagação do fogo em encostas é proporcional ao ângulo de inclinação do terreno (HEIKILLÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 1993).

McArthur², *apud* por Chandler *et al.* (1983), indica que a taxa de propagação do fogo dobra a cada variação de 10° de inclinação. Essa taxa dobra a cada 15° de inclinação até 30° e, a partir desse ponto, dobra a cada aumento de 10° de inclinação. Albini³ *apud* Chandler *et al.* (1983), indica que o efeito da declividade na propagação varia de acordo com o tipo de combustível presente no terreno inclinado.

A direção das encostas exerce influência sobre a intensidade da radiação solar incidente no terreno, afetando a umidade do ar e dos materiais combustíveis. No hemisfério norte, as faces sul e oeste recebem uma maior quantidade de radiação solar, resultando em aquecimento e maior aridez em comparação às exposições norte, que recebem menos luz solar. As faces sul e oeste têm uma estação normal de incêndios mais prolongada, um período diário de queima mais extenso e

² MCARTHUR, A. G. **Control burning in eucalypt forests**. Canberra: Commonwealth of Australia Forestry and Timber Bureau, 1962.

³ ALBINI, F. A. **Fire behavior estimation**. [S. 1.] U.S For. Serv. Nor. For. Fire Lab., 1974.

estatisticamente registram um maior número de incêndios do que as inclinações norte, sendo que a maioria dos incêndios iniciados nessas faces atinge proporções consideráveis (FULLER, 1991).

No hemisfério sul, os raios solares incidem mais diretamente nas faces voltadas para o norte, transmitindo mais calor para essa exposição do que para qualquer outra. A face oeste é a segunda a receber uma maior quantidade de energia, seguida pela face leste, e a face sul é a que menos se aquece. De fato, em latitudes superiores a 23°27'S, a face sul nunca recebe insolação direta, mesmo durante o verão, devido à inclinação do eixo da Terra em relação ao sol. Portanto, o efeito da exposição aumenta à medida que a latitude aumenta (SOARES, 1985).

Embora a quantidade de radiação solar que atinge as exposições leste seja a mesma que atinge as exposições oeste, a temperatura na face oeste é mais elevada do que na face leste, exceto quando ocorrem variações diurnas possíveis de cobertura de nuvens e turbidez atmosférica. Isso ocorre porque, durante a tarde, quando a radiação incide sobre a face oeste, o terreno já está pré-aquecido pelo ar cuja temperatura tem aumentado desde o nascer do sol (HAURWITZ; AUSTIN, 1944).

Segundo os mesmos autores, o aquecimento de uma face leste, por outro lado, começa a partir de superfícies com temperaturas mais baixas, devido à perda de energia durante a noite anterior. Outro fator que contribui para as temperaturas máximas mais altas ao longo da inclinação oeste é a evaporação. Especialmente no início da manhã, uma parte considerável da radiação solar é utilizada na evaporação da água presente no terreno, que ainda está úmido devido à redução da temperatura durante a noite anterior. Mais tarde, o terreno se torna mais seco e, portanto, o calor utilizado na evaporação é consideravelmente menor.

Essa variação na taxa de radiação resulta em diferentes microclimas em todas as inclinações, o que implica em variações na quantidade e diversidade da vegetação presente. No hemisfério norte, as inclinações voltadas para o norte e os cânions profundos recebem menos luz solar, o que resulta em maior umidade e vegetação verde por mais tempo. Nas vertentes voltadas para o norte, são observadas espécies menos adaptadas à exposição direta à luz solar, enquanto nas vertentes voltadas para o sul são encontradas apenas espécies muito resistentes à luz solar (FULLER, 1991).

2.1.2.3 Fatores meteorológicos

Uma análise precisa do comportamento do fogo não pode ser baseada apenas em um único componente climático. O comportamento do fogo é resultado da interação de múltiplos fatores que atuam de maneiras diferentes. Os principais fatores climáticos a serem considerados em incêndios são a precipitação, umidade relativa, temperatura do ar e vento. A precipitação e a umidade relativa são extremamente importantes, pois afetam o teor de umidade dos materiais combustíveis (HEIKILLÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 1993).

Nesse sentido, o teor de umidade também está relacionado ao diâmetro dos materiais combustíveis, pois quanto menor o diâmetro, mais facilmente a água evapora. Os efeitos da temperatura do ar no comportamento do fogo são indiretos, uma vez que o material combustível mais aquecidos exigem menos calor para iniciar e sustentar o processo de combustão (BATISTA, 1990).

Segundo o mesmo autor, a temperatura do ar afeta a quantidade de energia liberada pelo fogo, mas geralmente tem pouca influência na ignição ou continuação do incêndio. A temperatura também afeta a capacidade do ar de reter vapor de água. Além disso, à medida que a temperatura aumenta, a umidade geralmente diminui, o que reduz o teor de umidade dos materiais combustíveis, aumentando o risco de incêndios. O ar se aquece principalmente por contato com a superfície terrestre, que por sua vez é aquecida pelo sol.

As diferenças ou desuniformidades no aquecimento das superfícies geram contrastes de temperatura no ar, o que pode afetar os padrões de ventos locais, chuvas e tempestades. Vários fatores influenciam a temperatura da superfície, incluindo o ângulo do sol, a duração do dia e a presença de nuvens (BATISTA, 1990).

O vento é um dos fatores mais importantes na determinação do comportamento do fogo. Ele afeta a taxa de secagem dos materiais combustíveis, aumenta o suprimento de oxigênio, influencia o pré-aquecimento dos materiais combustíveis e pode transportar faíscas, causando novos focos de incêndio em áreas não afetadas. Ventos fortes podem inclinar a coluna de convecção em direção ao solo, promovendo um rápido pré-aquecimento e secagem dos materiais combustíveis à frente do fogo, permitindo uma propagação mais rápida nessa direção (BATISTA, 1990).

O vento tem influência tanto na taxa quanto na direção de propagação do fogo (HEIKILLÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 1993). Por outro lado, ventos leves auxiliam certos materiais em brasa a iniciar novos focos de incêndio (BATISTA, 1990).

O conhecimento das variações na velocidade e direção do vento é importante, pois influencia o teor de umidade da vegetação (CASTAÑEDA, 1997).

2.1.3 Índice de Perigo de Incêndios Florestais

Os índices de perigo de incêndio proporcionam aos profissionais encarregados de combatê-lo a capacidade de prever as implicações do fogo, a fim de reduzir seus efeitos prejudiciais, preservar a segurança dos brigadistas e determinar as estratégias de extinção mais adequadas, considerando as condições climáticas atuais (COLOMBATI, 2007).

A palavra "perigo" está ligada às qualidades do material inflamável que criam uma situação favorável para o início do fogo ou que tornam a tarefa de apagar o incêndio mais desafiadora. Por outro lado, o termo "risco" de incêndio está relacionado à probabilidade de que um incêndio ocorra, considerando a presença e as atividades de fatores desencadeantes, como equipamentos, ações humanas e raios (BROWN; DAVIS, 1973; GAYLOR, 1974).

Compreender o nível de risco diário de incêndios desempenha um papel valioso na preparação de ações de prevenção e controle de incêndios florestais. Nesse sentido, recorre-se aos índices que representam a probabilidade de um incêndio ocorrer e/ou se espalhar, com base nas condições meteorológicas do dia ou em um período consecutivo de dias (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017).

Normalmente, os efeitos das condições meteorológicas na ocorrência e propagação de incêndios são avaliados por meio de índices de perigo de incêndio. Esses índices refletem a probabilidade de ocorrência e o comportamento do fogo com base nas condições atmosféricas do dia ou de uma sequência de dias (SOARES, 1985).

O mesmo autor, relata que no Brasil os principais índices utilizados são o Nesterov e o Monte Alegre (o único índice brasileiro). Esses índices são úteis para estimar a probabilidade de ocorrência de incêndios, planejar o controle, emitir autorizações para queimadas controladas, estabelecer zonas de perigo, prever o comportamento do fogo e conscientizar a comunidade.

A avaliação precisa do perigo de incêndio é uma tarefa desafiadora, dada a complexidade envolvida, que inclui a análise de múltiplos elementos, como condições

meteorológicas, natureza do material combustível, riscos de incêndio e a probabilidade de ignição (HEIKKILÄ; GRÖNQVIST; JURVÉLIUS, 2007).

Os indicadores de perigo de incêndio podem ser categorizados em dois grupos: os índices de ocorrência, que avaliam a chance de um incêndio ocorrer, considerando as condições favoráveis ou desfavoráveis para a ignição, normalmente levando em conta fatores variáveis; e os índices de propagação, que descrevem como os incêndios florestais se comportam e se propagam, considerando variáveis como a velocidade do vento e outros fatores permanentes. Além de fornecer informações sobre as condições de combustão, esses índices de disseminação também permitem prever como o fogo se comportará (VÉLEZ, 2000).

Alguns pesquisadores utilizam observações meteorológicas como dados de entrada e, por meio de modelos, relacionam-nas com as variáveis mapeadas, gerando mapas de energia liberada, que variam ao longo do tempo e das condições meteorológicas (BURGAN; SHASBY, 1984). Castañeda (1997), incluiu o mapeamento de temperatura, volume de precipitação e intensidade e direção dos ventos em seu zoneamento de risco.

O uso do índice de perigo de incêndio (Monte Alegre) também permite gerar mapas diários de perigo (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998). Gouma e Chronopoulou-Sereli (1998), mapearam as condições meteorológicas registrando a variabilidade microclimática para integrar o mapa de risco meteorológico com a suscetibilidade dos materiais combustíveis e a ocorrência de incêndios.

2.2 GOOGLE EARTH ENGINE

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma lançada pela Google em 2010, que utiliza processamento em nuvem, e se tornou uma ferramenta importante para a condução de pesquisas no campo da ciência da terra (AMANI *et al.*, 2020). O GEE se destaca por sua capacidade de fornecer acesso fácil aos dados dos principais produtos de sensoriamento remoto disponíveis atualmente, como *Landsat*, *Sentinel* e *MODIS*, permitindo aos usuários desenvolverem seus próprios bancos de dados. Além disso, a plataforma oferece uma variedade de algoritmos pré-desenvolvidos para realizar estudos e possui uma capacidade computacional avançada para lidar com grandes volumes de dados (GORELICK *et al.*, 2017).

O serviço é baseado em computação em nuvem, que se refere à disponibilidade de aplicativos computacionais fornecidos como serviços por meio de acesso via internet, utilizando *hardware* e *software* hospedados em datacenters remotos (ARMBRUST *et al.*, 2010). A ideia por trás da "computação em nuvem" é que a computação, voltada para a prestação de serviços aos usuários, ocorre quando computadores menos poderosos se conectam à internet e utilizam todas as ferramentas e serviços online disponíveis em datacenters remotos (SANTAELLA, 2012).

O GEE possui diversas aplicações, incluindo detecção de desmatamento, classificação e monitoramento da cobertura da terra, estimativa de biomassa florestal e carbono, e mapeamento de áreas sem estradas em todo o mundo (GOOGLE, 2023).

A ferramenta foi desenvolvida pelo *Google Labs* e lançado durante a Conferência Internacional sobre Mudanças Climáticas em Cancun, no México, realizada de 29 de novembro a 10 de dezembro de 2010. O GEE disponibiliza uma quantidade sem precedentes de dados e informações ambientais, incluindo imagens de satélite e dados atuais e históricos, pela primeira vez de forma *online*. A plataforma permite que os cientistas utilizem a extensa infraestrutura de computação em nuvem da Google para analisar imagens de sensores remotos e outros dados ambientais (GOOGLE, 2023).

O Google demonstrou um protótipo em 2009 e, desde então, a empresa tem desenvolvido a plataforma, oferecendo acesso aos cientistas de todo o mundo para implementar suas próprias aplicações por meio do GEE (GOOGLE, 2023). A plataforma tem recebido crescente reconhecimento na comunidade científica e tem sido amplamente aplicada em diversas áreas, como agricultura (SARAIVA *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020), mudanças no uso e cobertura da terra (KENNEDY *et al.*, 2018) e hidrologia (NGUYEN; PHAM; DANG, 2019; TRAGANOS *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2019).

O GEE abriga um extenso banco de dados que inclui imagens dos principais satélites e sensores existentes, com destaque para a série *LANDSAT*. Essa base de dados do GEE está integrada a diversas fontes, incluindo o United States *Geological Survey* (USGS). O conjunto de dados *LANDSAT* no GEE abrange todos os períodos de operação da constelação *LANDSAT*, desde o primeiro satélite *Landsat 1*, também conhecido como *Earth Resources Technology Satellite 1*, lançado em julho de 1972, até os dias atuais com o *LANDSAT-8*. Esses dados são pré-processados, com

correção geométrica e correção atmosférica aplicadas, e já estão organizados em mosaicos que cobrem toda a superfície terrestre (GOOGLE, 2023).

A abordagem do GEE em relação ao processamento de imagens é diferente dos métodos tradicionais, que envolvem *hardware* e *software* local, assim como o armazenamento dos dados a serem processados. Na plataforma GEE, os usuários acessam um ambiente virtual chamado *Workstation* por meio de uma conexão com a internet. Esse ambiente virtual é hospedado em servidores distribuídos em vários *data centers* localizados em diferentes partes do mundo. A capacidade de processamento desses servidores proporciona níveis de velocidade e armazenamento de dados no processamento de imagens que são inalcançáveis para *desktops* comuns (GOOGLE, 2023).

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E INDÍCES

O sensoriamento remoto é a área que se dedica a obter informações sobre objetos, áreas ou fenômenos por meio da análise de dados adquiridos por instrumentos que não têm contato direto com o objeto em estudo. Ele permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de proximidade física entre o sensor e essa superfície. Essas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. Cada objeto reflete a radiação incidente de forma característica devido às suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, o que é chamado de assinatura espectral (NICÁCIO, 2008).

De acordo com Novo (1992), a capacidade de visualização sinóptica e os aspectos multiespectrais e multitemporais dos sensores orbitais, combinados com o contínuo desenvolvimento de sistemas computacionais para o processamento de imagens, tornaram o sensoriamento remoto uma tecnologia indispensável para a análise e estudo dos fenômenos ambientais na Terra.

O lançamento do primeiro satélite artificial da Terra, o *SPUTNIK I*, em 4 de outubro de 1957, impulsionou o desenvolvimento do sensoriamento remoto orbital. Poucos meses depois, em fevereiro de 1958, os Estados Unidos lançaram o *Explorer 1*. O uso de satélites para monitorar recursos naturais teve início na década de 1970, com o lançamento do satélite ERTS-1, posteriormente chamado de *Landsat*. Desde

então, foram feitos esforços contínuos para aprimorar a tecnologia de sensoriamento remoto, resultando no desenvolvimento e lançamento de vários outros satélites em órbita terrestre (MOREIRA, 2003).

Os satélites podem ser classificados em diferentes categorias, dependendo de seu objetivo principal. Eles podem ser militares, científicos, de telecomunicação e meteorológicos. Os satélites militares foram inicialmente usados na década de 1950 para reconhecimento fotográfico do território inimigo, mas também têm finalidades como telecomunicações, observação, alerta avançado, navegação e reconhecimento. Um exemplo conhecido são os satélites do sistema de posicionamento global (GPS), originalmente desenvolvidos para uso militar, mas amplamente utilizados pela comunidade civil. Os satélites científicos foram projetados para coletar informações da superfície terrestre, oceanos e atmosfera, a fim de facilitar pesquisas científicas (MOREIRA, 2003).

Os satélites de telecomunicação são usados para transmissão de informações telefônicas e televisivas em escala global. Os satélites meteorológicos têm como objetivo obter informações para estudos atmosféricos. O primeiro satélite meteorológico a ser lançado em órbita foi o TIROS-1 (*Orbiting Television and Infrared Observational Satellite*), de origem americana, em abril de 1960. Esses satélites são equipados com radiômetros infravermelhos que permitem a operação mesmo durante a face escura da Terra (MOREIRA, 2003).

Um exemplo de satélite meteorológico amplamente utilizado é o NOAA, que desempenha um papel importante em estudos ambientais. A chegada dos sistemas de satélites abriu novas possibilidades de pesquisa em várias áreas, pois permite a obtenção de dados com boa qualidade espacial e temporal. Os satélites de sensoriamento remoto facilitam levantamentos de variações físicas e químicas da superfície terrestre em áreas extensas e inacessíveis. A composição espectral da energia emitida pelos alvos fornece informações sobre eles. No caso do sensoriamento da superfície terrestre, a energia refletida oferece *insights* sobre as características físicas, químicas ou biológicas de elementos como corpos de água, solo e vegetação (NICÁCIO, 2008).

Existem diversas plataformas orbitais em operação atualmente, incluindo o *Landsat*, EOS (Terra e Aqua), CBERS e NOAA, entre outros. Os sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética em uma determinada faixa do espectro. Um dos sistemas orbitais mais amplamente utilizados

no sensoriamento remoto é o *Landsat*, desenvolvido pela NASA e composto por uma série de sete satélites: *Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8*, lançados a partir de 1972. Um dos avanços significativos do Brasil no campo do sensoriamento remoto foi o programa CBERS (Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres), iniciado em 1998. O CBERS é um projeto conjunto entre o Brasil, por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a China, promovendo um intercâmbio tecnológico entre países em desenvolvimento. Alguns sensores dos satélites Aqua e Terra, como o sensor MODIS, também são amplamente utilizados em pesquisas ambientais (NICÁCIO, 2008).

Segundo a mesma autora as características dos sensores estão relacionadas às suas resoluções espectrais, espaciais ou geométricas, temporais e radiométricas. Essas características podem ser descritas da seguinte maneira:

- Resolução espectral: refere-se ao número de faixas espectrais que um sensor pode registrar, ou seja, quantas partes diferentes do espectro eletromagnético podem ser percebidas e registradas pelo sensor.
- Resolução espacial ou geométrica: está associada à área observada dentro de um ângulo sólido e em um instante de tempo. É determinada pelo campo de visão instantâneo (lfov) do sensor, que é a área no terreno vista pelo sensor em uma determinada altitude e instante de tempo. A resolução espacial também está relacionada ao tamanho do pixel, que é a menor unidade de um produto obtido por um sensor imageador. Quanto menor o tamanho do pixel, melhor o detalhamento da superfície imageada e, portanto, maior a resolução espacial do sensor.
- Resolução temporal: está relacionada ao tempo que o satélite leva para visitar uma mesma área da superfície terrestre. Por exemplo, um sensor com resolução temporal de 16 dias passa pelo mesmo ponto geográfico a cada 16 dias. Alguns sensores, como os das plataformas NOAA e EOS, possuem uma resolução temporal de 1 dia.
- Resolução radiométrica: é determinada pela quantidade de níveis de cinza que o sensor pode utilizar para representar uma cena. Isso depende do sistema de gravação do sensor, sendo que um maior número de *bits* utilizado na gravação resulta em uma maior resolução

radiométrica. A resolução radiométrica pode ser calculada pela expressão 2^n , onde n é o número de bits utilizados na gravação.

Conforme Florenzano (2011), o Sensoriamento Remoto (SR) é uma tecnologia que possibilita a obtenção de imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre por meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo "sensoriamento" refere-se à obtenção desses dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (aeronaves) e orbitais (satélites artificiais), enquanto o termo "remoto" significa que essa obtenção ocorre a distância, sem contato físico entre o sensor e o objeto na superfície terrestre.

Os sistemas de sensoriamento remoto atualmente disponíveis fornecem dados consistentes sobre a superfície da Terra, sendo extremamente úteis em diversas aplicações em áreas diversas. Por exemplo, na arquitetura, auxiliam no planejamento urbano; na agronomia, permitem avaliar solos e condições das culturas; na cartografia, auxiliam no mapeamento topográfico e temático; no campo hidrológico, ajudam na avaliação de áreas afetadas por eventos extremos, como enchentes, secas, inundações e enxurradas, além de identificar setores de consumo de água por tipo de uso para estudos de demanda, entre muitas outras aplicações (NOVO, 2010).

Segundo Liu (2015), das aplicações mencionadas o sensoriamento remoto também pode ser usado para avaliar a seca e a aridez, bem como analisar a evolução de processos ambientais influenciados pela ação humana, como a desertificação, que tem sido frequentemente estudada por meio do uso de índices de vegetação. Os cientistas desenvolveram índices de vegetação para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais da vegetação utilizando dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética.

Essa interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação é possível devido à presença de pigmentos fotossintéticos nas plantas (clorofila, xantofila e caroteno), que absorvem significativamente a radiação na faixa visível (0,4 a 0,7 μm) e refletem na faixa do infravermelho próximo (0,7 a 1,1 μm) (PONZONI, SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Bannari *et al.* (1995) descreveram que mais de quarenta tipos de índices de vegetação foram desenvolvidos nos últimos 20 anos para explorar as aplicações das reflectâncias espectrais no monitoramento da vegetação. Os primeiros índices foram baseados em imagens dos satélites *Landsat*. Entre os diversos índices de vegetação

existentes, os mais utilizados na comunidade científica são o Índice de Vegetação pela Razão (RVI), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Condição de Vegetação (VCI), devido à pouca informação necessária para sua análise.

Atualmente, com os avanços tecnológicos, a disponibilidade de imagens de satélite de forma gratuita e o aumento da precisão dos softwares utilizados na análise de sensoriamento remoto, os índices de vegetação se tornaram não apenas ferramentas essenciais de monitoramento, mas também indicadores das condições ambientais para tomada de decisões (BANNARI *et al.*, 1995).

De acordo com Tavazohi e Ahmadi (2018), compreender os estratos da vegetação é de extrema importância para a realização de monitoramento de períodos de seca, e pode fornecer suporte no planejamento, acompanhamento, previsões e assistência em áreas que são mais severamente afetadas.

Essa compreensão serve como indicativo para estimar informações relacionadas à precipitação, umidade do solo e disponibilidade de água em uma região específica. Essas características têm destacado a utilidade do NDDI no monitoramento de áreas que são mais suscetíveis a períodos de seca (LEE *et al.*, 2016).

O Índice de Queimada Normalizada (NBR) é um indicador espectral desenvolvido para detectar áreas queimadas e avaliar a severidade dos incêndios, sendo o primeiro índice a utilizar a faixa do infravermelho médio (KEY; BENSON, 1999). É importante destacar que essa região do espectro é altamente absorvida pela água presente no solo ou na vegetação, portanto, quando ocorre um incêndio e há redução da umidade, a reflectância aumenta, resultando em valores mais baixos de NBR (CHUVIECO, 1999).

De acordo com Key e Benson (2006)⁴ *apud* Castillo, Saavedra e Brull (2019), o NBR é um índice que enfatiza a resposta espectral da vegetação afetada pelo fogo,

⁴ KEY, CH; BENSON, NC. **Landscape Assessment:** Ground measure of severity, the Composite Burn Index, and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D.C. Lutes, RE Keane, JF Caratti, CH Key, NC Benson, S. Sutherland e LJ Gangi. 2006. FIREMON: Fire Effects Monitoring and

utilizando bandas do *Landsat* TM/ETM (infravermelho próximo e infravermelho médio), a fim de proporcionar o melhor contraste entre a vegetação saudável e a vegetação queimada.

Após um incêndio, a área queimada apresenta um comportamento espectral da vegetação alterado devido à perda de biomassa, ao aumento da temperatura, às mudanças na transpiração e à presença de resíduos queimados. Essas modificações podem ser analisadas nas faixas espectrais do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Utilizando essas faixas espectrais, o cálculo do índice NBR é realizado para quantificar a severidade do fogo antes e depois do incêndio, conforme a equação:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Sendo:

NIR: infravermelho próximo;

SWIR: infravermelho de ondas curtas.

O índice NBR revela que quanto mais semelhantes forem as assinaturas espectrais, menor será a severidade do fogo. Por outro lado, se houver grandes diferenças nas assinaturas espectrais, isso indica uma maior destruição das plantas e, conseqüentemente, maior severidade do incêndio durante as análises. À medida que a área queimada se recupera, os níveis de reflectância na banda do infravermelho próximo (NIR) aumentam, enquanto a absorção no infravermelho de ondas curtas (SWIR) também aumenta (CASTILLO *et al.*, 2019).

2.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração, também conhecida como ET, desempenha um papel vital no ciclo hidrológico, sendo um fenômeno essencial para a existência da vida no

planeta. Ela é responsável por transferir uma grande quantidade de água dos continentes para a atmosfera, além de desempenhar um papel crucial na liberação de calor latente, conforme indicado por Bastiaanssen *et al.* (1998). O valor integrado ao longo do tempo do calor latente é importante em várias áreas de estudo, como hidrologia, agronomia, modelagem atmosférica, entre outras aplicações.

A ET pode ser definida como a perda de água para a atmosfera proveniente de diferentes fontes, como solo, lagoas, lagos e superfícies vegetativas. Essa perda ocorre devido à vaporização da água líquida, conforme mencionado por Kilic *et al.* (2011). É definida pela soma da evaporação e transpiração, que são processos distintos. Por um lado, a água é perdida da superfície do solo por evaporação, e por outro lado, a água é perdida pelas plantas através da transpiração. De acordo com Allen *et al.* (2011), a ET varia consideravelmente no espaço, devido à diversidade vegetal e à disponibilidade de água, e varia temporalmente devido ao clima e às influências meteorológicas.

De acordo com Bernardo, Soares e Mantovani *et al.* (2005), a evapotranspiração pode ser expressa de várias formas, como valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, durante um determinado período. Esse processo é principalmente influenciado pela quantidade de energia solar que incide na superfície do solo, uma vez que envolve gasto de energia.

Os fatores que afetam a evaporação e transpiração são representados por parâmetros meteorológicos, características da cultura, práticas de manejo e condições ambientais. Segundo o relatório FAO 56⁵ a evapotranspiração de referência é principalmente influenciada pelos parâmetros meteorológicos, que incluem radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento. Com base nesses parâmetros, a evapotranspiração de referência da cultura (ET_o) é determinada como a capacidade evaporativa da atmosfera, representando assim a evapotranspiração de uma superfície vegetada padrão (ALLEN, 2000). Embora haja o uso de outras denominações na literatura, como evapotranspiração potencial, o boletim FAO 56 (ALLEN, 2000) desencoraja esse termo devido à sua ambiguidade nas definições.

⁵ ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements.** Irrigation and Drainage Paper nº. 56, FAO, Rome, Italy.

De acordo com Pereira, Nova e Sedyama (1997), a quantidade de água evaporada e transpirada está principalmente relacionada ao suprimento de água das plantas, ao potencial evaporativo do ar e à disponibilidade de energia, sendo que este último fator é o mais influente. Assim, a quantidade de água consumida por uma cultura varia de acordo com a área coberta pelas plantas, a demanda atmosférica e as estações do ano. Nesse contexto, a quantidade de água efetivamente evaporada e transpirada por uma vegetação, considerando as condições reais de demanda atmosférica, umidade do solo e características da cultura, é conhecida como evapotranspiração real.

2.4.1 Estimativa da evapotranspiração

A estimativa das perdas causadas pela evapotranspiração é essencial para o gerenciamento de reservatórios, o planejamento e a concessão de uso de recursos hídricos, bem como para os projetos de irrigação mencionados anteriormente. A evapotranspiração tem um papel importante na quantificação do equilíbrio hídrico na bacia hidrográfica (BEZERRA, 2013; BORGES; MENDIONDO, 2007).

De acordo com Xu e Singh (2001), existem cinco grupos de métodos para estimar a evapotranspiração:

- Balanço hídrico;
- Transferência de massa;
- Métodos combinados;
- Radiação;
- Temperatura.

Bezerra (2013), considera dois principais grupos para a estimativa da evapotranspiração real: métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem medidas *in situ* realizadas com lisímetros (determinação da massa e/ou drenagem), o método do balanço hídrico e o controle da umidade do solo. Quanto aos métodos indiretos, eles se baseiam em estimativas que utilizam dados meteorológicos avaliados por meio de fórmulas empíricas, como balanço de energia, razão de Bowen e método das correlações turbulentas, sendo que as medições podem ser realizadas com precisão (SANTOS, 2009).

Segundo Allen, Tasumi e Trezza (2002), embora esses métodos sejam altamente confiáveis e capazes de gerar medidas com boa precisão, eles apresentam limitações quando se trata de estimar a evapotranspiração em grandes áreas. As estimativas feitas com esses métodos são baseadas em dados pontuais de um local específico e, em seguida, são extrapoladas para áreas que envolvem esse local, considerando uma taxa de evapotranspiração uniforme para a área analisada.

Para Bezerra (2013), outro fator complicador é a possibilidade de variação na cobertura de culturas, suas alturas, estágios fenológicos e necessidades hídricas em uma determinada área, o que afeta a evapotranspiração. Portanto, não é aconselhável considerar a evapotranspiração como uniforme em escalas regionais.

A evapotranspiração varia espacial e temporalmente devido a fatores como precipitação, características hidráulicas do solo, tipo de vegetação e suas densidades, bem como a variabilidade climática (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2002).

A medição da evapotranspiração real geralmente envolve custos elevados, pois requer medições *in situ*, demanda tempo e o uso de equipamentos dispendiosos. Isso explica a falta dessas medidas e justifica o uso do sensoriamento remoto como uma metodologia promissora para obter valores de evapotranspiração real e permitir sua espacialização em escala regional (BEZERRA, 2013).

Uma das limitações dos métodos convencionais de determinação da evapotranspiração é a sua aplicação em grandes áreas, pois eles dependem de dados medidos em locais específicos e extrapolados para a área em questão, levando em consideração a uniformidade da evapotranspiração nessa área específica (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2002). No entanto, raramente é encontrada uma homogeneidade, sendo mais comum a existência de diferentes culturas em uma mesma região, com alturas, fases fenológicas e demandas hídricas distintas, todos esses fatores influenciando a evapotranspiração.

Além disso, Bezerra (2013) destaca que as medições diretas da evapotranspiração geralmente são custosas, exigindo equipamentos dispendiosos e demandando tempo para serem realizadas *in loco*, o que justifica, em alguns casos, a ausência dessas medidas. Portanto, o uso de imagens de satélite se apresenta como uma alternativa viável para a obtenção dessas medições. Essa abordagem mostra-se promissora devido às vantagens de obter informações sobre a evapotranspiração real e a possibilidade de mapeá-la em uma escala regional. Essa afirmação está em concordância com Allen, Tasumi e Trezza (2002), que ressaltam o potencial do

sensoriamento remoto no aprimoramento do manejo da irrigação, juntamente com outras formas de gestão da água, fornecendo estimativas de evapotranspiração para grandes áreas com o mínimo de dados de campo.

No entanto, o uso de imagens de satélite para estimar a evapotranspiração não invalida a utilidade de outros métodos, como os micrometeorológicos e os lisímetros, que são empregados em pesquisas e no ajuste de modelos. Enquanto esses métodos são mais adequados para fins científicos, as imagens de satélite podem ser utilizadas de forma operacional (SANTOS, 2009).

Ao longo das últimas décadas, diversos algoritmos foram desenvolvidos utilizando o sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração, tanto em escalas regionais quanto locais. Alguns exemplos notáveis incluem o *Surface Energy Balance System* (SEBS) (SU, 2002), o *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK *et al.*, 2000), o *Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (ALLEN *et al.*, 2007), o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) (TEIXEIRA; BASTIAANSSEN; MOURA, 2008) e o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998).

2.5 TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE (LST)

A temperatura de superfície terrestre (*Land Surface Temperature* - LST) desempenha um papel essencial nos processos físicos que ocorrem na superfície da Terra, pois é o resultado das interações entre a atmosfera e a superfície, através dos fluxos de energia (WAN; LI, 1997).

De acordo com Leite (2011), a obtenção da LST por meio de sensoriamento remoto baseia-se no equilíbrio de radiação entre ondas curtas e longas na região do infravermelho. Novo (2010) enfatiza que o infravermelho termal é a faixa espectral utilizada para estudar a temperatura da superfície terrestre

Nesse sentido, o intervalo espectral de 8,0 a 14,0 μm é aquele que permite a maior transmissão da energia emitida pela Terra, alcançando o sensor na região do infravermelho termal do espectro eletromagnético (STEINKE; STEINKE; SAITO, 2010).

Entre as variáveis meteorológicas que podem ser analisadas para caracterizar uma determinada região, a temperatura de superfície destaca-se, pois ela estima o fluxo de energia proveniente da superfície terrestre (PADOVANNI, 2017).

Pires (2015), ressalta que a LST é uma variável crucial a ser considerada em estudos sobre alterações meteorológicas, pois evidencia os processos de interdependência entre o solo e a atmosfera, afetando os climas locais. Warren *et al.* (2012) ratificam essa afirmação, expondo que a LST é a variável principal para realizar estudos ambientais relacionados às mudanças climáticas.

Dentre os produtos do MODIS, destaca-se o MOD11, que fornece a LST e a emissividade diárias da superfície terrestre, sendo variáveis fundamentais para descrever os processos da superfície. Esses produtos são amplamente requisitados em estudos meteorológicos, hidrológicos, ecológicos e biológicos (RUNNING *et al.*, 1994; LATORRE; SHIMABUKO; ANDERSON, 2007).

Segundo Latorre *et al.* (2003), a temperatura de superfície utiliza os dados dos níveis 2 e 3 com o algoritmo *Land Surface Temperature* (LST) e a emissividade recuperada dos dados do AQUA/MODIS. O algoritmo LST é empregado para recompor *pixels* com emissividades conhecidas nas bandas 31 e 32, apresentando os dados já georreferenciados e corrigidos para os efeitos atmosféricos (RUDORFF; CEBALLOS, 2007).

Araújo *et al.* (2018), avaliaram as alterações nos parâmetros biofísicos (NDVI, LST e albedo) no Nordeste brasileiro utilizando dados do MODIS no período de 2002 a 2011. Eles observaram que, durante o período analisado, a LST apresentou valores acima de 28 °C, sendo que as regiões predominantes de cerrado e caatinga registraram valores superiores a 30 °C. Os autores identificaram também uma correlação direta entre o aumento da LST e valores de precipitação abaixo de 1500 mm anuais.

Santos (2018), realizou uma análise sobre a umidade do solo, o balanço meteorológico e a dinâmica da vegetação em uma região semiárida, utilizando produtos do MODIS, como LST e NDVI. O autor constatou diferenças nos valores de umidade em função da cobertura vegetal, juntamente com uma queda acentuada nos valores de precipitação na área de estudo. Isso foi acompanhado por um aumento da temperatura e do índice de aridez, resultando na redução da umidade do solo e no aumento da evapotranspiração, o que culminou em um déficit hídrico na região.

A aplicação do sensoriamento remoto orbital no estudo do clima urbano teve início com os primeiros lançamentos de sistemas orbitais. Inicialmente, havia uma maior preocupação com as mudanças de temperatura em ambientes urbanos. No entanto, atualmente, predominam os estudos sobre a caracterização das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) e a identificação dos fatores que afetam sua formação, visando mitigá-los, especialmente para fins de planejamento urbano (STEWART, 2011).

Com os avanços tecnológicos constantes, como o desenvolvimento de novos sensores em plataformas orbitais, que oferecem resoluções espectrais, espaciais, temporais e radiométricas cada vez mais refinadas, os procedimentos para detecção da Temperatura da Superfície Terrestre (LST) têm melhorado. Isso tem contribuído para o aumento do número de estudos publicados sobre o tema, facilitando as estratégias de desenvolvimento e gerenciamento do território. Essas tecnologias permitem analisar as mudanças no ambiente natural decorrentes da urbanização em diferentes escalas espaciais e temporais (NETZBAND; JÜRGENS, 2010).

Segundo Voogt e Oke (2003), nas últimas décadas foram conduzidos estudos sobre a relação entre as variáveis de Uso e Cobertura da Terra (LULC) e a Temperatura da Superfície Terrestre (LST) em grandes cidades, como Tóquio, Bangkok e Hanoi. Esses estudos utilizaram diferentes fontes de dados, como imagens de sensores TIRS, NOAA-AVHRR e MODIS. No entanto, muitos desses estudos foram realizados em períodos curtos e em condições específicas das áreas de estudo. É importante ressaltar que a relação entre LST, NDVI e LULC varia ao longo do tempo e de acordo com o uso e cobertura da terra em uma região metropolitana em comparação com um centro urbano de médio porte.

Conforme os mesmos autores, o aumento na resolução temporal e espacial dos sensores orbitais desenvolvidos nas últimas décadas abriu novas oportunidades para o estudo da LST. Por exemplo, a plataforma *Landsat*, com seus sensores TM, ETM+ e OLI/TIRS, oferece uma ampla gama de dados de média resolução espacial, que são utilizados para quantificar a paisagem urbana nas ciências exatas e sociais. Embora a média resolução espacial dessas imagens possa apresentar desafios devido à heterogeneidade das superfícies urbanas, suas características multiespectrais são favoráveis, pois fornecem dados tanto nas bandas de espectro refletido (para obtenção de informações sobre LULC) quanto nas bandas térmicas (para características térmicas da superfície), capturadas no mesmo instante.

A série histórica de imagens dos últimos trinta anos do programa *Landsat*, incluindo as missões *Landsat 5 (Sensor Thematic Mapper: TM)*, *Landsat 7 (Sensor Enhanced Thematic Mapper: ETM+)* e *Landsat 8 (Sensores Operational Land Imager: OLI e Thermal Infrared Sensor: TIRS)*, oferece um acervo significativo de dados para estudos (VOOGT; OKE, 2003).

2.6 SALDO DE RADIAÇÃO

A redistribuição da umidade e do calor na superfície terrestre depende dos processos de fluxos radiativos, que desempenham um papel fundamental na interação entre o solo e a atmosfera. As trocas de radiação, calor e umidade afetam o desenvolvimento da biosfera e as condições físicas para a vida na Terra. O equilíbrio termodinâmico entre os processos de transporte turbulento na atmosfera e no subsolo é evidente no balanço de energia da superfície (BASTIAANSEN *et al.*, 1998).

O saldo de radiação (R_n) representa a diferença entre os fluxos de radiação refletida, incidente e/ou emitida, incluindo radiações de ondas longas e curtas, na superfície terrestre. Essa é a principal fonte de energia utilizada pelos processos meteorológicos, físicos, químicos e biológicos na superfície e nas camadas inferiores da atmosfera (BEZERRA, 2013). O saldo de radiação é um elemento-chave na estimativa do balanço de energia e é aplicado em diversas áreas, como monitoramento climático, previsão climatológica e meteorologia agrícola (BISHT *et al.*, 2005).

De acordo com a lei de conservação de energia, os ganhos e perdas de energia em uma superfície estão em equilíbrio. A quantidade de energia disponível na superfície pode ser quantificada por meio das equações do balanço de radiação e do balanço de energia (SANTOS, 2009):

$$R_n = (R_s - R_r) + (L \downarrow + L \uparrow)$$

Onde:

R_n : saldo de radiação;

R_s : radiação de onda curta incidente;

R_r : radiação de onda curta refletida;

$L \downarrow$: radiação de onda longa recebida pelo sol;

$L \uparrow$: radiação de onda longa emitida pela superfície para o espaço, todas expressas em $W.m^{-2}$.

$$Rn = H + LE + G$$

Onde:

Rn : saldo de radiação;

H : fluxo de calor sensível $W.m^{-2}$;

LE : fluxo de calor latente de evaporação $W.m^{-2}$

G : fluxo de calor no solo $W.m^{-2}$

Rn é considerado positivo quando a radiação é direcionada para a superfície, enquanto G , H e LE são considerados positivos quando são direcionados para fora da superfície. No entanto, a equação não leva em consideração a energia necessária para a fotossíntese e o armazenamento de calor na vegetação (BASTIAANSEN *et al.*, 1998).

De acordo com a convenção adotada por Kjaersgaard e Plauborg (2008), geralmente, os valores de H , LE e G são positivos, o que significa que consomem energia durante o período diurno. Em circunstâncias específicas, como em campos irrigados, H e G podem assumir valores negativos (fontes de energia), enquanto LE , devido ao resfriamento evaporativo da superfície, pode exceder o saldo de radiação na superfície. Esses autores afirmam que os componentes do balanço de energia variam em magnitude, dependendo de fatores como o tipo de superfície e suas características, incluindo umidade do solo, textura, vegetação, além da estação do ano, localização geográfica, clima e horário do dia.

Conforme os mesmos autores, para superfícies vegetadas, a evapotranspiração, impulsionada pelo fluxo de calor latente (LE), normalmente é o processo que mais consome energia, podendo alcançar o consumo total de Rn . Durante a noite, os termos do balanço são geralmente negativos (fontes de energia). As magnitudes dos fluxos de calor sensível e latente são muito menores em comparação com o período diurno, enquanto os valores de G não diferem ao longo do dia e da noite, embora ocorra uma inversão no fluxo.

Conforme Santos (2009), o método do balanço de energia pode ser obtido a partir do fluxo vertical de calor latente usando imagens orbitais. Consequentemente, a evapotranspiração pode ser determinada, pela diferença entre os fluxos verticais de

calor no solo, calor sensível e saldo de radiação. Esse método é utilizado pelos principais algoritmos que usam dados de imagens de satélite, como o SEBAL apresentado por Bastiaanssen *et al.* (1998).

O sensoriamento remoto fornece uma cobertura espaço-temporal de atributos da superfície terrestre que é incomparável com outros métodos. Nesse sentido, vários estudos têm tentado estimar o saldo de radiação (ou seus componentes) combinando observações do sensoriamento remoto com dados da superfície e da atmosfera (BISHT *et al.*, 2005).

2.7 MONITORAMENTO DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

Existem várias ferramentas disponíveis para detectar e distinguir diferentes formas de uso do espaço, bem como mudanças ocorridas nele, fornecendo informações valiosas. Atualmente, o geoprocessamento permite a análise do território observado, utilizando imagens de satélite para obter uma visão geral em várias épocas de grandes áreas da superfície terrestre (TORRES *et al.*, 2017).

A utilização de tecnologias geoespaciais desempenha um papel fundamental na gestão de territórios, permitindo obter informações atualizadas de forma rápida. No contexto da prevenção e combate a incêndios, o sensoriamento remoto possibilita análises espaciais e temporais que facilitam a realização de estudos sobre os impactos ambientais futuros, auxiliando na elaboração de mecanismos para desacelerar o desmatamento e implementar ações preventivas (RESENDE BORGES *et al.*, 2021).

Diante dessa perspectiva, a preocupação com os incêndios florestais tem assumido proporções significativas, sendo feitos diversos esforços para minimizar os efeitos negativos que o fogo descontrolado causa na paisagem e na fauna. O uso do zoneamento de riscos de incêndios florestais é uma ferramenta de planejamento que delimita áreas categorizadas, levando em consideração um mapeamento criterioso dos recursos destinados à prevenção (MARQUES; SABÓIA; DA SILVA, 2019).

Os índices de vegetação têm sido amplamente utilizados para monitorar mudanças na vegetação em diferentes escalas. Esses índices aprimoram a sensibilidade em regiões com maior densidade de biomassa, pois incorporam a banda azul para correção atmosférica da banda vermelha, reduzindo as influências atmosféricas causadas por aerossóis (LIMA, 2017).

Portanto, é importante realizar estudos que identifiquem áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios. Por meio do zoneamento de riscos, estratégias podem ser criadas para combater incêndios e preservar o ecossistema local, adotando medidas que busquem eliminar as causas dos incêndios e reduzir os riscos de propagação do fogo (AXIMOFF *et al.*, 2020).

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é capaz de mostrar diferentes tipos de informações em um mapa, como dados demográficos e informações sobre a paisagem. Ele permite que os usuários comparem a localização de diferentes dados para descobrir relações e padrões. O significado do SIG varia dependendo do contexto em que é aplicado, podendo ser desde um repositório de mapas até uma ferramenta de apoio à tomada de decisões espaciais. O recurso é amplamente utilizado na gestão de parques naturais, pois permite o armazenamento e processamento eficiente de informações geográficas, possibilitando uma tomada de decisão mais efetiva (LONGLEY *et al.*, 2013).

O uso do SIG no estudo de eventos ambientais, como incêndios florestais, é indispensável devido à sua capacidade de manusear, interagir e atualizar grandes quantidades de dados de forma rápida e precisa. Ele permite uma análise detalhada de situações ambientais e a individualização de cada espaço com base em suas características e fenômenos relacionados. Isso agrega valor aos dados espaciais, criando informações úteis para a elaboração de estratégias de conservação e preservação ambiental, sendo considerado uma forma de sistema de apoio à tomada de decisão espacial (SILVA; ZAIDAN, 2004; HEYWOOD; CORNELIUS; CARVER, 1998).

O sensoriamento remoto desempenha um papel importante na obtenção de informações sobre o uso e cobertura da terra. Ele permite a interpretação e classificação de imagens de satélite, fornecendo dados abrangentes sobre a distribuição espacial e as mudanças na cobertura do solo. Isso é particularmente relevante na identificação de áreas queimadas. As abordagens de Sensoriamento Remoto para detecção de mudanças na superfície têm sido amplamente utilizadas devido à sua relação custo-benefício, extensibilidade e frequência temporal (BUTT *et al.*, 2015; JENSEN; IM, 2007).

2.7.1 Focos de calor

O INPE vem melhorando o sistema de detecção de queimadas desde 1980. O sistema baseia-se em informações de sensores de satélites polares e geoestacionários. O produto gerado é obtido quando a área mínima de 900 m² atinge a temperatura de 47 °C. Assim devido a sua metodologia alguns autores afirmam que possam ocorrer erros de detecção (GONTIJO *et al.*, 2011).

Conforme mencionado por Tomzhinski, Coura e Fernandes (2011), a detecção de incêndios através da comparação com focos de calor tem se mostrado uma ferramenta amplamente utilizada nos esforços de prevenção de incêndios atualmente. A expressão "focos de calor" refere-se à interpretação do registro de calor captado na superfície do solo por meio de sensores espaciais. O sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) é capaz de captar e registrar temperaturas acima de 47 °C, interpretando-as como focos de calor. Os dados obtidos durante as passagens noturnas do satélite NOAA e dos satélites TERRA e AQUA (por meio do sensor MODIS). Utilizando um sistema de informações geográficas, imagens de satélite e diversas bases de dados detalhadas sobre o território nacional, a equipe de monitoramento é capaz de identificar áreas de risco de ocorrência de incêndios. Os focos de calor detectados nessas áreas são inseridos em um sistema de alerta, classificados de acordo com sua persistência, localização e nível de risco que representam (SFB, 2015).

Conforme o IBAMA (2007), os focos de calor são monitorados em diferentes categorias de unidades de conservação, incluindo estações ecológicas, parques nacionais, reservas biológicas (unidades de conservação de proteção integral) e florestas nacionais (unidades de conservação de uso sustentável). O setor de monitoramento de queimadas acompanha tanto o interior quanto a zona de amortecimento de todas as unidades de conservação federais pertencentes a essas categorias. Como parte dos esforços para monitorar e minimizar o fenômeno das queimadas, o INPE tem desenvolvido e aprimorado desde os anos 80 esse sistema operacional de detecção de queimadas.

A partir de 1998, o trabalho passou a ser realizado em colaboração com o IBAMA/PROARCO, com ênfase especial na região amazônica. Os dados são obtidos por meio das imagens termais dos satélites meteorológicos NOAA, quatro vezes ao dia, GOES, oito vezes ao dia, e TERRA e AQUA, duas vezes ao dia. Esses dados são posteriormente integrados a dois sistemas geográficos de informações (Spring Web-Queimadas e Terra Lib-Queimadas), que podem ser acessados pela *internet*. As

informações são disponibilizadas de forma operacional aos usuários aproximadamente 20 minutos após as passagens dos satélites (DE SOUZA *et al.*, 2004).

2.7.1.1 Mapa de calor (Kernel)

A concepção de criar mapas para relacionar diferentes conjuntos de dados teve origem por volta de 1854, quando o médico obstetra John Snow estabeleceu uma correlação entre casos de cólera e a localização de poços e fontes de água que forneciam os moradores de Soho, em Londres (SCHOLTEN; LEPPER, 1991).

Conforme apontado por Letti (2012), o zoneamento é uma ferramenta de planejamento que delimita áreas categorizadas, permitindo mapear o espaço desejado e identificar regiões com maior propensão a eventos específicos, levando em consideração variáveis relacionadas à ocorrência de incêndios.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2008), o zoneamento é uma abordagem eficaz para identificar locais com maior probabilidade de focos ativos de calor, auxiliando no desenvolvimento de planos de prevenção e combate. Aguiar *et al.* (2015), também destacam que o uso do zoneamento de risco de incêndios permite tomadas de decisão mais rápidas, resultando em menor área devastada, redução de perda de fauna e flora local, bem como menores custos operacionais de combate.

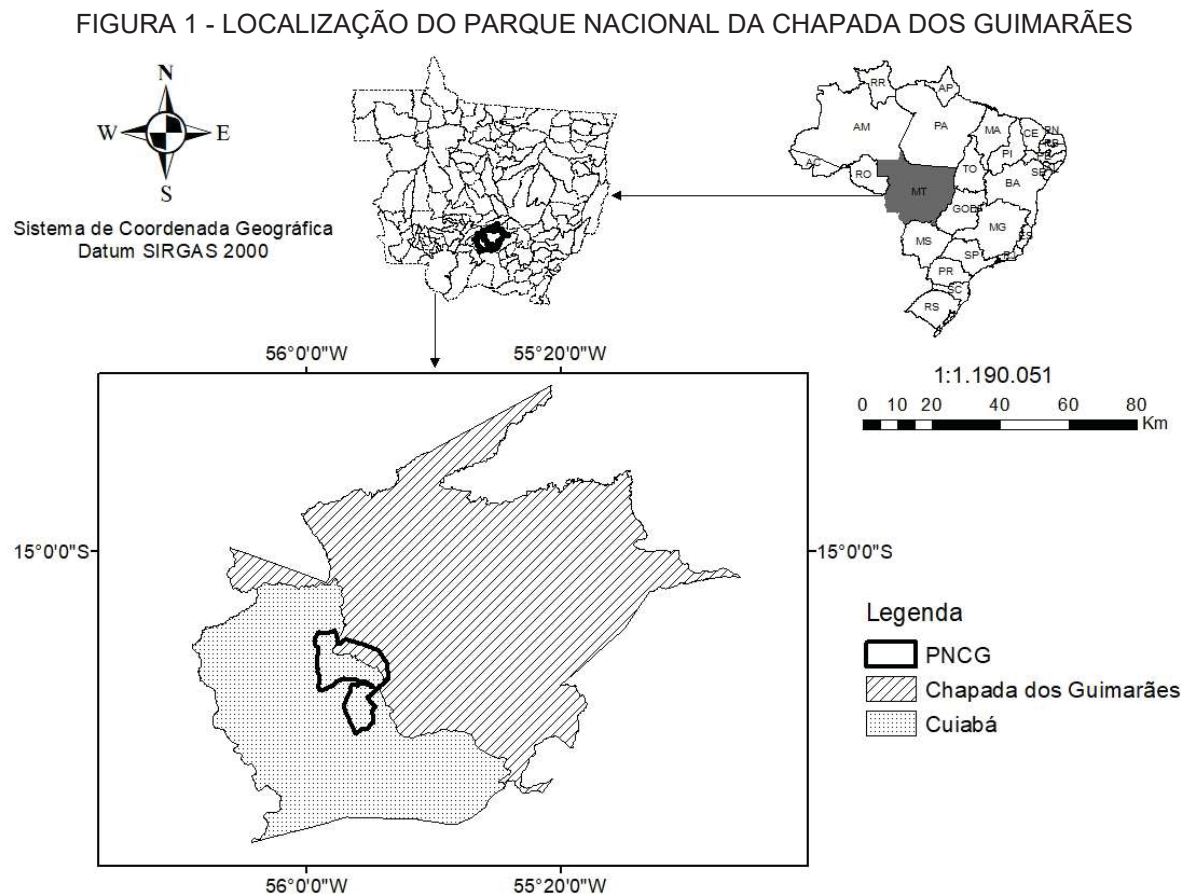
A utilização de mapas de calor Kernel tem sido difundida em estudos sobre incêndios florestais, como mencionado por Marques e Sobrinho (2020), De Souza Neto *et al.* (2021) e Das Neves *et al.* (2021). Além disso, desde 1980, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem desenvolvido um sistema de detecção de queimadas com base em imagens de sensores embarcados em satélites polares e geoestacionários (MARQUES; SOBRINHO, 2020).

Os mapas de calor Kernel são métodos estatísticos utilizados para estimar curvas de densidade, utilizando pontos amostrados. Nesse método, cada ponto é ponderado pela distância em relação a um ponto central, conhecido como núcleo (BOSSLE, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Esta pesquisa foi desenvolvida no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (PNCG), localizado no estado do Mato Grosso entre os municípios de Cuiabá e Chapada dos Guimarães, Figura 1 (BRASIL, 1982).



FONTE: O autor (2023).

A área do parque está inserida 61,2% no município de Cuiabá e 38,8% no município de Chapada dos Guimarães. O PNCG foi criado a partir do decreto nº 97656, de 12 de abril de 1989, e possui uma área de 32630 ha ou 326,30 km² (IBAMA, 2002).

3.2 ACESSOS

O acesso principal ao PNCG é realizado principalmente por via rodoviária através da MT-251, rodovia majoritariamente asfaltada e de pista simples que liga o município de Cuiabá ao município de Chapada dos Guimarães. A sede administrativa do parque tem sua entrada principal no mesmo local da cachoeira Véu de Noiva, que também dá acesso ao circuito de cachoeiras, Casa de Pedra e Morro de São Jerônimo, situada no km 50 da rodovia MT-251 (ICMBIO, 2009).

As rotas fluviais são inexistentes, apesar da região denominada baixada cuiabana, onde está inserido o PNCG, tem sido importante em termos de navegação fluvial nos séculos XIX e XX. Na região do parque existe um elevado número de nascentes e seus rios com relevos acidentados impedem a navegação mesmo com embarcações de pequeno porte (ICMBIO, 2009).

O acesso aéreo é realizado principalmente através do Aeroporto Marechal Rondon, localizado no município de Várzea Grande, que fica ao lado do município de Cuiabá. Os principais voos são de São Paulo para Cuiabá, Rio de Janeiro para Cuiabá e Brasília para Cuiabá (ICMBIO, 2009).

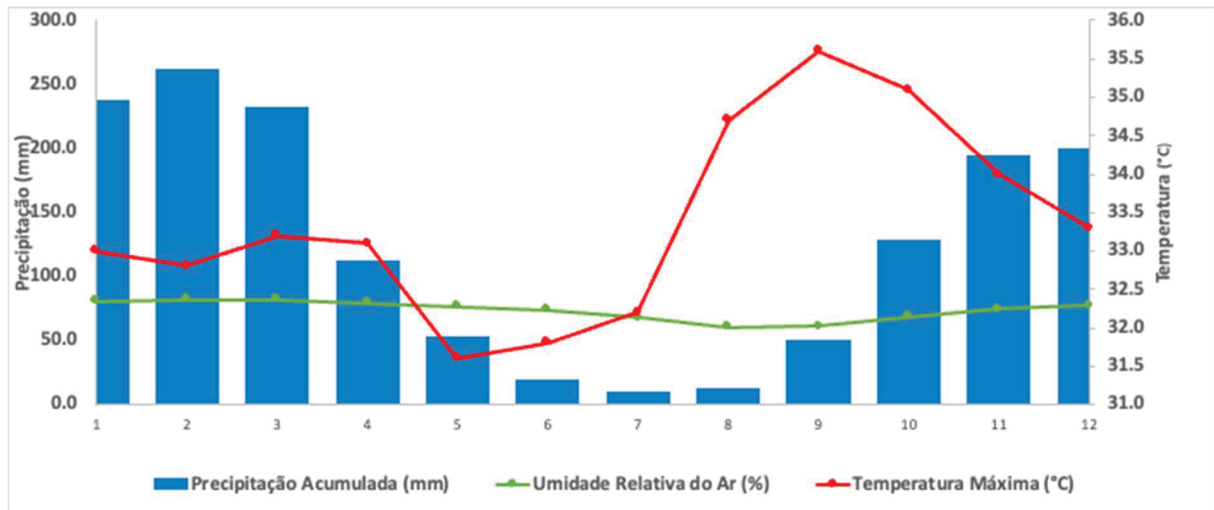
3.3 CLIMA

O clima do local é de transição devido as diferenças de altitude nas regiões da depressão Cuiabana e do Planalto (IBAMA, 1995). Pela classificação de Köppen o parque está inserido no Clima Tropical de Savana (Aw) (ICMBIO, 2009). Na classificação de Thornthwaite (1948), o parque está entre as classes climáticas B1wB'4a', C2wA'a' e C2wB'4a'.

As principais características das depressões cuiabanas e do Paraguai são as temperaturas elevadas, grandes perdas superficiais pela evapotranspiração e excedente hídrico de médio a reduzido (IPEM, 2002).

As normais climatológicas de 1991 a 2020 de precipitação, temperatura máxima e umidade relativa estão apresentada na Figuras 2, com média anual de temperatura máxima e umidade relativa do ar de 33,4 °C e 73,7% respectivamente e precipitação total média anual de 1516,1 mm.

FIGURA 2 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS (1991-2020) DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CUIABÁ - MT



FONTE: INMET (2023).

3.4 TOPOGRAFIA

O PNCG apresenta dois tipos topográficos distintos: as chapadas, que são terrenos mais altos e a depressão cuiabana, que são terrenos mais rebaixados. A ligação entre os dois tipos é realizada pelas escarpas com desnível de 180 m aproximadamente (BORDEST, 2007).

A topografia da depressão cuiabana é constituída de áreas rebaixadas com altitudes que variam de 150 a 450 m. Essas áreas caracterizam-se por apresentarem relevos de colinas pequenas, médias e amplas, com morros e morrotes de topos estreitos e convexos, contornando um conjunto de cristas e escarpas do Planalto dos Guimarães (ICMBIO, 2009).

A Chapada dos Guimarães compreende uma área de relevo plano, de colinas e morros de topos planos, alongados e convexos com altitude que variam de 600 a 800 m. Esse tipo de relevo caracteriza-se por topografia escarpada e com vertentes abruptas mantidas por arenitos (SEPLAG, 2018).

3.5 COBERTURA VEGETAL

O PNCG está inserido no bioma Cerrado e devido suas diversidades de topografia e solos, apresenta uma diversidade de fitofisionomias com características de diversos tipos de formações que estão apresentados no Quadro 1 (ICMBIO, 2009).

QUADRO 1 - FORMAÇÕES FLORESTAIS DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES

| PNCG | |
|--------------------------|---|
| Fitofisionomia | Características |
| Mata seca semidecídua | Ocorre em áreas de cabeceira de rios; Árvores do bioma amazônico como guanandi - <i>Calophyllum brasiliense</i> , copaíba-vermelha - <i>Copaifera langsdorffii</i> e jatobá - <i>Hymenaea</i> sp., buriti - <i>Mauritia flexuosa</i> e o babaçu - <i>Attalea speciosa</i> . |
| Mata ciliar | Ocorre em canais de drenagem com topografia de vales; Áreas de nascentes com ocorrência da espécie buriti - <i>Mauritia flexuosa</i> formando os “buritizais”. |
| Mata de galeria | Ocorre ao longo dos pequenos rios, formando um corredor fechado com as copas das árvores por cima do curso d’água, formando “galerias”; Presença de epífitas, principalmente da Família Orchidaceae em quantidade superior às demais fitofisionomias do cerrado. |
| Cerradão | Pode ser chamado de Savana Arbórea Densa ou Savana Florestada; Árvores com até 12 m de altura, caules tortuosos e ramificação irregular; Estratos inferiores contendo árvores com altura abaixo de 6 m de altura e arbustos de 2 a 3 m. Estrato herbáceo contendo gramíneas, bromélias, aráceas e plântulas de espécies lenhosas. |
| Cerrado sentido restrito | Combinação de indivíduos arbustivos e arbóreos com média de 5 m de altura; Presença de espécies do cerrado <i>stricto sensu</i> como faveiro - <i>Pterodon</i> sp., abiu-cariola - <i>Pouteria ramiflora</i> e pequiheiro - <i>Caryocar brasiliense</i> . |
| Campo sujo | Pode ser chamado de Savana Gramíneo-Lenhosa; Pode se alterar para Campo Limpo nos morrotes; No pós-fogo é substituído por espécies mais resistentes com caules subterrâneos. |

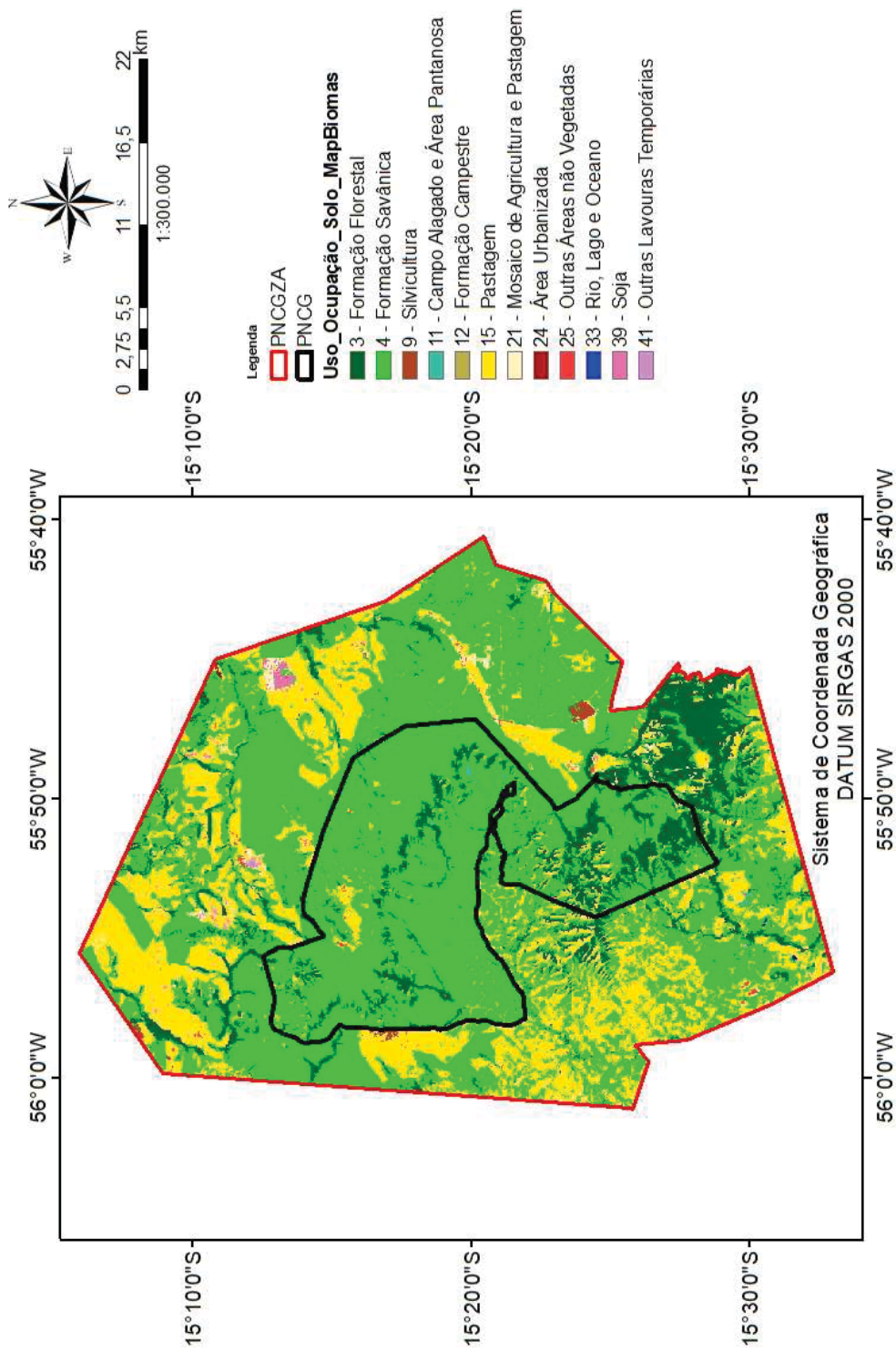
| | |
|----------------|---|
| Campo limpo | Caracteriza-se com dois estratos arbustivos de 1 a 4 m de altura e herbáceo; Pode ser chamada de Savana Parque. |
| Campo rupestre | Com indivíduos que não passam de 1m de altura; Ocorrem em afloramentos rochosos superiores a 800 m de altitude. |
| Vereda | Predominância da palmeira buriti - <i>Mauritia flexuosa</i> que não formam dossel; Em seu entorno ocorre a presença da fitofisionomia Campo Limpo. |

FONTE: ICMBIO (2009).

3.6 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para a caracterização do uso e ocupação do solo, foi utilizado o mapeamento anual de uso e ocupação do solo do MapBiomias (2022). O mapeamento usa máscaras anuais de áreas naturais, com predominância de cobertura florestal e não naturais com áreas antropizadas. Assim, foram usados dados mais atuais, utilizando-se a coleção do ano de 2021 apresentados na Figura 3. Os principais usos e ocupação do solo presente no PNCG e na sua zona de amortecimento são a formação savânica, pastagem e formação florestal.

FIGURA 3 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES



FONTE: MapBiomas (2022).

3.7 OBTENÇÃO DAS IMAGENS E DADOS

No entorno da área do PNCG considerou-se a área de influência os vértices presentes no plano de manejo do parque (ICMBIO, 2009). Nesta pesquisa foram utilizados conjuntos de dados disponibilizados gratuitamente na plataforma do GEE e INPE.

O sistema de coordenada usado foi a geográfica com Datum SIRGAS 2000, com exceção da função K de Ripley, que usou o sistema de coordenada UTM com Datum SIRGAS 2000 fuso 21 sul. Foram utilizadas imagens do período de 20 anos, de 2000 a 2019, adotando-se critérios de Machado Neto (2016) e Soares, Batista e Tetto (2017).

A relação das coleções utilizadas nesse estudo está apresentada na Tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS

| Variáveis | Tipo | Coleções GEE/INPE | Descrição | Limites | Unidades | Resolução Espacial (m) |
|-----------|--------|--|--|---------------------|--------------------------|------------------------|
| ET | Raster | MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m | Evapotranspiração | -32767 a 32700 | kg/m ² /8dias | 500 |
| FC | Vetor | INPE | Focos de Calor | ND | Unidades | ND |
| LST | Raster | MOD11A1.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km | Temperatura de Superfície | 7500 a 65535 | K | 1000 |
| RAD | Raster | Breathing Earth System Simulator (BESS) Radiation v1 | Fluxo descendente fotossintético de superfície do ar | ND | W/m ² | 5500 |
| NDDI | Raster | USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance ⁶ | Índice de Seca pela Diferença Normalizada | ≤ - 0,49 a ≥ 5,00 | µm | 30 |
| NBR | Raster | USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance ² | Índice de Queima Normalizada | -1 a 1 | µm | 30 |
| EV | Raster | Global SRTM Landforms | Exposição de Vertente | Quadro 2 e Figura 4 | Quadro 2 e Figura 4 | 90 |
| CC | Raster | Hansen Global Forest Change v1.7 (2000-2019) | Fechamento do dossel para toda a vegetação com mais de 5m de altura. | 0 a 100 | % | 30,92 |

FONTE: O Autor (2023).

⁶ Reflectância do topo da atmosfera já calculada.

As variáveis EV e CC foram obtidas nos períodos de 24/01/2006 a 13/05/2011 e 01/01/2000 a 01/01/2020, respectivamente, pois as coleções dessas variáveis já são produtos fechados dos períodos mencionados.

As variáveis NDDI e NBR, que utilizaram bandas do *Landsat 7* e passaram por um filtro de nuvens. Nesse filtro foram consideradas imagens com percentual menor que dez para terem sua utilização efetivada. Assim, as variáveis contaram com imagens com baixa incidência de nuvens em seus cálculos.

3.7.1 Evapotranspiração (ET)

O MOD16A2 Versão 6 Evapotranspiração/Fluxo de calor latente é um produto que consiste em informações coletadas a cada 8 dias, com uma resolução de 500 metros de *pixels*. O algoritmo utilizado para coletar esses dados baseia-se na equação Penman-Monteith (MONTEITH, 1975):

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + \rho c_p \{e_s(T) - e\} r_H^{-1}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_H}\right)}$$

Onde:

λE : evapotranspiração;

ΔR_n : variação da densidade líquida de fluxo de radiação;

ρ : coeficiente de reflexão;

c_p : calor específico do ar a pressão constante;

$e_s(T)$: pressão de vapor de saturação do vapor de água na temperatura T;

e : pressão parcial do vapor de água no ar;

Δ : taxa de mudança da pressão de vapor de saturação com a temperatura;

γ : comprimento de onda da radiação eletromagnética;

r_s : resistência de um conjunto de estômatos;

r_H : resistência de transferência de massa.

A coleção leva em consideração informações meteorológicas diárias e dados de sensoriamento remoto MODIS, incluindo informações sobre a vegetação, albedo e cobertura da terra (RUNNING; MU; ZHAO, 2017).

Segundo o mesmo autor, os valores de *pixel* para as camadas de evapotranspiração são calculados somando os valores dos 8 dias no período

composto. É importante observar que o último período de 8 dias de cada ano é um período composto de 5 ou 6 dias, dependendo do ano. De acordo com a seção "Camadas" dos documentos do conjunto de dados, pode haver imprecisão na atribuição de classe para valores de preenchimento entre 32761 e 32767. Esses valores não estão disponíveis no GEE.

3.7.2 Focos de calor

Os focos de calor foram obtidos do site do INPE através do endereço <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/> (INPE, 2022).

Atualmente o CPTEC utiliza 31 satélites ambientais de órbita polar e geoestacionários que compõem sua rede na América do Sul. Os satélites meteorológicos são: NOAA, GOES, AQUA (EOS PM-1), TERRA (EOS AM-1), METEOSAT, ATSR e TRMM.

3.7.2.1 Densidade de Kernel

Para o cálculo da densidade de Kernel foi utilizado o estimador da ferramenta *Spatial Analyst*, contido no *software* ArcGIS (ESRI, 2019), obtendo-se um arquivo matricial como resultado da soma do empilhamento de n outros *rasters* circulares de raio h para cada ponto do dado de entrada segundo a fórmula:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Onde:

K : função de Kernel;

h : raio de busca;

x : posição do centro de cada célula do *raster* de saída;

X_i : posição do ponto i proveniente do centroide de cada polígono;

n : número total de focos de calor.

Os valores de referência de densidade de Kernel foram processados pelo *software* ArcGIS (ESRI, 2019) usando a ferramenta *reclassify*, método quartil para cinco classes: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

3.7.3 Temperatura de Superfície (LST)

O produto MOD11A1 V6.1 fornece valores diários de temperatura da superfície terrestre (LST) e emissividade em uma grade de 1200 x 1200 quilômetros. O valor da temperatura é derivado do produto de varredura MOD11_L2. Acima de 30 graus de latitude, alguns *pixels* podem ter múltiplas observações onde os critérios para um céu claro são atendidos. Quando isso ocorre, o valor do *pixel* é a média de todas as observações qualificadas. Além das bandas de temperatura da superfície durante o dia e a noite e suas camadas indicadoras de qualidade, o produto também fornece as bandas MODIS 31 e 32 e seis camadas de observação (WAN; HOOK; HULLEY, 2021).

Segundo os mesmos autores, o MOD11A1 V6.1 é um produto que oferece informações diárias de temperatura da superfície terrestre e emissividade em uma área específica, usando dados da varredura MOD11_L2. Quando há mais de uma observação para um pixel, o valor é a média de todas as observações qualificadas. Além das informações de temperatura, o produto também fornece bandas adicionais e camadas de observação.

3.7.4 Radiação (RAD)

O *Breathing Earth System Simulator* (BESS) é um modelo baseado em processos simplificados que combina a transferência radiativa da atmosfera e do dossel, fotossíntese do dossel, transpiração e equilíbrio energético. Ele combina um modelo de transferência radiativa atmosférica e uma rede neural artificial com os produtos atmosféricos MODIS para gerar produtos diários de 5 km.

Em outras palavras, o BESS é um modelo que integra diferentes processos que ocorrem na atmosfera e no dossel para produzir informações diárias de 5 km. Ele utiliza um modelo de transferência radiativa e uma rede neural artificial juntamente com informações atmosféricas do produto MODIS para gerar os dados (RYU *et al.*, 2018).

Os valores obtidos para RAD possui uma escala de transformação com valor de 0,02, ou seja, para obter os valores em *kelvin*, o resultado deve ser multiplicado pela escala.

3.7.5 Índice de Seca pela Diferença Normalizada (NDDI)

O NDDI foi calculado através da fórmula proposta por Gu *et al.* (2007):

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

Onde:

NDVI: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada processado no GEE;

NDWI: Índice de Diferença Normalizada da Água Presente na Vegetação processado no GEE.

Foi realizado o uso do NDDI na categorização dos indicadores de intensidade da seca, de acordo com as categorias propostas por Gu *et al.* (2007). O NDDI é altamente sensível à seca, visto que integra as informações de vigor da vegetação (NDVI) e de umidade local (NDWI) em sua fórmula (LEE *et al.*, 2016).

Valores elevados do NDDI sugerem condições de seca, uma vez que tanto o NDVI quanto o NDWI são inferiores (geralmente NDVI < 0,5 e NDWI < 0,3). Por outro lado, valores reduzidos do NDDI indicam a ausência de seca, visto que tanto o NDVI quanto o NDWI são elevados (geralmente NDVI > 0,6 e NDWI > 0,4) (GU *et al.*, 2007). Os valores de referência de severidade de seca foram processados pelo *software* ArcGIS usando a ferramenta *reclassify* tomando como referência os valores apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 - INDICADORES DE SEVERIDADE DE SECA

| NDDI | Descrição |
|---------------------|------------------|
| ≤ - 0,49 | Ausência de seca |
| -0,49 ~ 1,99 | Seca anormal |
| 2,00 ~ 2,99 | Seca moderada |
| 3,00 ~ 3,99 | Seca severa |
| 4,00 ~ 4,99 | Seca extrema |
| ≥ 5,00 | Seca excepcional |

FONTE: GU *et al.* (2007).

3.7.6 Índice de Queima Normalizada (NBR)

De acordo com o índice NBR, quanto mais semelhantes as assinaturas espectrais, menor será a severidade dos danos causados. Por outro lado, quanto maiores as diferenças entre as assinaturas espectrais, maior será a destruição das plantas, permitindo uma avaliação mais precisa da severidade do fogo durante as análises (CASTILLO; SAAVEDRA; BRULL, 2019). Conforme o território se recupera, os níveis de reflectância da banda NIR aumentam, enquanto a absorção no SWIR também aumenta, refletindo a recuperação da área afetada pelo fogo.

O NBR foi calculado através da fórmula proposta por Key e Benson (1999):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Onde:

NIR: Infravermelho Próximo banda 4 *Landsat 7*, obtido e processado no GEE;

SWIR: Infravermelho de Ondas Curtas banda 7 *Landsat 7*, obtido e processado no GEE.

Os valores de referência do NBR se baseiam na severidade das queimas e valores com maior severidade de queimada tem valor NBR mais próximos de -1. Assim os valores positivos têm menor severidade de queima.

3.7.7 Exposição de Vertente (EV)

O conjunto de dados SRTM *Landform* fornece classes de formas de relevo criadas combinando o Índice Contínuo de Carga de Calor e Isolamento (SRTM CHILI) e o Índice Topográfico de Posição em Multi-Escala (SRTM mTPI). É baseado no Modelo Digital de Elevação (DEM) SRTM de 30 m, disponível no GEE como USGS/SRTMGL1_003 (THEOBALD *et al.*, 2015).

Os conjuntos de dados Ecologicamente Relevantes de Geomorfologia (ERGo) da *Conservation Science Partners* (CSP), Formas de Relevo e Fisiografia, contêm dados detalhados e em multi escala sobre formas de relevo e padrões fisiográficos, também conhecidos como facetadas da terra. Embora existam muitos usos potenciais

desses dados, o objetivo original foi desenvolver uma classificação e mapa ecologicamente relevante de classes de formas de relevo e fisiográficas adequadas para o planejamento de adaptação climática. Como há uma grande incerteza associada às condições climáticas futuras e ainda mais incerteza em torno das respostas ecológicas, fornecer informações sobre o que é improvável de mudar oferece uma base sólida para os gerentes construírem planos robustos de adaptação climática. A quantificação dessas características da paisagem é sensível à resolução, por isso fornecemos a resolução mais alta possível, dadas a extensão e as características de um índice específico (THEOBALD *et al.*, 2015).

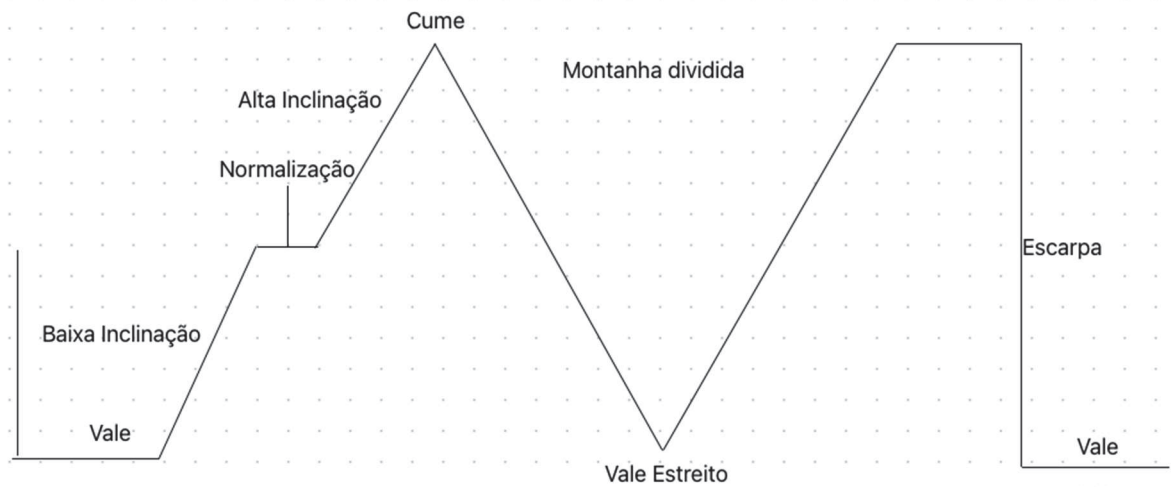
Dessa forma, os valores de EV foram processadas pelo *software ArcGIS* usando a ferramenta *reclassify* com os valores presente na Quadro 2 e representação das descrições do produto na Figura 4.

QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DE EXPOSIÇÃO DE VERTENTE

| Valor | Descrição |
|-------|---------------------------------|
| 11 | Cume (Quente) |
| 12 | Cume |
| 13 | Cume (Frio) |
| 14 | Montanha Dividida |
| 15 | Escarpa |
| 21 | Alta Inclinação (Quente) |
| 22 | Alta Inclinação |
| 23 | Alta Inclinação (Frio) |
| 24 | Alta Inclinação (Normalização) |
| 31 | Baixa Inclinação (Quente) |
| 32 | Baixa Inclinação |
| 33 | Baixa Inclinação (Frio) |
| 34 | Baixa Inclinação (Normalização) |
| 41 | Vale |
| 42 | Vale Estreito |

FONTE: O autor (2023).

FIGURA 4 - MODELO ESQUEMÁTICO DA EXPOSIÇÃO DE VERTENTE



FONTE: O autor (2023).

3.7.8 Cobertura de copa (CC)

Essa coleção disponibilizada no GEE é resultante da análise de séries temporais de imagens *Landsat* na caracterização da extensão e mudança global da floresta.

As bandas "primeira" e "última" são imagens multiespectrais de referência dos primeiros e últimos anos disponíveis para as bandas espectrais 3, 4, 5 e 7 do *Landsat*. As imagens compostas de referência representam as medianas de um conjunto de observações da estação de crescimento avaliadas quanto à qualidade para cada uma dessas bandas (HANSEN *et al.*, 2013).

Assim foi possível obter os valores de fechamento do dossel para toda a vegetação com mais de 5 m de altura no período estudado com valores que variaram de 0 a 100%.

3.8 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

As variáveis foram classificadas como variáveis de vulnerabilidade e variáveis de incêndios florestais ou validação e estão descritas no Quadro 3.

QUADRO 3 - DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

| Variáveis | |
|--|--|
| Vulnerabilidade | Incêndios Florestais/Validação |
| Evapotranspiração (ET) | Índice de Queima Normalizada (NBR) |
| Temperatura de Superfície (LST) | Focos de Calor pela Densidade de Kernel (FC) |
| Radiação (RAD) | |
| Índice de Seca pela Diferença Normalizada (NDDI) | |
| Exposição de Vertente (EV) | |
| Cobertura de Copa (CC) | |

FONTE: O autor (2023).

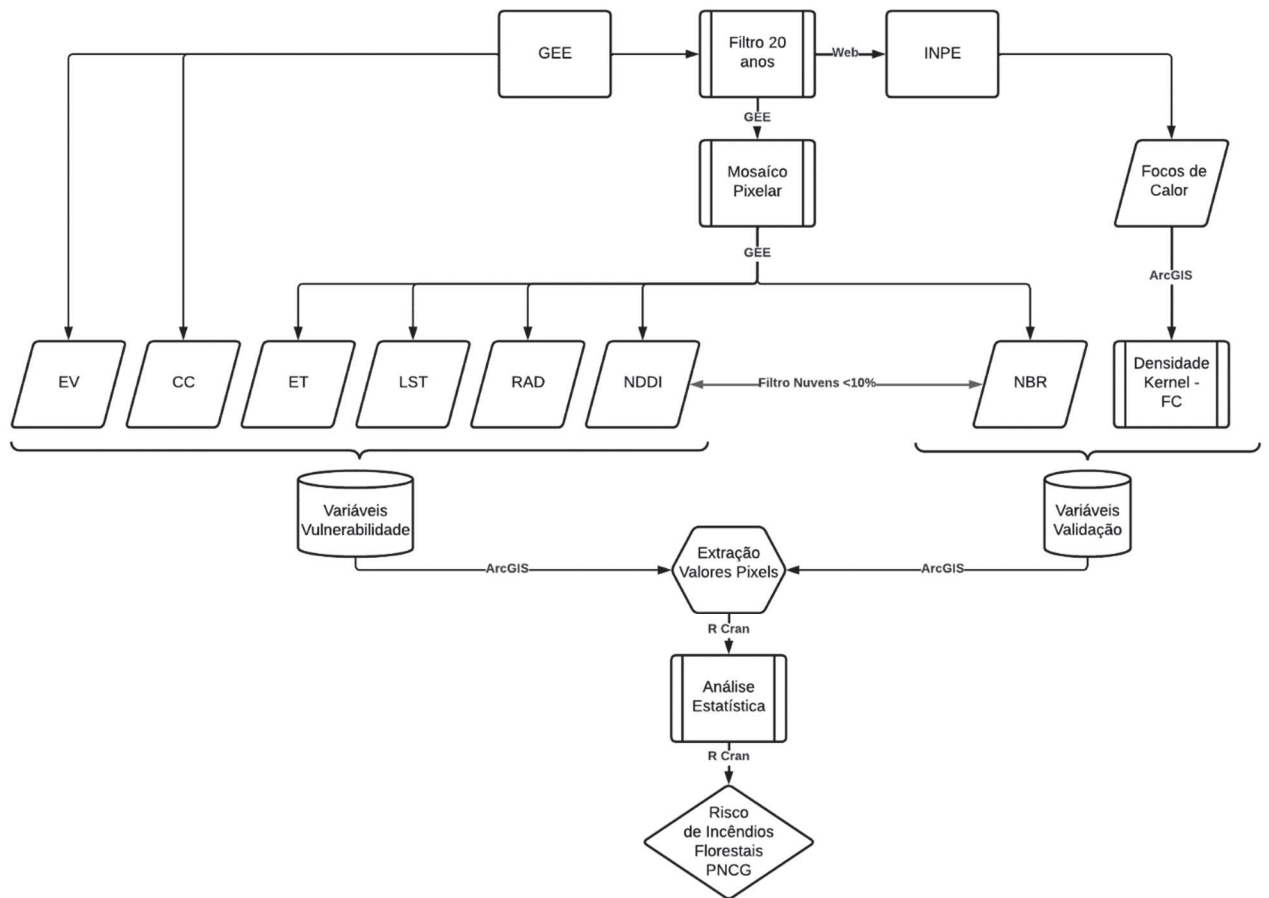
3.9 JANELA TEMPORAL

O GEE disponibiliza o pré-processamento de dados e informações de imagens, denominado Mosaico Pixelar (figura 5). Esse processo caracteriza-se como um recurso da plataforma que faz uma varredura no conjunto de dados *rasters* para um período estabelecido.

Esse conjunto de dados passa por uma verificação de pixels “defeituosos” por problemas atmosféricos, erros no sensor do satélite. Os *pixels* problemáticos são substituídos por outros com características próximas, porém normais. Desse modo, o estudo utilizou a média da composição dos *rasters* no período estudado utilizando o Mosaico Pixelar (OLIVEIRA, 2016).

3.10 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

FIGURA 5 - FLUXOGRAMA⁷ METODOLÓGICO



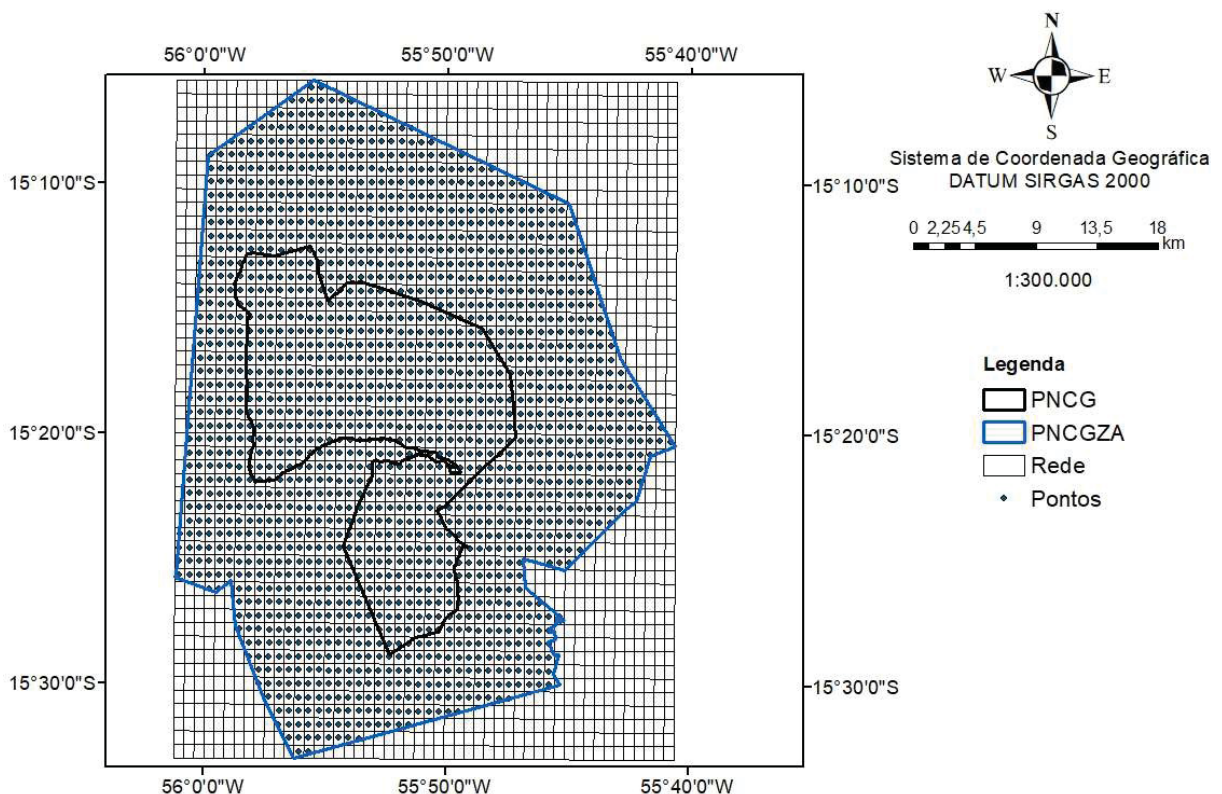
FONTE: O autor (2023).

⁷ GEE - Google Earth Engine; EV - Exposição de Vertente; CC - Cobertura de Copa; ET - Evapotranspiração; LST - Temperatura de Superfície; RAD - Radiação; NDDI - Índice de Seca pela Diferença Normalizada; NBR - Índice de Queima Normalizada; FC - Focos de Calor pela Densidade de Kernel.

3.11 EXTRAÇÃO DOS PIXELS

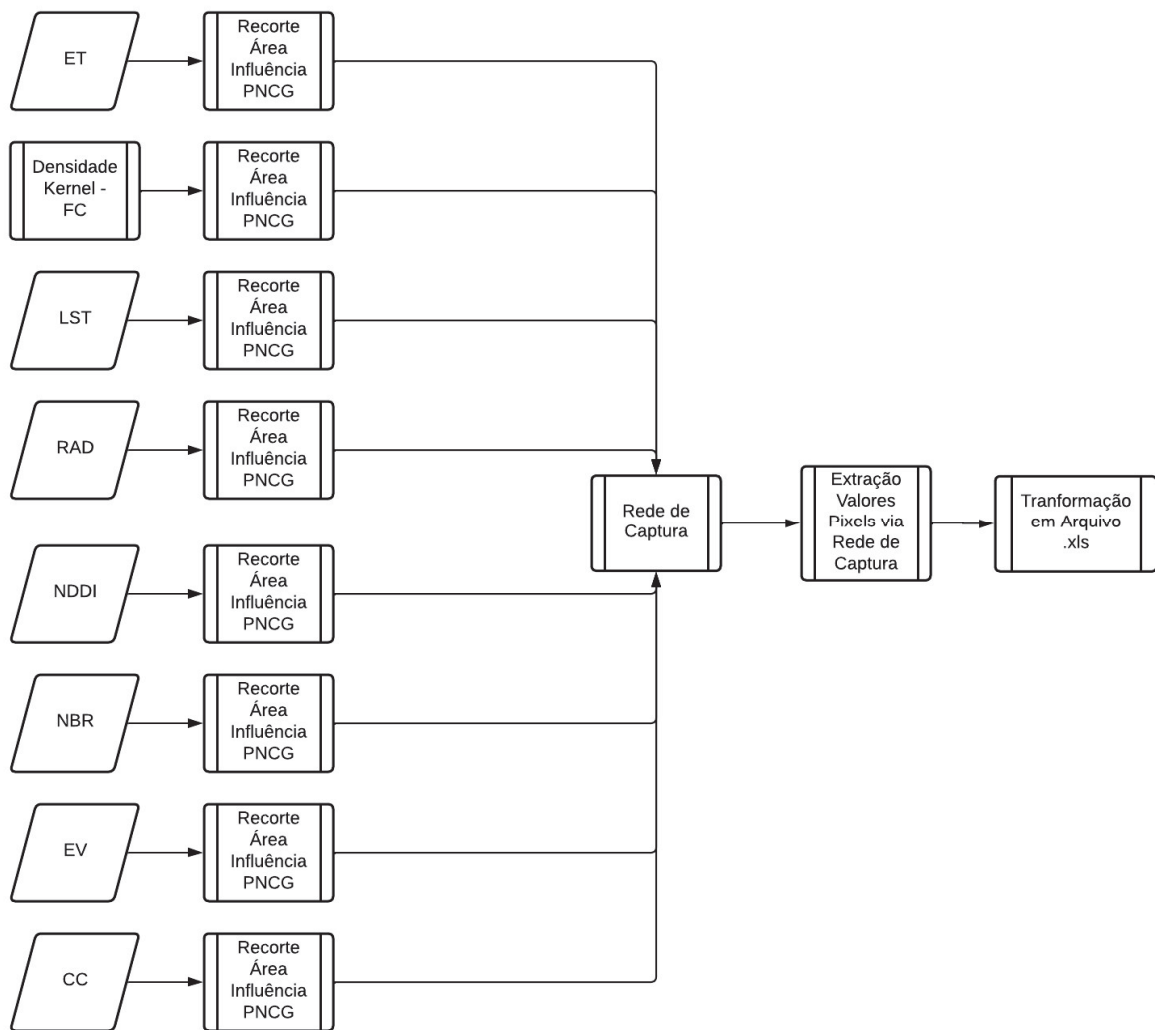
A extração dos pixels consistiu em obter os valores dos *pixels* das variáveis de vulnerabilidade e de validação. Usou-se o *software* ArcGIS (ESRI, 2019) cortando primeiro as variáveis, ou *rasters*, com o vetor da zona de amortecimento do PNCG. Em seguida criou-se uma rede de captura, denominada “*fishnet*” no *software*, que são camadas retangulares com pontos no centro que serviram como referência na extração (Figura 6) para essa função usou-se 300 linhas e 300 colunas. Com a rede de captura criada, usou-se a ferramenta “*Extract Multi Values to Points*” para extrair os valores dos *pixels* das variáveis. Desse modo, com os valores extraídos transformou-se os dados em planilha no formato “.xls” que foram usados para as análises estatísticas.

FIGURA 6 - REDE DE CAPTURA DE PIXELS



FONTE: O autor (2023).

Para exemplificar essa etapa, um fluxograma de extração de pixels pode ser observado na Figura 7.

FIGURA 7 - FLUXOGRAMA⁸ DE EXTRAÇÃO DE *PIXELS*

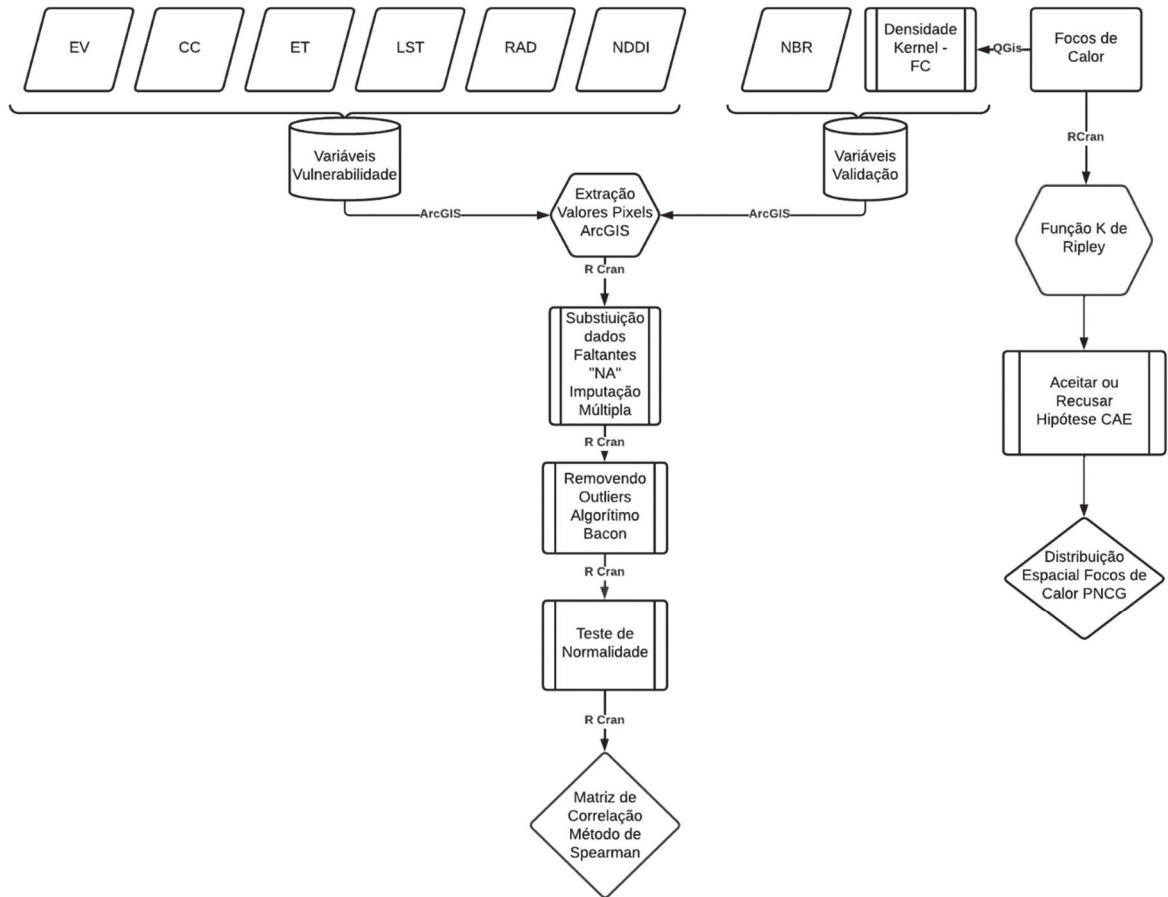
FONTE: O autor (2023).

⁸ET – Evapotranspiração; FC - Focos de Calor pela Densidade de Kernel; LST - Temperatura de Superfície; RAD - Radiação; NDDI - Índice de Seca pela Diferença Normalizada; NBR - Índice de Queima Normalizada; EV - Exposição de Vertente; CC - Cobertura de Copa; PNCG - Parque Nacional da chapada dos Guimarães.

3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os procedimentos para as análises estatísticas estão apresentados na Figura 8.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA⁹ DA ANÁLISE ESTATÍSTICA



FONTE: O autor (2023).

⁹ EV - Exposição de Vertente; CC - Cobertura de Copa; ET - Evapotranspiração; LST - Temperatura de Superfície; RAD - Radiação; NDDI - Índice de Seca pela Diferença Normalizada; NBR - Índice de Queima Normalizada; FC - Focos de Calor pela Densidade de Kernel; CAE - Completa Aleatoriedade Espacial; PNCG - Parque Nacional da chapada dos Guimarães.

3.12.1 Dados faltantes

Na década de 70, Rubin (1987) propôs a técnica de Imputação Múltipla - IM para lidar com o problema de não resposta em pesquisas. No entanto, somente recentemente, com o desenvolvimento de recursos computacionais, a técnica vem sendo mais utilizada. A IM permite que a incerteza da imputação seja incluída nos resultados, corrigindo o problema associado à imputação única.

A técnica envolve três passos:

1. obter m bancos de dados completos por meio de técnicas apropriadas de imputação;
2. analisar separadamente cada um dos m bancos de dados com um método estatístico tradicional, como se fosse um conjunto completo de dados;
3. combinar os m resultados obtidos no passo 2 de maneira simples e apropriada para obter a inferência da imputação repetida.

O primeiro passo é fundamental e requer técnicas de imputação que preservem a relação entre as observações faltantes e presentes, considerando o mecanismo e o padrão dos dados faltantes. Os mecanismos são divididos em MCAR (perda completamente ao acaso), MAR (perda ao acaso) e NMAR (não perda ao acaso), enquanto os padrões são monotônicos e não monotônicos. Depois de realizar as m imputações, o passo 2 pode ser executado, ou seja, os m bancos de dados podem ser analisados com métodos tradicionais de análise. Por fim, os m resultados podem ser combinados seguindo as regras propostas por (RUBIN, 1987).

Essas regras são amplamente discutidas na literatura sobre imputação múltipla, fornecem uma abordagem simples para o terceiro passo da técnica. Essas regras são aplicáveis independentemente do método utilizado para a imputação. O objetivo é obter estimativas para o parâmetro Q de interesse, ou seja, Q_j para $j = 1, 2, \dots, m$, a partir de cada análise. O parâmetro Q pode ser qualquer medida escalar a ser estimada, como média, correlação, coeficiente de regressão ou razão de chances. A estimativa combinada é então calculada como a média das estimativas individuais (SCHAFER, 1999; SCHAFER; GRAHAM, 2002).

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \hat{Q}_j$$

Variância dentro das imputações:

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j$$

Variância entre as imputações:

$$B = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\hat{Q}_j - \bar{Q})^2$$

Variância combinada:

$$T = \bar{U} + 1 + \frac{1}{m} B$$

Para as imputações foram utilizadas o *Predictive Mean Matching* (PMM), onde os parâmetros são inferidos a partir de uma distribuição posterior própria. Os valores preditos são calculados para $y_{\text{observados}}$ e $y_{\text{faltantes}}$. Para cada valor faltante predito, é buscada a observação correspondente com o valor predito mais próximo, e o valor observado é utilizado como imputação. A variação entre as imputações é gerada através de etapas que estimam β e σ , que são repetidas m vezes (RUBIN, 1987).

A análise computacional dos dados faltantes foi realizada com o software R Cran com os pacotes Mice, Skimr e Visdat. Assim foi possível gerar tabela, gráficos e substituir os dados faltantes da pesquisa (R CORE TEAM, 2023).

3.12.2 Outliers

O processo de mascaramento e esmagamento de *outliers* pode levar a distorções na média e na covariância, prejudicando a análise dos pontos extremos em um conjunto de dados. Para lidar com esses problemas, alguns algoritmos de busca começam com um pequeno subconjunto dos dados que é livre de outliers e adicionam informações não *outliers* a este subconjunto inicial. Esses algoritmos são chamados de algoritmos de busca sucessiva. Billor, Hadi e Velleman (2000), desenvolveram um algoritmo de busca para frente chamado *Blocked Adaptive Computationally-Efficient Outlier Nominators* (BACON), que é usado para detectar outliers multivariados. O BACON é capaz de detectar *outliers* com eficiência computacional e é baseado em blocos adaptativos.

Para os dados usou-se a seleção do subconjunto inicial com base nas distâncias de *Mahalanobis*, onde foi possível calcular as distâncias para cada uma das observações através da fórmula:

$$d_i = \sqrt{(x_i - \bar{X})^T S^{-1} (x_i - \bar{X})} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Onde:

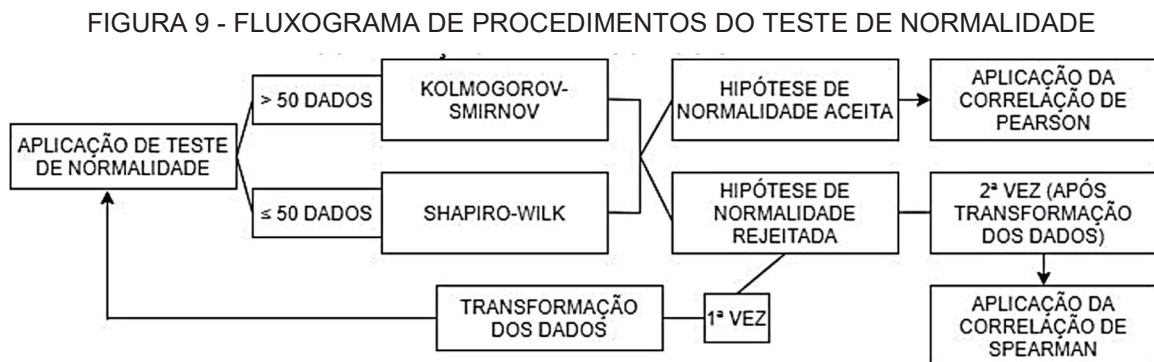
\bar{X} : vetor de média;

S : matriz de variância e covariância das m observações.

A análise de correção dos *outliers* foi realizada com o *software* R Cran (R CORE TEAM, 2023) usando o pacote *robustX*. Com o pacote foi possível calcular as distâncias de *Mahalanobis* e, desse modo foi possível minimizar os *outliers* dos dados de *pixels* da pesquisa.

3.12.3 Teste de normalidade e matriz de correlação

Para o teste de normalidade e procedimentos adotados para aplicação da correlação utilizou-se a metodologia proposta por Ferreira (2021), conforme fluxograma apresentado na Figura 9.



FONTE: Ferreira (2021).

Na transformação dos dados utilizou-se a fórmula:

$$Dt = \frac{\bar{x}}{\sigma}$$

Onde:

Dt : dados transformados;

\bar{x} : média aritmética;

σ : desvio padrão.

O teste de normalidade e a matriz de correlação foram realizados no *software* R Cran (R CORE TEAM, 2023). Usando o pacote ggcorrplot foi possível gerar o gráfico da matriz de correlação das variáveis. O nível de significância do gráfico da matriz de correlação foi de 5% usando o p-valores assim foi possível gerar o gráfico com as principais correlações entre as variáveis.

3.12.4 Função K de Ripley

Na análise do padrão espacial dos FC foi usada a função K de *Ripley*. Essa função consiste em uma análise de segunda ordem reduzida e é considerada uma estatística descritiva de padrão espacial (RIPLEY, 1977). O *software* usado foi o R Cran (R CORE TEAM, 2023) com o pacote Spatstat baseado na correção isotrópica de bordadura Ripley (1977):

$$\hat{K}_{(s)} = \frac{1}{\hat{\lambda}n} \sum_i^n = \sum_{i \neq j}^n = 1w_I^{-1}(x_i, x_j)I(\|x_i - x_j\| < s)$$

Onde:

n : número de focos de calor na região de estudo;

x_i e x_j : coordenadas dos pontos do mapa;

$\|x_i - x_j\|$: distância euclidiana entre as localizações x_i e x_j ;

s : vetor arbitrário de distâncias;

$w_I(x_i, x_j)$: é a função de correção isotrópica de bordadura que representa proporção da circunferência com centro em x_i e com raio $\|x_i - x_j\|$ fora da área de estudo que pode ser definida para qualquer polígono convexo;

$I(U)$: função indicadora que assume valor 1 (um) quando a condição U for verdadeira e zero quando falsa.

O valor de λ , que é um estimador não viciado de intensidade do processo, é obtido através da fórmula:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\|A\|}$$

Onde:

n : número de focos de calor;

$\|A\|$: quantitativo da área de estudo.

Em áreas de estudo retangulares, o estimador de *Ripley* é um estimador imparcial da função K para distâncias menores que a metade do menor lado do retângulo (DIGGLE, 1983). Por essa razão, a escala de distâncias em coordenadas UTM utilizada neste estudo foi de 604641,640 a 634874,540 metros a leste e 8283288,25 a 8322013,30 metros ao norte datum SIRGAS 2000 fuso 21. Os resultados foram transformados na função $L_{(s)}$ para facilitar a visualização e foi elaborado um gráfico da função $L_{(s)}$ de acordo com a fórmula relacionada à distância s :

$$\hat{L}_s = \frac{\sqrt{K_s}}{\pi - s}$$

Onde:

L_s : k de Ripley em função da distância s ;

K_s : valor de k de Ripley;

s : distâncias

Na função K de *Ripley* quando a hipótese nula é aceita na função univariada significa que os pontos são de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE) (BATISTA, 1994). Nesse estudo a CAE foi avaliada com envelopes de confiança de 1000 simulações Montecarlo a 99% de confiança. Assim a avaliação da CAE foi realizada de forma gráfica com a finalidade de aceitar ou não a hipótese nula (RIPLEY, 1979).

A hipótese nula significa que os pontos são CAE para função univariada (BATISTA, 1994). A análise da CAE é feita de forma gráfica para facilitar a visualização dos desvios em relação à hipótese nula (RIPLEY, 1979).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir foram adquiridos pelo GEE e INPE, com dados do período de 2000 a 2019, as Variáveis de vulnerabilidade levantadas foram evapotranspiração, temperatura de superfície, radiação, índice de normalidade de seca, exposição de vertente, cobertura de copa e as variáveis de validação foram índice de queima normalizada e focos de calor pela densidade de Kernel.

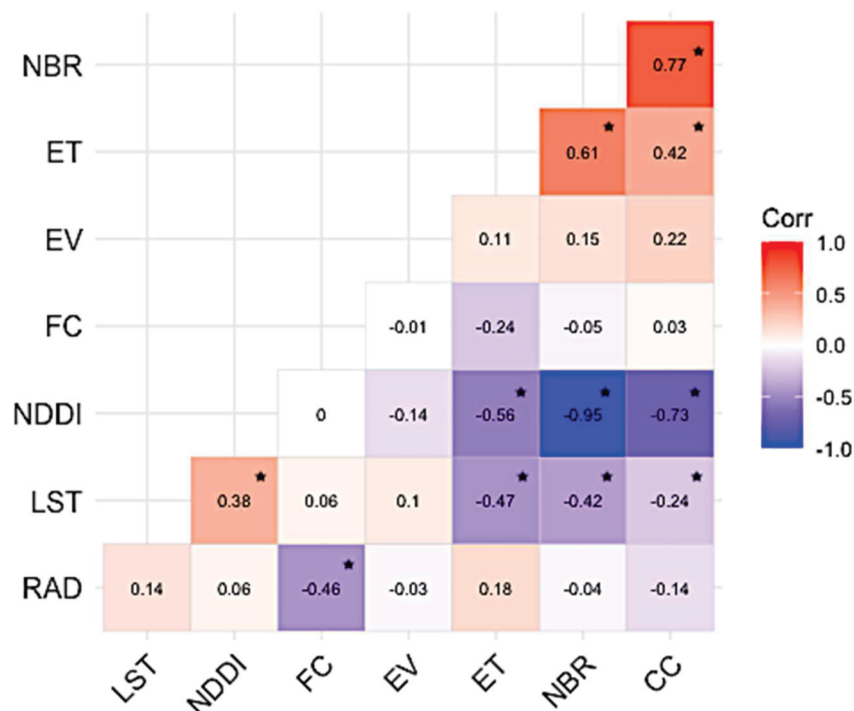
Os conjuntos de dados do tipo *raster* tiveram os *pixels* extraídos, formaram um conjunto de dados com 57795 observações. Os focos de calor obtidos constituíram 7514 pontos dentro no PNCG e de sua zona de amortecimento.

4.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

4.1.1 Matriz de correlação

As informações estatísticas da matriz de correlação pelo método de *Spearman* das variáveis estão presentes no Gráfico 1.

GRÁFICO 1 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



*= valores significativos a nível de 5% de probabilidade p-valores

FONTE: O autor (2023).

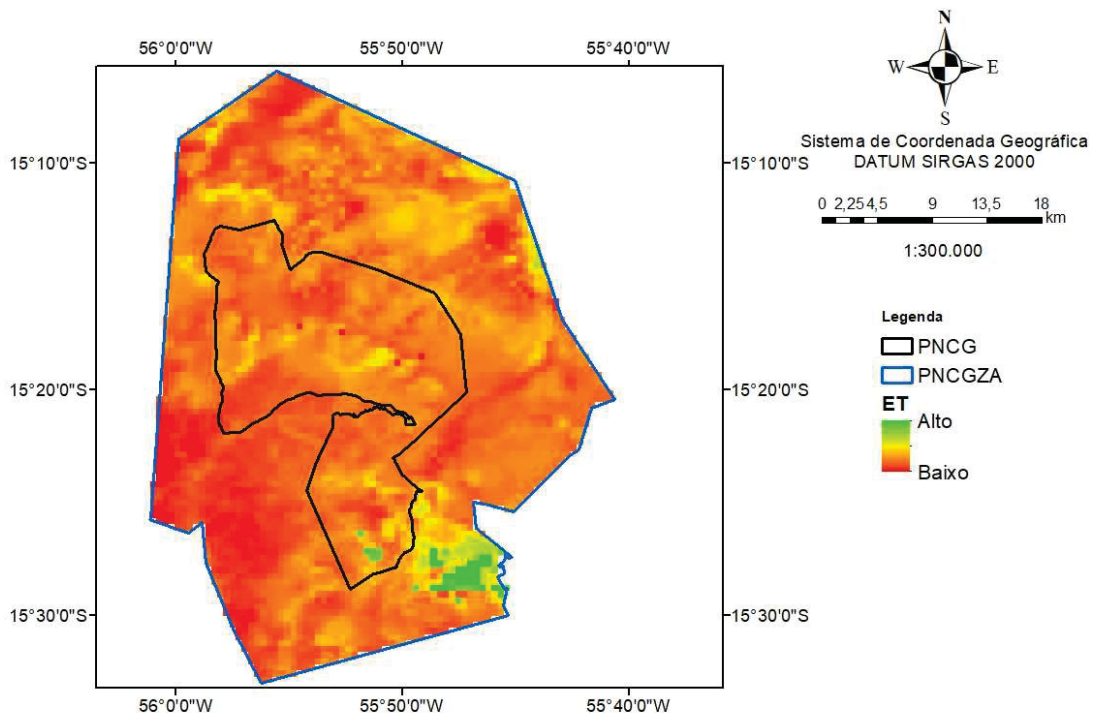
O teste de normalidade aplicado foi de *Kolmogorov-Smirnov* e apresentou valores não significativos, ou seja, o valor de p-valor foi menor que 5% mesmo após a transformação.

4.2 VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE

4.2.1 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração obtida pelo GEE, que considerou informações meteorológicas diárias e dados do MODIS, variou de 35,82 a 260,5 kg/m²/8dias (Figura 10). O interior do PNCG apresentou resultados que variaram de valores médios a baixos. Existiram resultados elevados na parte sudeste da zona de amortecimento e sul do PNCG e se devem a formação florestal do cerrado local sendo cerradão ou cerrado denso. As partes sombreadas pelo relevo como escarpas e vales dentro do parque podem explicar os valores medianos da evapotranspiração.

FIGURA 10 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ET | 82,67 | 84,46 | 25,21 | 35,82 | 260,5 | 69,60 | 82,26 | 94,49 |

FONTE: O autor (2023).

A coleção usada para obter ET no GEE tem uma boa confiabilidade. As medidas do lisímetro que é um equipamento de mensuração de alta precisão de variáveis do balanço hídrico como precipitação, ET e drenagem, são consideradas como valores reais dessas variáveis (PETERS *et al.*, 2017; KHAN *et al.*, 2018; RAPHAEL *et al.*, 2018). Gomes Junior (2021), comparou as medidas do lisímetro de pesagem com dados de ET de coleções do GEE, obtendo um coeficiente de determinação $R^2 = 0,94$. Esse resultado foi obtido com dados da coleção MOD16A2.006 disponível no GEE consideradas boas estimativas em comparação da medida “real” apresentada pelo lisímetro.

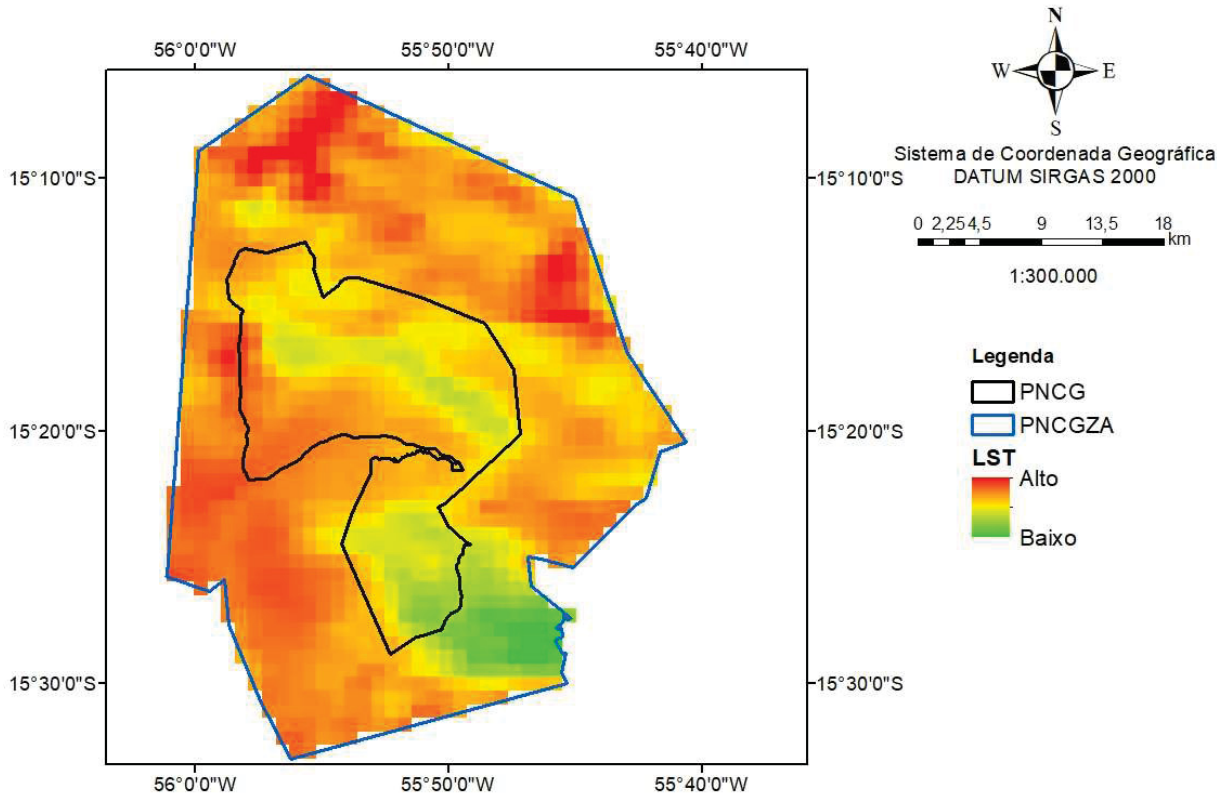
A formação florestal de menor porte, com alto índice de seca e baixa ET pode ser relacionada com suscetibilidade ao fogo, conforme estudo de Prudente (2010), onde encontrou que áreas ocupadas por savana parque e savana gramíneo-lenhosa tiveram alta suscetibilidade ao fogo. Resultado semelhante foi encontrado nessa pesquisa na correlação positiva de ET e NDDI ($r = 0,56$). Constatação parecida foi encontrada por Miranda *et al.* (2018), que verificou a suscetibilidade de fitofisionomias do tipo savana gramíneo-lenhosa e savana arborizadas que são compostas por vegetação rasteira e seca, serem mais vulneráveis ao fogo em relação a floresta aluvial e savana florestada compostas por árvores de grande porte com ambiente úmido.

4.2.2 Temperatura de Superfície (LST)

A temperatura de superfície variou de 27,83 a 37,19 °C em valores transformados pela escala na Figura 11. As menores temperaturas de superfície se encontraram nas beiras das encostas ou escarpas e em regiões próximas de alta

declividade. Sendo a maior área localizada na porção sul e sudeste do PNCG e área de amortecimento.

FIGURA 11 - TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LST | 34,22 | 34,06 | 1,44 | 27,99 | 37,34 | 33,44 | 34,25 | 34,99 |

FONTE: O autor (2023).

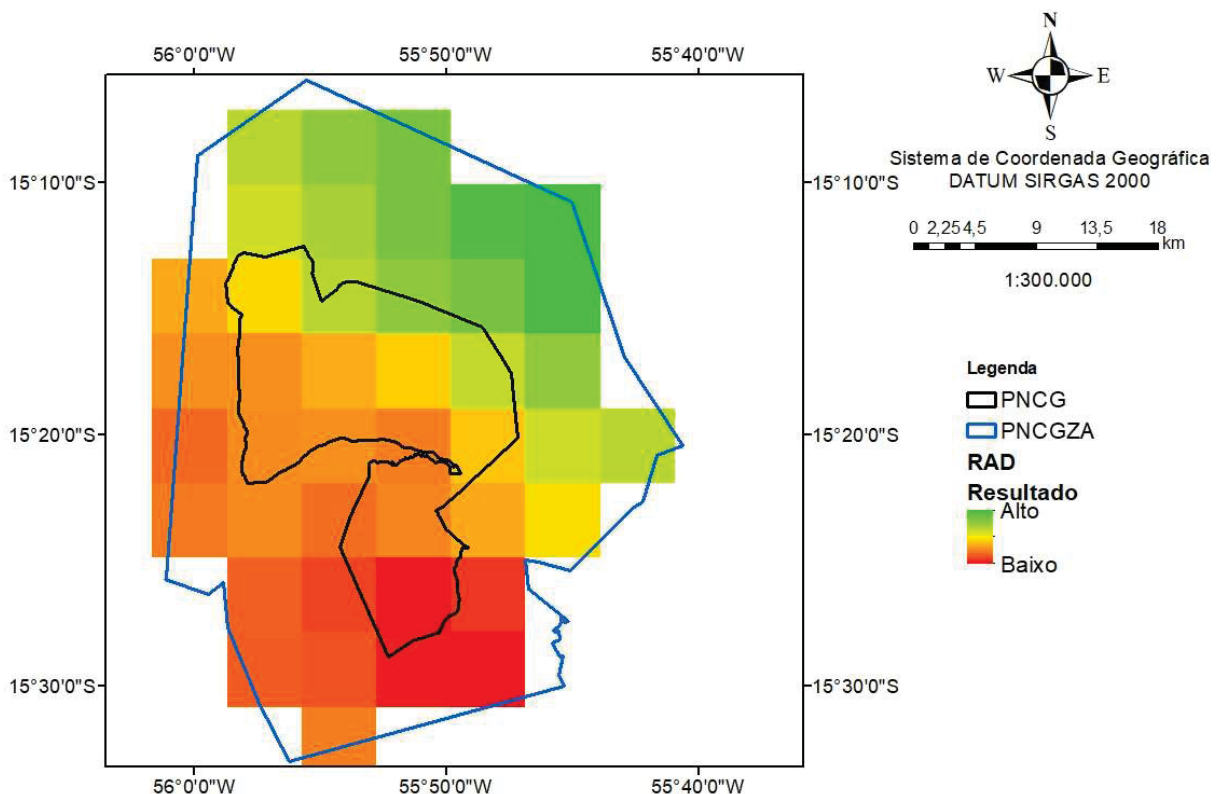
Em dados encontrados por Oliveira, Ferreira e Santos (2019), as temperaturas mais altas resultaram em evapotranspirações menores nos meses mais secos. Essa constatação foi confirmada por Oliveira e Pereira (2012), que verificou que a variabilidade de ET e estômatos estavam ligados em áreas de pastagens nos períodos

de seca, a qual reduziu a atividade de transpiração e área verde. Em contrapartida, em períodos chuvosos houve maior perda de água para atmosfera. Esse fato pode explicar a correlação negativa entre LST e NDDI em relação a ET ($r = -0,47$) e ($r = -0,56$), respectivamente no PNCG, já que o período de coleta dos dados foi de julho a outubro onde se encontrou os menores valores de ET e onde estão os maiores valores de LST e NDDI. Nessas relações de ET, LST e NDDI o perigo de incêndios florestais tornam-se maiores.

4.2.3 Radiação (RAD)

A Radiação variou de 97,409 a 103,333 W/m² (Figura 12) sendo as áreas com menores radiações na parte sul do parque.

FIGURA 12 - RADIAÇÃO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA RADIAÇÃO DE FLUXO DESCENDENTE FOTOSSINTÉTICO OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|--------|------|-------|--------|-------|-------|--------|
| RAD | 100,18 | 100,39 | 1,51 | 97,25 | 103,56 | 99,27 | 99,90 | 101,50 |

FONTES: O autor (2023).

As condições meteorológicas do PNCG no período estudado podem se assemelhar as do semiárido brasileiro. As plantas no semiárido perdem suas folhas na estação seca para evitar as perdas de água por transpiração e, conseqüentemente, há uma redução na clorofila em decorrência do estresse hídrico (CECCATO *et al.*, 2001).

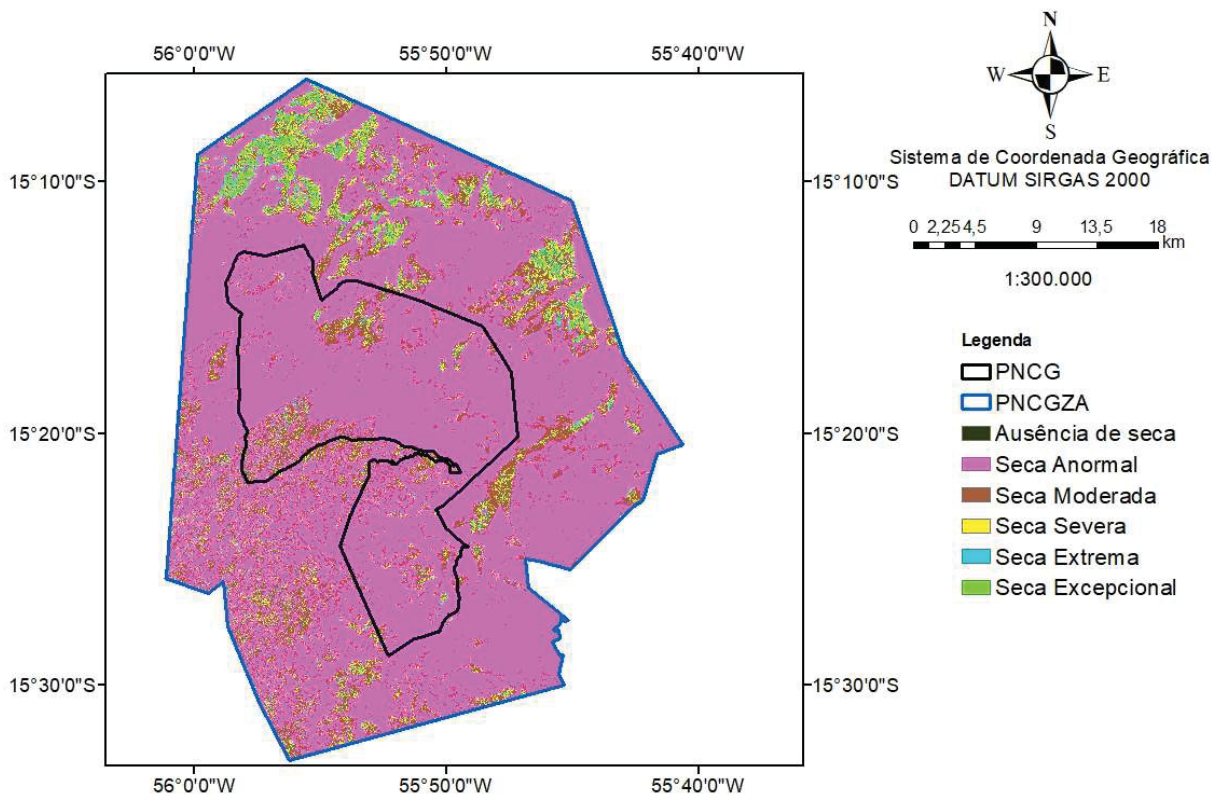
Essa constatação pode explicar a correlação negativa entre RAD e FC ($r = -0,46$) e positiva entre NDDI e LST ($r = 0,38$), pois em áreas de baixo fluxo fotossintético existiu um aumento no número de focos de calor, uma possível perda de material combustível que resultou no aumento do índice seca NDDI e LST. Portanto, a perda de vegetação influencia diretamente na medida de RAD, que é o produto da combinação fotossintética do dossel e onde não há dossel ou folhas o valor de RAD será baixo.

No entanto essa relação de RAD com dossel deve ser tratada com cuidado de acordo com Russell, Jarvis e Monteith (1989), pois a taxa fotossintética e a densidade de fluxo de radiação não têm relação linear dentro do dossel, pois a maioria das folhas estão expostas a baixos níveis de radiação.

4.2.4 Índice de seca pela diferença normalizada (NDDI)

O índice de seca pela diferença normalizada apresentou seca anormal na maior parte do parque, com áreas de seca excepcional e seca severa espalhadas em diferentes partes da área de estudo (Figura 13).

FIGURA 13 - ÍNDICE DE SECA PELA DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DO ÍNDICE DE SECA PELA DIFERENÇA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|------|--------|-------|------|------|------|
| NDDI | 1,29 | 1,51 | 1,55 | -23,56 | 32,40 | 0,84 | 1,28 | 1,97 |

FONTE: O autor (2023).

A correlação negativa entre o NDDI e a ET ($r = -0,56$) pode confirmar que o índice de seca consegue explicar as respostas das formações florestais a um ambiente árido. No PNCG as áreas com maiores ET têm uma formação florestal de porte mais elevado como cerradão ou cerrado denso mesmo nos períodos mais secos e já as áreas com formações florestais menores como campo sujo apresentaram

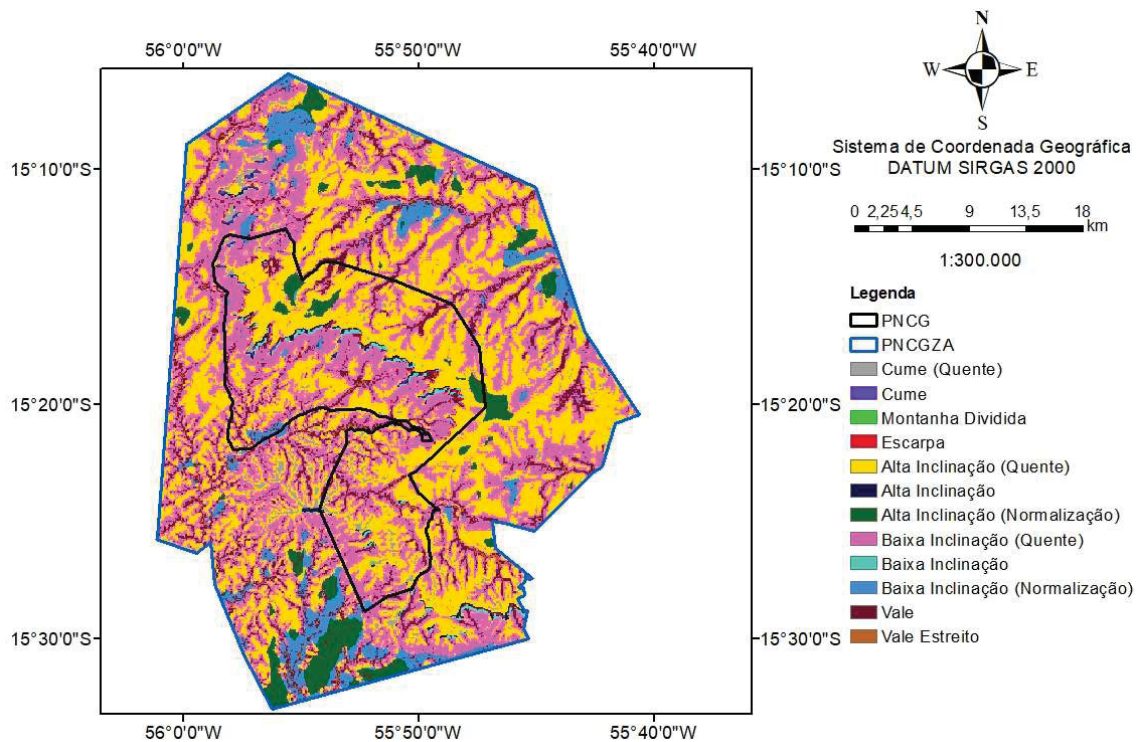
índice de secas maiores, baixa ET e alta inflamabilidade dessas formações adquiridas refletidas por essas condições.

As variáveis LST e NDDI apresentaram valores baixos assim como as áreas queimadas avaliadas pelo NBR. Isso pode ser explicado pelo trabalho de Braun (1962), que concluiu que além da vegetação os valores de taxas hídricas encontradas nesses tipos de formações geológicas favorecem o acúmulo de água por gravidade, que resulta em microclima favorável. Esse microclima favorável resulta em um índice de perigo de incêndio florestal menor que em outras formações geológicas e de vegetação.

4.2.5 Exposição de vertente (EV)

A exposição de vertente variou nas diferentes áreas do parque e sua zona de amortecimento (Figura 14). A alta inclinação (Quente) e a baixa inclinação (Quente) foram as vertentes com maior ocorrência dentro do PNCG e sua zona de amortecimento.

FIGURA 14 - EXPOSIÇÃO DE VERTENTE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA EXPOSIÇÃO DE VERTENTE OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

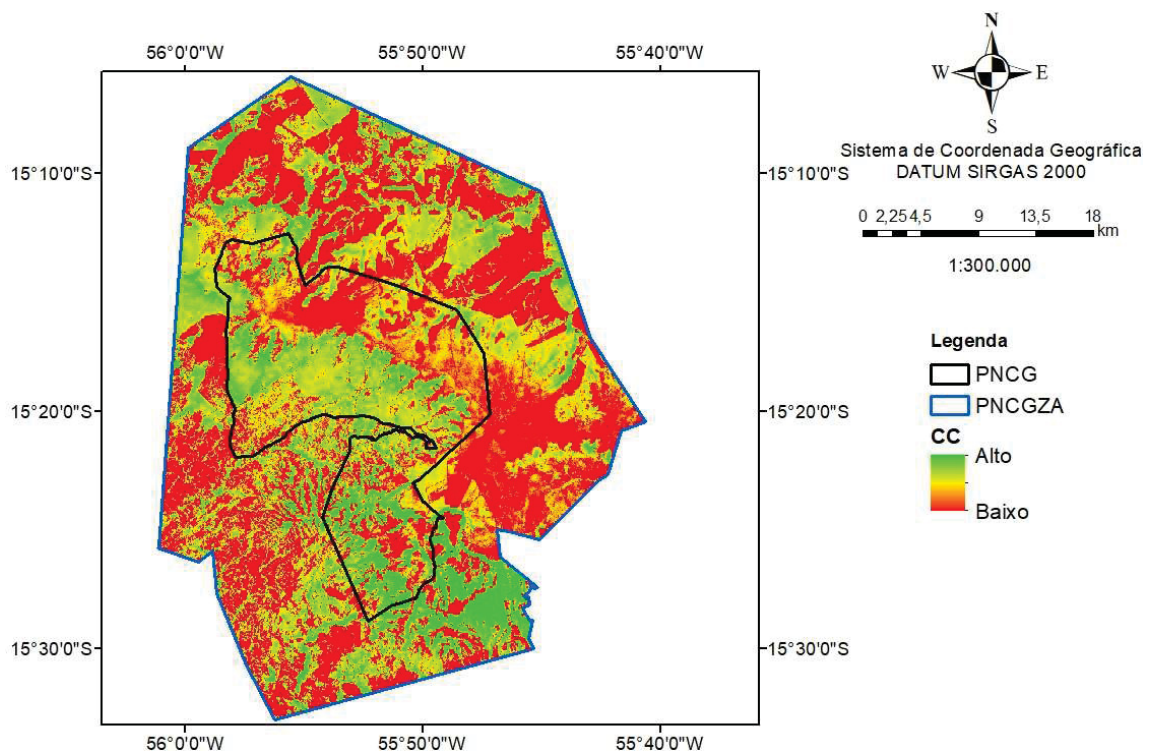
| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|------|------|------|------|------|------|
| NDDI | 31 | 27,43 | 6,91 | 11 | 42 | 21 | 31 | 31 |

FONTE: O autor (2023).

4.2.6 Cobertura de copa (CC)

A cobertura de copa teve uma variação de 0 a 100% (Figura 15). As áreas com maiores percentuais de cobertura de copas foram encontradas nas beiras de encostas e áreas relevo descendente. Essas regiões geralmente apresentam microclima favorável o que pode favorecer a permanência dos altos percentuais mesmo nos períodos de estiagem.

FIGURA 15 - COBERTURA DE COPA OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DA COBERTURA DE COPA OBTIDA PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| NDDI | 19 | 30,13 | 32,94 | 0 | 100 | 0 | 19 | 53 |

FONTE: O autor (2023).

Souza e Vale (2019), pesquisaram sobre as limitações hídricas a perda de fitomassa foliar mais acentuada tornando o ambiente mais suscetível a incêndios florestais. Essa relação pode estar ligada a senescência foliar das espécies florestais do cerrado, que perdem as suas folhas para não perder mais água para o ambiente seco que pode justificar as correlações negativas entre CC onde existiu menor cobertura de copa no PNCG e assim ocorreu um aumento do NDDI ($r = -0,73$) e LST ($r = -0,24$). A ET aumentou com o aumento da cobertura de copa ($r = 0,42$). Assim a vegetação provavelmente respondeu fisiologicamente as variáveis de vulnerabilidade de seca e temperatura de superfície e apresentam perigo de incêndios florestais maiores.

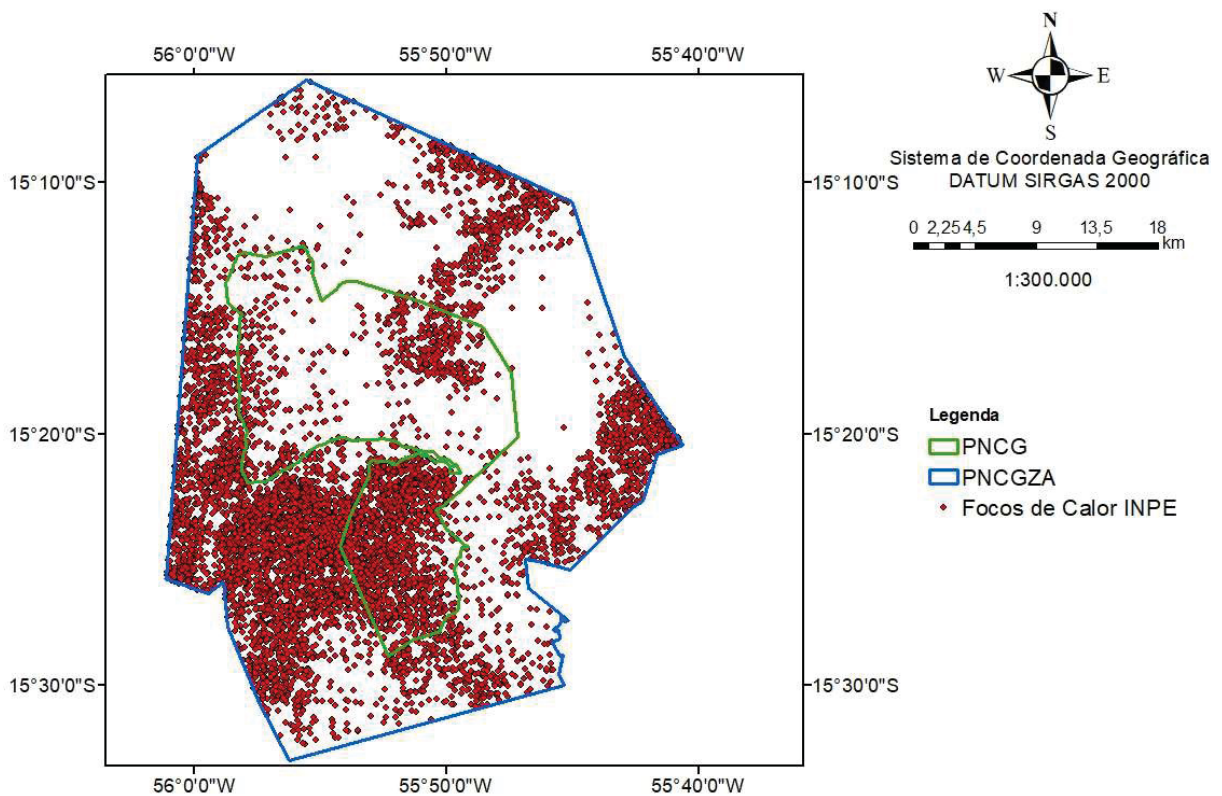
Segundo Freire (2005), matas ripárias e de galeria tem características lineares acompanhando os rios e córregos onde as copas abertas são atribuídas as matas ripárias e as copas fechadas das matas de galerias. O estudo realizado pelo autor também foi no PNCG e trouxe descrição da vegetação presente nos vales não apresentando senescência foliar do tipo caducifólia durante o período seco do ano. A estrutura arbórea sendo de 20 a 30 metros e cobertura de copa (CC) de 80 a 100%. Esses valores foram semelhantes aos encontrados no presente estudo onde em regiões de vale a CC foi alta e assim como a ET.

4.3 VARIÁVEIS DE VALIDAÇÃO

4.3.1 Focos de calor e densidade de Kernel

O parque teve 7514 focos de calor distribuídos dentro da unidade conservação e da área de amortecimentos (Figura 16). O maior número de focos de calor ficou concentrados no sudoeste do parque e da sua zona de influência.

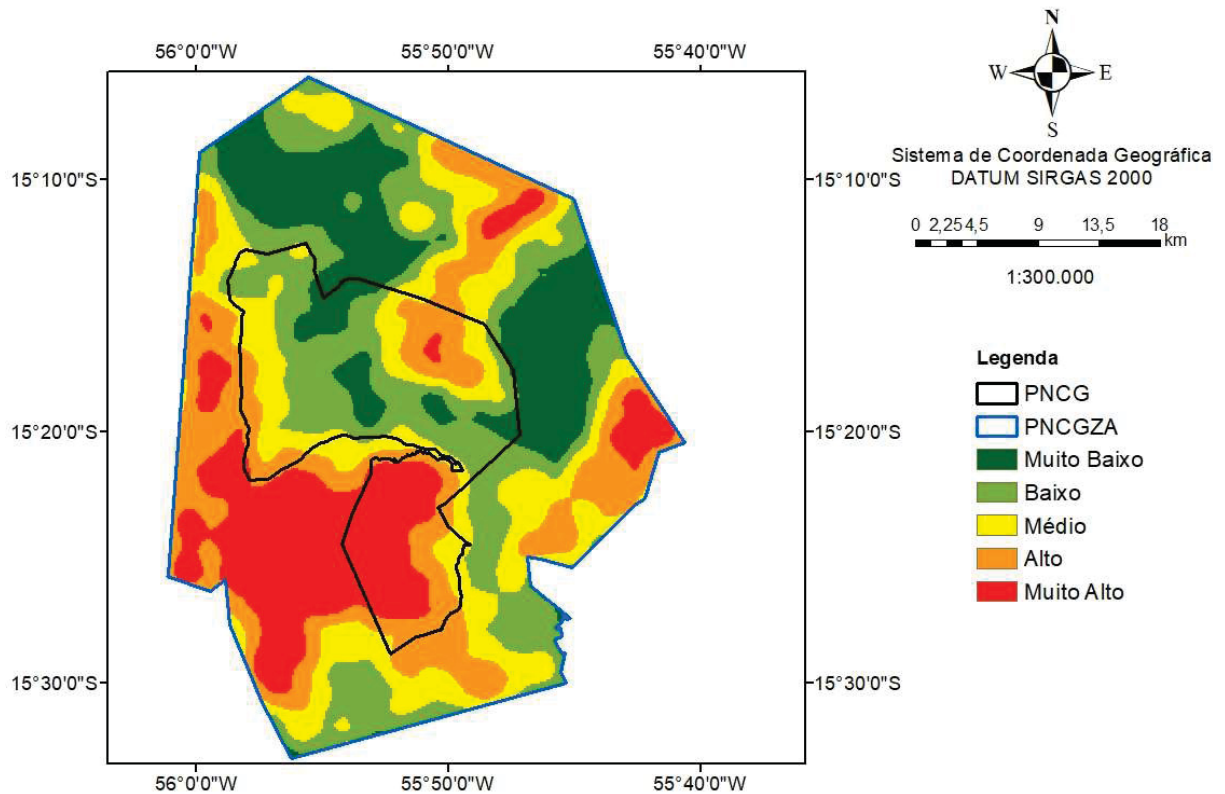
FIGURA 16 - FOCOS DE CALOR OBTIDOS PELO INPE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

A densidade de Kernel dos focos de calor confirmou que a maior concentração dos focos ficou a sudoeste do parque, onde obteve valores muito altos de pontos (Figura 17).

FIGURA 17 - DENSIDADE DE KERNEL OBTIDA PELO ARCGIS PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 - INDICADORES ESTATÍSTICOS DOS FOCOS DE CALOR OBTIDO PELO INPE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

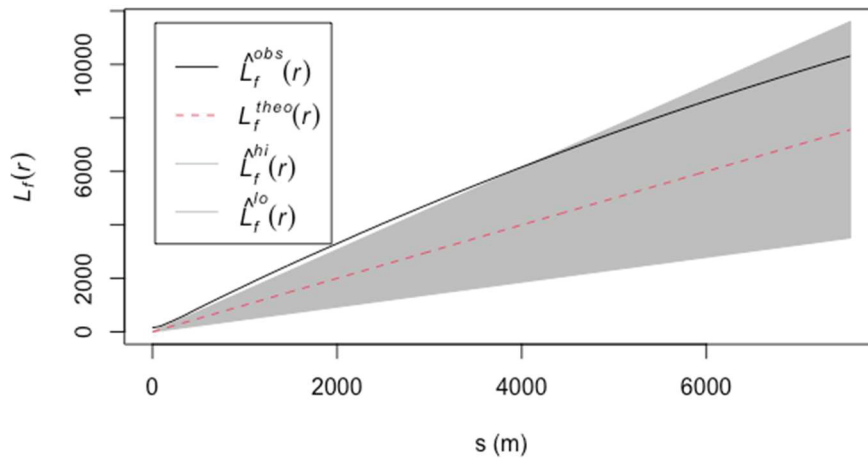
| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| FC | 3,29 | 5,85 | 6,33 | 0 | 29,38 | 0,99 | 3,23 | 9,06 |

FONTE: O autor (2023).

4.3.1.1 Distribuição espacial dos focos de calor

A função *K* de *Ripley* calculada para os focos de calor dentro no PNCG com os envelopes de confiança estão presentes no Gráfico 2. O limite de confiança superior e inferior em cinza indica o envelope e serve como referência para determinação da hipótese CAE. A linha tracejada vermelha é função *K* teórica e a linha preta é a função *K* de *Ripley* transformada observada nesse estudo.

GRÁFICO 2 - PADRÃO ESPACIAL OBSERVADO PARA FOCOS DE CALOR PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os focos de calor no PNCG tiveram padrões agregados até a distância s aproximada de 3000 metros e a partir desse ponto a hipótese nula foi aceita para CAE. Ambientes que são heterogêneos tendem a apresentar níveis mais elevados de agregação, enquanto áreas que são mais homogêneas tendem a ter níveis mais baixos de agregação (CONDIT *et al.*, 2000). O padrão agregado inicial foi encontrado em estudos semelhantes envolvendo padrões espaciais de árvores (HAASE *et al.*, 1997; BUSING, 1998; BAROT; GIGNOUX; MENAUT, 1999; GRAU, 2000; EDMAN; JONSSON, 2001).

Os níveis de agregação podem estar ligados à disponibilidade de recursos, principalmente nutrientes e água no solo (COLLINS; KLAHR, 1991; GRAU, 2000). A quantidade de umidade presente no material combustível tem um impacto significativo na sua inflamabilidade e é um reflexo das condições climáticas e meteorológicas locais. A inflamabilidade está relacionada com a facilidade de combustão e com o tempo que o material leva para incendiar (BEUTLING, 2005). A umidade presente também é um fator determinante na quantidade de calor necessário para iniciar a ignição. Combustíveis vivos e mortos apresentam diferentes mecanismos de retenção de água e, portanto, apresentam respostas distintas às variações climáticas (BATISTA, 1990).

O padrão espacial observado em árvores com diâmetro menor que 10 cm foi agregado até 50 m, aleatório de 50 a 110 m e uniforme a partir deste ponto (CAPRETZ *et al.*, 2012). Portanto, pelos resultados pode-se dizer que a umidade da

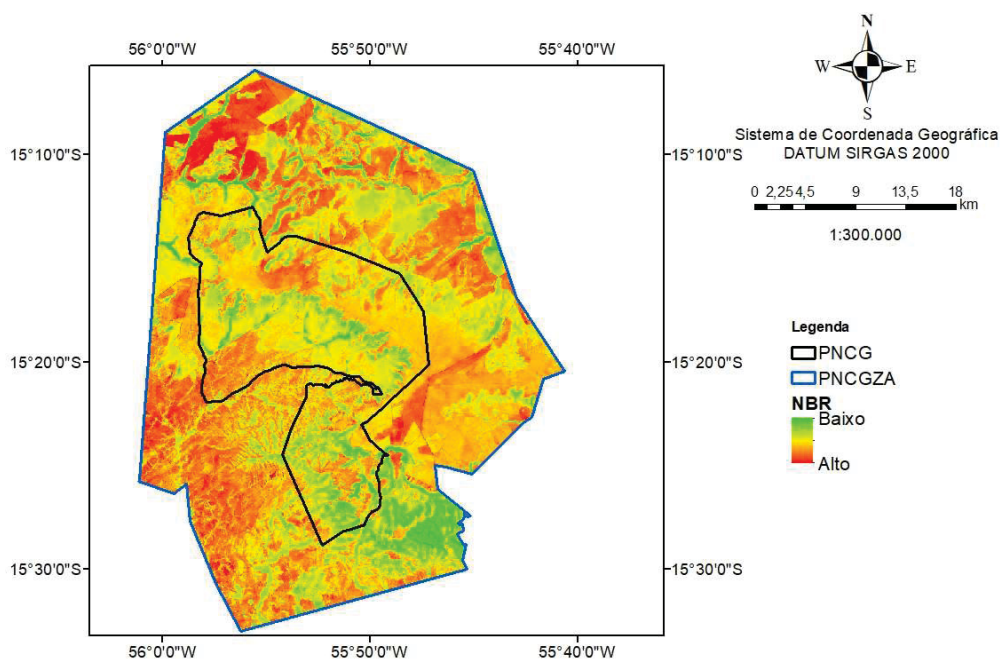
vegetação e dos combustíveis florestais está fortemente associada com os incêndios florestais, já que o conteúdo de umidade é a mais importante propriedade que controla a inflamabilidade dos combustíveis vivos e mortos e é o reflexo do clima e das condições atmosféricas.

A influência da umidade na vegetação é mais perceptível nos estratos mais baixos e menos denso considerados os principais responsáveis pela disseminação do fogo, uma vez que respondem mais rapidamente às variações meteorológicas. Além disso, a vegetação pode ser classificada com base no tempo de resposta ou "timelag", que se refere à quantidade de tempo necessária para que uma substância perca ou ganhe cerca de dois terços de sua umidade inicial. O "timelag" está diretamente relacionado com as dimensões da vegetação as partes mais finas como folhas e pequenos ramos variam o teor de umidade muito rapidamente (DEEMING, BURGAN, COHEN, 1977; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017).

4.3.2 Índice de queima normalizada (NBR)

O índice de queima normalizada variou de -0,14 a 0,79 (Figura 19). As respostas espectrais para o índice corroboraram com os dados encontrados Focos de Calor sendo os maiores valores na região sudoeste da área de estudo.

FIGURA 18 - ÍNDICE DE QUEIMA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

Os valores dos indicadores estatísticos incluindo desvio padrão (*sd*) e quartis (*q*) são apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 - INDICADORES ESTATÍSTICOS ÍNDICE DE QUEIMA NORMALIZADA OBTIDO PELO GEE PARA O PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Variável | Mediana | Média | sd | Mín. | Máx. | q.25 | q.50 | q.75 |
|----------|---------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| NBR | 19 | 0,29 | 0,16 | -0,13 | 0,77 | 0,17 | 0,27 | 0,38 |

FONTE: O autor (2023).

A temperatura de superfície também foi negativa com o NBR no trabalho de Lotufo *et al.* (2020), que avaliou índices espectrais e temperatura de superfície no parque estadual do Araguaia também no Mato Grosso. Essa relação negativa também foi atribuída para NBR e NDDI ($r = -0,95$) e pode ser explicado pela característica do cerrado constatado por Rios *et al.* (2018), que atribuiu a redução de disponibilidade de água a perdas de folhas para diminuir a perda d'água pela vegetação e como consequência ocorreu uma maior disponibilidade de material para incêndios florestais. Essa alta correlação entre NBR e NDDI indica que em lugares de seca anormal, moderada, severa, extrema e excepcional o perigo de incêndios florestais é maior.

A correlação positiva entre NBR e CC ($r = 0,77$) pode ser explicada pela presença de vegetação fotossinteticamente ativa principalmente em formações florestais de mata ripária foi o mesmo resultado encontrado por Lotufo *et al.* (2020). Vale lembrar que valores de NBR menores que -1 indicam respostas de queima ou incêndios, nesse sentido, quanto maior a CC maior também será o NBR, indicando maiores menores respostas espectrais referente a áreas queimadas. Assim áreas com baixas coberturas de copas resultam em perigo maior de incêndios florestais.

5 CONCLUSÕES

- Com o uso do GEE e dos dados do INPE foi possível obter-se boas correlações entre as variáveis Evapotranspiração, Exposição de vertente, Índice de Seca pela Diferença Normalizada, Cobertura de Copa, Temperatura de Superfície, Fluxo Radiativo Fotossintético Descendente de Superfície do Ar e o perigo de incêndios, representado pelos focos de calor e índice de queima normalizada.
- A fitofisionomia florestal se adapta a sazonalidade das condições meteorológicas do local. Essa adaptação pode elevar a suscetibilidade dos incêndios florestais. Desta forma, as fitofisionomias de savana ou com características menos densas apresentam maior de perigo de incêndios florestais, enquanto as mais densas mantêm umidade devido a uma série de fatores como relevo, proximidades de áreas úmidas e espécies vegetais caducifólias do bioma cerrado onde o parque está inserido e, conseqüentemente tem menor perigo de incêndios florestais. Além disso, a fitofisionomia florestal é um fator importante na análise dos incêndios florestais. Buscar entender como o padrão espacial dos focos de calor e as características da vegetação afetam a ocorrência de incêndios pode ser útil para o manejo e conservação da área;
- Variáveis como ET, NDDI e CC apresentam boa correlação com o perigo de incêndios florestais e devem ser incluídos em modelos matemáticos empíricos e avaliadas suas respectivas eficiências;
- O fato da heterogeneidade das árvores estarem ligadas ao padrão agregado dos focos de calor no PNCG, indica que há uma relação entre as características da vegetação e a ocorrência de incêndios florestais na área;

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Em trabalhos futuros pode-se testar mais variáveis de vulnerabilidade, validar os dados com informações de campo e propor um modelo matemático de perigo de incêndios florestais baseado em dados gratuitos disponíveis no GEE.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. *et al.* Zoneamento de risco de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros–GO. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1943–1957, 2015.
- ALLEN, R. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1–2, p. 27–41, 2000.
- ALLEN, R. G. *et al.* Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, 2007.
- ALLEN, R. G. *et al.* Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899–920, 2011.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Manual**. Idaho: Advanced training and user's Manual, 2002.
- AMANI, M. *et al.* Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326–5350, 2020.
- ARAÚJO, A. *et al.* Análise das mudanças de parâmetros biofísicos sobre o Nordeste Brasileiro de 2002 a 2011 com dados MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 589–599, 2018.
- ARMBRUST, M. *et al.* A view of cloud computing. **Communications of the ACM**, v. 53, n. 4, p. 50–58, 2010.
- AXIMOFF, I. A. *et al.* Ações Cooperativas para Prevenção e Combate a Incêndios Florestais em Área Protegida Urbana na Cidade do Rio de Janeiro. **revistaeletronica.icmbio.gov.br**, v. 10, n. 2, 2020.
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 1–2, p. 95–120, 1995.
- BARDAN, J. Forest fires in countries of northern, eastern and central Europe. In: T. van Nao (Org.); **Forest Fire Prevention and Control**. v. 7, p.21–36, 1982. Dordrecht: Springer Netherlands.
- BAROT S.; GIGNOUX J.; MENAUT J. Demography of o Savanna Palm Tree: predictions from comprehensive spatial pattern analyses. **Ecological Society of America**, v. 80, n. 6, p. 1987–2005, 1999.

BASTIAANSSEN, W. G. M. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, 1998.

BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 1990.

BATISTA, J. **Spatial dynamics of trees in a Brazilian Atlantic tropical forest under natural and managed conditions**, 1994. 306 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Washington, Boston, 1994.

BERNARDES, F. C. **Estudo do impacto de queimadas sobre indicadores de qualidade do solo em áreas de Cerrado**. 21f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Agronomia) – Setor Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 7º ed. Viçosa: UFV, 2005.

BEUTLING, A. **Caracterização para modelagem de material combustível superficial em reflorestamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BEZERRA, J. M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

BILLOR, N.; HADI, A. S.; VELLEMAN, P. F. BACON: blocked adaptive computationally efficient outlier nominators. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 34, n. 3, p. 279–298, 2000.

BISHT, G. *et al.* Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote sensing of Environment**, v. 97, p. 52–67, 2005.

BORDEST, S. M. L. **Representação Cartográfica da Alta Bacia do Rio Coxipó**. 1º ed. Cuiabá: Entrelinhas e EdUFMT, 2007.

BORGES, A.; MENDIONDO, E. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 11, n. 31, p. 297–300, 2007.

BOSSLE, R. C. **QGIS e geoprocessamento na prática**. 2º ed. São José dos Pinhais: Edição do autor, 2017.

BRASIL. **Cuiabá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. BRASIL: Projeto RADAMBRASIL, 1982.

BRAUN, E. H. G. Os Solos de Brasília e suas Possibilidades de Aproveitamento Agrícola. **Revista de Geografia**, v. 24, n. 1, p. 43–78, 1962.

BROWN, A. A.; DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. 2º ed. New York: McGraw Hill Book, 1973.

BURGAN, R. E.; SHASBY, M. B. Mapping Broad-Area Fire Potencial From Digital Fuel, Terrain, and Weather Data. **Journal of Forestry**, v. 82, n. 4, p. 228–231, 1984.

BUSING, R. T. Composition, structure and diversity of cove forest stands in the Great Smoky Mountains: a patch dynamics perspective. **Journal of Vegetation Science**, v. 9, n. 6, p. 881–890, 1998.

BUTT, A. *et al.* Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 2, p. 251–259, 2015.

CALABRI, G. Recent Evolution and Prospects for the Mediterranean Region. In: T. van Nao (Org.); **Forest fire prevention and control**. v. 7, p.113–126, 1982. Dordrecht: Springer Netherlands.

CAMELO, A. P. S.; SANCHES, K.; NAKAGOMI, B. Zoneamento de incêndios florestais na estação ecológica Águas Emendadas, Distrito Federal (Brasil). **Territorium**, n. 27(II), p. 67–79, 2020.

CAPRETZ, R. L. *et al.* Padrão espacial de quatro formações florestais do estado de São Paulo, através da função K de Ripley. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 551–565, 2012.

CASTAÑEDA, A. **Zonificación para el manejo de incendios en plantaciones forestales en Colombia**. 2º ed. Colombia: Boletín de Protección Forestal, 1997.

CASTILLO, M.; SAAVEDRA, J.; BRULL B. Severidad del fuego en los mega incendios forestales ocurridos en Chile, en 2017. Acciones para mejorar el sistema de protección. **Revista Territorium**, v. 26, n. 1, p. 5–18, 2019.

CECCATO, P. *et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, n. 1, p. 22–33, 2001.

CHANDLER, C.; CHENEY, P.; THOMAS, P.; TRABAUD, L.; WILLIAMS, D. **Fire in forestry: forest fire behavior and effects**. New York: John Wiley and Sons, 1983.

CHUVIECO, E. **Remote Sensing of Large Wildfires**. 1º ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, n. 2, p. 147–159, 1989.

CHUVIECO, E. *et al.* Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system Technologies. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 1, p. 46–58, 2010.

COLLINS, S. L.; KLAHR, S. C. Tree dispersion in oak-dominated forests along an environmental gradient. **Oecologia**, v. 86, n. 4, p. 471–477, 1991. Springer-Verlag.

COLOMBATI, M. **Guía Para La Prevención de los Incendios Florestales em Córdoba**. Cordoba: Agencia Córdoba Ambiente, 2007.

CONDIT, R. *et al.* Spatial Patterns in the Distribution of Tropical Tree Species. **Science**, v. 288, n. 5470, p. 1414–1418, 2000.

DEEMING, J. E.; BURGAN, R. E.; COHEN, J. D. **The National Fire Danger Rating System**. 84° ed. Ogden: USDA Forest Service Research Paper, 1977.

DAS NEVES, F. P. *et al.* Capacitação de Defesas Civas Municipais em Combate a Incêndios Florestais em Prol da Sustentabilidade. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 22, 2021.

DE SOUZA NETO, L. T. *et al.* O Uso do Mapa de Kernel como Subsídio para Identificação da Dispersão dos Focos de Queimadas no Município de Mossoró (RN). **Revista de Geografia**, v. 38, n. 2, p. 244–264, 2021.

DE SOUZA, P. A. L. *et al.* Avanços no monitoramento de queimadas realizado no INPE. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET. **Anais...**, 2004.

DIGGLE, P. J. **Statistical analysis of spatial point patterns**. London: Academic Press, 1983.

DROLET B. O sistema de proteção às florestas contra o fogo em Québec. SEMINÁRIO SUL-AMERICANO SOBRE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1.; REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA SIF/FUPEF/IPEF SOBRE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS. **Anais...** p.111–136, 1998. Belo Horizonte: Anais... Universidade Federal de Viçosa.

EDMAN, M.; JONSSON, B. G. Spatial pattern of downed logs and wood-decaying fungi in an old-growth *Picea abies* forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 12, n. 5, p. 609–620, 2001.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGIS Professional Gis for the desktop. 2019. USA: 10.8.

FERRAZ, S.; VETTORAZZI, C. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de um sistema de informações geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**, v. 53, p. 39–48, 1998.

FERREIRA, H. R. **Análise das Ocorrências de Incêndios em Vegetação na Região Metropolitana de Curitiba – PR**. 2021. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FREIRE, P. F. **Uso do Sistema de Informações Geográficas para o Mapeamento de Focos de Calor por Incêndios Florestais: um estudo de caso na área do parque nacional da Chapada dos Guimarães**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FULLER, M. **Forest fires: an introduction to wildland fire behavior, management, firefighting, and prevention**. 1º ed. New York: J. Wiley, 1991.

GAYLOR, H. P. **Wildfires: prevention and control**. 1º ed. Bowie: Brady Company, 1974.

GOLDAMMER, J. G. **Incêndios florestais: prevenção, controle e uso do fogo**. Irati: GTZ, 1982a.

GOLDAMMER, J. G. Forest fires problems in the Federal Republic of Germany. In: T. Van Nao (Org.); **Forest fire prevention and control**. p.143–147, 1982b. Dordrecht: Springer Netherlands.

GONTIJO, G. *et al.* Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** p.7966–7973, 2011. Curitiba: INPE. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Allan-Pereira/publication/266908152_Deteccao_de_queimadas_e_validacao_de_focos_de_calor_utilizando_produtos_de_Sensoriamento_Remoto/links/543e812f0cf2eaec07e6456f/Deteccao-de-queimadas-e-validacao-de-focos-de-calor-utilizando-produtos-de-Sensoriamento-Remoto.pdf. Acesso em: 3 jul. 2023.

GOOGLE, E. S. Introdução ao Google Earth Engine. Disponível em: <https://www.google.com/earth/outreach/learn/introduction-to-google-earth-engine/>. Acesso em 15 jun. 2023.

GOMES JUNIOR, D. **Ajuste de modelo de estimacão de radiação solar difusa e análise de dados de satélites para predição de evapotranspiração de referência**. 2021. 86 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

GOUMA, V.; CHRONOPOULOU-SERELI, A. Wildland Fire Danger Zoning - a Methodology. **International Journal of Wildland Fire**, v. 8, n. 1, p. 37, 1998.

GRAU, H. R. Regeneration patterns of *Cedrela lilloi* (Meliaceae) in northwestern Argentina subtropical montane forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, n. 2, p. 227–242, 2000.

GU, Y. *et al.* A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 6, p. L06407, 2007.

HAASE, P. *et al.* Spatial pattern in *Anthyllis cytisoides* shrubland on abandoned land in southeastern Spain. **Journal of Vegetation Science**, v. 8, n. 5, p. 627–634, 1997.

HANSEN, M. C. *et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013.

HAURWITZ, B.; AUSTIN, J. **Climatology**. 1º ed. New York: McGraw-Hill, 1944.

HEIKILLÄ, T. V.; GRÖNQVIST, R.; JURVÉLIUS, M. **Handbook on forest fire control**. Helsinki: Painotalo Miktor, 1993.

HEIKKILÄ, T. V.; GRÖNQVIST, R.; JURVÉLIUS, M. **Wildland fire management: handbook for trainers**. Helsinki: Ministry for Foreign Affairs of Finland, 2007.

HEYWOOD, I.; CORNELIUS, S.; CARVER, S. **An introduction to geographical information systems**. Harlow: Prentice Hall, 1998.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Plano de Ação Emergencial do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães. Chapada dos Guimarães: Disponível na sede administrativa do PNCG, 1995.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de Ocorrência de Incêndios Florestais**. Brasília, 2002.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Relatório de ocorrências de incêndios em Unidades de Conservação federais. 2007. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/servicos/relatorios/incendios-florestais/phocadownload/prevfogo/relatorios/relatorio_atividades/relatorio_prevfogo_2007.pdf. Acesso em: 2 jun. 2023.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Plano de manejo do Parque Nacional da chapada dos Guimarães, 2009.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil, 2023.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. BD Queimadas - Banco de queimadas, 2022.

IPEM - INSTITUTO DE PESOS E MEDIDAS. **Diretrizes para o Uso Sustentável do Entorno do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães**. Cuiabá, 2002.

JEMISON, G. M.; LINDENMUTH, A. W.; KEETCH, J. J. **Forest fire danger measurement in the Eastern United States (Handbook n. 1)**. 1º ed. Washington: U.S.D.A - United States Department of Agriculture, 1949.

JENSEN, J. R.; IM, J. Remote Sensing Change Detection in Urban Environments. **Geo-Spatial Technologies in Urban Environments**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

KENNEDY, R. *et al.* Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 691, 2018.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. **The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity**. 1999.

KHAN, M. S. *et al.* Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 252, p. 256–268, 2018.

KILIC, A. *et al.* Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. **Spring**, v. 21, n. 1, p. 73–88, 2011.

KJAERGAARD, J.; PLAUBORG, F. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, v. 95, p. 918–924, 2008.

LATORRE, M. L. *et al.* Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, n. 1, p. 91–121, 2003.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKO, Y. E.; ANDERSON, L. O. PRODUTOS PARA ECOSISTEMAS TERRESTRES - MODLAND. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP: A. Silva.Vieira Ed., 2007.

LEE, S. J. *et al.* On the relationships between satellite-based drought index and gross primary production in the North Korean croplands, 2000–2012. **Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 8, p. 790–799, 2016.

LEITE, M. R. **Sensoriamento Remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra/temperatura e albedo de superfície na Bacia do Rio Vieira no norte de Minas Gerais**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

LETTI, C. A. L. Mapas de zoneamento de risco de incêndios florestais: uma alternativa para o planejamento e controle em Santa Catarina. **Curso de Formação de Soldados**. Florianópolis: CEBM/SC, 2012.

LIMA, A. M. **Zoneamento de risco de incêndios no Distrito Federal**. 47 f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Setor Ciências Agrárias, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

LONGLEY, P. A. *et al.* **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3º ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LOTUFO, J. B. DA S. *et al.* Índices Espectrais e Temperatura de Superfície em Áreas Queimadas no Parque Estadual do Araguaia em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 648, 2020.

MACHADO NETO, A. P. **Diagnóstico dos Incêndios Florestais no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães no Período de 2005 a 2014**. 2016. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MAPBIOMAS. Coleção da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, 2022.

MARQUES, J. L.; SABÓIA, C. DE A. M.; DA SILVA, J. L. T. F. Uso do mapa de Declividade e do Modelo Digital de Elevação na análise do relevo do município de São Miguel do Tapuío – Piauí. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, n. 2, p. 97–107, 2019.

MARQUES, R.; SOBRINHO, W. Detecção das Ocorrências de Focos de Queimadas e Produção de Mapas de Calor em Timon, MA: Detection of burnt focuses and heat map. **Geonorte**, v. 11, n. 37, p. 210–228, 2020.

MCARTHUR, A. G. **Control burning in eucalypt forests**. Canberra: Forestry and Timber Bureau, Commonwealth of Australia, 1962.

MIRANDA, M. R. DA S. *et al.* DISTRIBUIÇÃO DE QUEIMADAS E MUDANÇAS NA COBERTURA VEGETAL E USO DA TERRA NO BIOMA PANTANAL, CÁCERES-BRASIL. **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 65, p. 91–108, 2018.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics: Plants, Animals, and the Atmosphere**. 1. ed. London: Edward Arnold, 1975.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3º ed. Viçosa: UFV, 2003.

MOREIRA, P. A. G.; MENDES, T. A.; SANTOS, D. F. DOS. Avaliação de locais potenciais para instalação de torres de observação para prevenção de risco de incêndios florestais. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1266–1282, 2020.

NETZBAND, M.; JÜRGENS, C. Urban and suburban areas as a research topic for remote sensing. **Remote sensing of urban and suburban areas**, p. 1–9, 2010.

NGUYEN, U. N. T.; PHAM, L. T. H.; DANG, T. D. An automatic water detection approach using Landsat 8 OLI and Google Earth Engine cloud computing to map lakes and reservoirs in New Zealand. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 4, p. 235, 2019.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 2008. 320 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA, B. S.; PEREIRA, G. Avaliação da evapotranspiração em diferentes usos do solo no Pantanal utilizando dados do sensor Terra-MODIS. Anais... SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. **Anais...** p.870–878, 2012. Bonito: INPE.

OLIVEIRA, L. P. **Uso e cobertura das terras no entorno da baía de todos os santos, Bahia, Brasil: mudanças dos padrões espaciais em séries temporais**, 2016. Mestrado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana.

OLIVEIRA, P. C. S. S.; FERREIRA, N. C.; SANTOS, A. M. Análise da pressão antrópica, evapotranspiração e temperatura em áreas especiais no sul da Amazonia brasileira. **Revista Geográfica Venezuelana**, v. 60, n. 1, p. 28–43, 2019.

PADOVANNI, N. **Análise espacial da temperatura e albedo de superfície em bacias hidrográficas**. 2017. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2017.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PEREIRA, A.; NOVA, N. V.; SEDIYAMA, G. **Evapo (transpi) ração**. 1º ed. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PETERS, A. *et al.* Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 731–740, 2017.

PIRES, E. Análise da temperatura de superfície do estado do Tocantins a partir do uso de geotecnologias. **Revista Interface**, n. 10, p. 133–144, 2015.

PRUDENTE, T. D. **Geotecnologias Aplicadas ao Mapeamento de Risco de Incêndio Florestal no Parque Nacional da chapada dos Veadeiros e Área de**

Entorno. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PYNE, S. J. **Introduction to wildland fire: fire management in the United States.** New York: John Wiley & Sons, 1984.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing. 2022. Austria: 4.1.3.

RAPHAEL, O. D. *et al.* Growth-stage-specific crop coefficient and consumptive use of *Capsicum chinense* using hydraulic weighing lysimeter. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 179–185, 2018.

REGO, F. C.; BOTELHO, H. S. **A técnica do fogo controlado.** Trás-os-montes: Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, 1990.

RESENDE BORGES, K. M. *et al.* Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento como Subsídio ao Manejo do Fogo e ao Combate aos Incêndios Florestais em Unidades de Conservação Federais. **Biodiversidade Brasileira - BioBrasil**, n. 2, p. 168–178, 2021.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: Ecologia e flora.** Planaltina: Embrapa, p. 151-212, 2008.

RIOS, M. N. DA S. *et al.* MUDANÇAS PÓS-FOGO NA FLORÍSTICA E ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO ARBÓREO-ARBUSTIVA DE UM CERRADO SENTIDO RESTRITO EM PLANALTINA, DF. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 469–482, 2018.

RIPLEY, B. D. Modelling Spatial Patterns. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 39, n. 2, p. 172–192, 1977.

RIPLEY, B. D. Tests of “Randomness” for Spatial Point Patterns. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 41, n. 3, p. 368–374, 1979.

ROERINK, G.; SU, Z.; EARTH, M. M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 25, n. 2, p. 147–157, 2000.

RUBIN, D. B. **Multiple imputation for nonresponse in surveys.** Hoboken: John Wiley & Sons, 1987.

RUDORFF, B.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientas no Brasil.** São José dos Campos: Arêntese, 2007.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017.

RUNNING, S. W. *et al.* Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 17, p. 3587–3620, 1994.

RUSSELL, G.; JARVIS, P. G.; MONTEITH, J. L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: G. RUSSELL; B. MARSHALL; P. G. JARVIS (Orgs.); **Plant canopies: their growth, form and function**. p.21–39, 1989. Cambridge: Cambridge University Press.

RYU, Y. *et al.* MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 812–825, 2018.

SALAS, J.; CHUVIECO, E. Geographic information systems for wildland fire risk mapping. **Wildfire**, v. 3, n. 2, p. 7–13, 1994.

SALES, G. M. *et al.* Emprego dos focos de calor na avaliação das queimadas e em incêndios florestais em Paragominas, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, v. 14, n. 1, p. 55–77, 2019.

SANTAELLA, L. A tecnocultura atual e suas tendências futuras. **Signo y Pensamiento**, v. 31, n. 60, p. 30–43, 2012.

SANTOS, C. A. C. **Estimativa da evapotranspiração real diária através de análises micrometeorológicas e de sensoriamento remoto**. 2009. 134 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SANTOS, D. **Monitoramento e modelagem de processos hidrológicos como base para a gestão de recursos hídricos em região semiárida**. 2018. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

SARAIVA, M. *et al.* Automatic Mapping of Center Pivot Irrigation Systems from Satellite Images Using Deep Learning. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 558, 2020.

SCHAFER, J. L. Multiple imputation: a primer. **Statistical Methods in Medical Research**, v. 8, n. 1, p. 3–15, 1999.

SCHAFER, J. L.; GRAHAM, J. W. Missing data: Our view of the state of the art. **Psychological Methods**, v. 7, n. 2, p. 147–177, 2002.

SCHOLTEN, H.; LEPPER M. J. C. The benefits of the application of geographical information systems in public and environmental health. **Quarterly Report**, n. 44, p. 160–170, 1991.

SEPLAG – SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE MATO GROSSO. Zoneamento Socioecológico e Econômico de Mato Grosso, 2018.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Incêndios Florestais. 2015. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/incendios-florestais>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SILVA, J. X. DA; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento & Análise Ambiental: aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

SILVA JUNIOR, C. H. L. *et al.* Dinâmica das Queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 35, p. 1–14, 2018.

SOARES, R. V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF, 1985.

SOARES, R. V. Perfil dos incêndios florestais no Brasil, de 1984 a 1987: relatório final. **Floresta**, v. 18, n. 1/2, 1989.

SOARES, R. V. **Ação Ambiental**. Viçosa, 2000.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Manual de prevenção e combate a incêndios florestais**. 2º ed. Curitiba: Convênio LAP/FUPEF, 1997.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais: Controle, efeitos e uso do fogo**. 2º ed. Curitiba: Editores independentes, 2017.

SOUSA, K. H. S.; BARBOSA, S. C. C.; PEREIRA, M. A. Zoneamento de Riscos de Incêndios Florestais no Parque Estadual Serra do Rola Moça–MG. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39536–39554, 2021.

SOUZA, M. A.; VALE, A. T. Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de Cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 181–192, 2019.

STEINKE, V. A.; STEINKE, E. T.; SAITO, C. H. Estimativa da temperatura de superfície em áreas urbanas em processo de consolidação: reflexões e experimento em Planaltina-DF. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, p. 37–56, 2010.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island**. Doctor of Philosophy, Vancouver: The University of British Columbia, 2011.

SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and earth system**, v. 6, n. 1, p. 85–99, 2002.

TAVAZOHI, E.; AHMADI, M. Assessment of Drought In The Zayandehroud Basin During 2000–2015 Using NDDI And Spi Indices. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 27, n. 4, p. 2332–2340, 2018.

TEIXEIRA, A.; BASTIAANSSEN, W.; MOURA, M. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1524–1537, 2008.

THEOBALD, D. M. *et al.* Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning. **PLOS ONE**, v. 10, n. 12, p. e0143619, 2015.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55, 1948.

TOMZHINSKI, G.; COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. C. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 201–211, 2011.

TORRES, F. T. P. *et al.* Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

TORRES, F. T. P. *et al.* Análise do Perfil dos Incêndios Florestais no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro e Entorno (MG). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1008–1021, 2018.

TRAGANOS, D. *et al.* Estimating Satellite-Derived Bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and Sentinel-2. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 859, 2018.

VÉLEZ, R. Forest fires in the Mediterranean region. In: T. van. NAO (Org.); **Forest fire prevention and control**. p.37–51, 1982. Dordrecht: Springer Netherlands.

VÉLEZ, RICARDO. **La defensa contra Incêndios Forestales: Fundamentos y Experiencias**. Espanha: Mc Graw Hill, 2000.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. **Remote sensing of environment**, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.

WAN, Z.; HOOK, S.; HULLEY, G. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 25. set. 2021.

WAN, Z.; LI, Z. L. A. Physics-based Algorithm for Retrieving Land-surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 4, p. 980–996, 1997. IEEE.

WARREN, M. S. *et al.* Procedimento para Alteração da Emissividade do Produto de Temperatura do MODIS-MOD11. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 4, n. 64, p. 465–474, 2012.

WHITE, L. A. S.; WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T. Modelagem Espacial de Risco de Incêndio Florestal para o Município de Inhambupe, Bahia, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 41, 2016.

XU, C. Y.; SINGH, V. P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. **Hydrological processes**, v. 15, n. 2, p. 305–319, 2001.

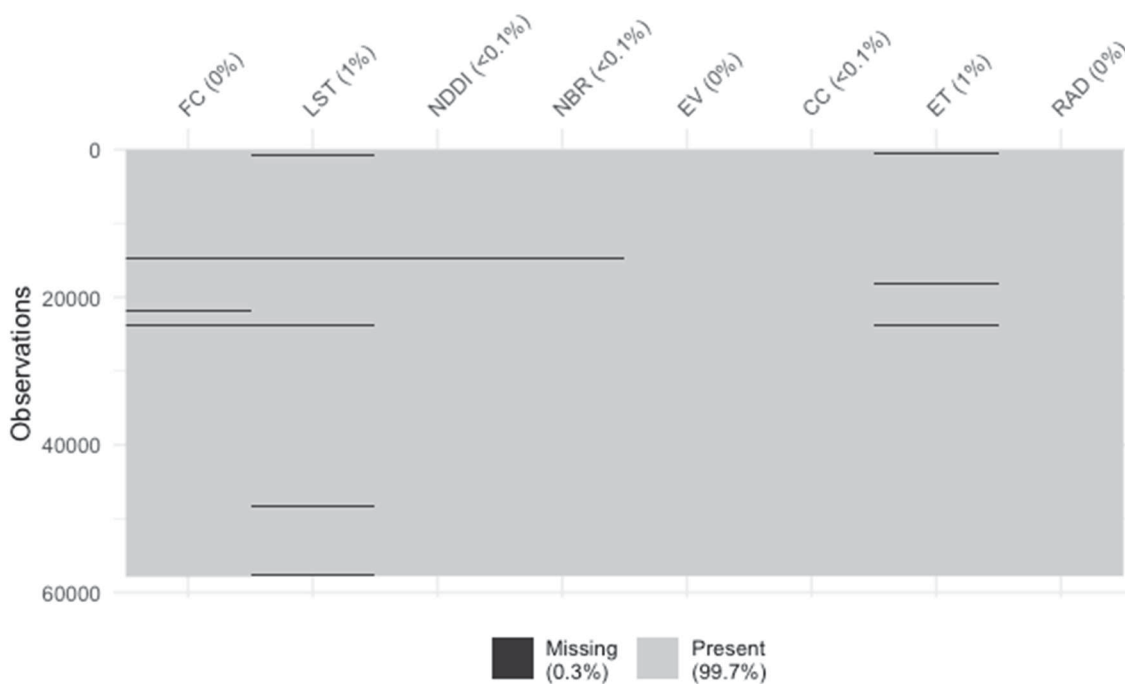
ZHANG, C. *et al.* AgKit4EE. A Toolkit for Agricultural Land Use Modeling of the Conterminous United States Based on Google Earth Engine. **Environmental Modelling & Software**, v. 129, p. 104694, 2020.

ZHOU, Y. *et al.* Continuous Monitoring of Lake Dynamics on the Mongolian Plateau Using all Available Landsat Imagery and Google Earth Engine. **Science of The Total Environment**, v. 689, p. 366–380, 2019.

APÊNDICE 1 – DADOS FALTANTES

Os dados faltantes e presente do estudo e seus respectivos percentuais encontram-se no Gráfico 3.

GRÁFICO 3 - DADOS FALTANTES DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 2 – IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA (IM)

As informações estatísticas antes e depois da imputação múltipla (IM) dos dados estão presentes da Tabela 11 e 12 respectivamente.

TABELA 11 - INDICADORES ESTATÍSTICOS ANTES DA IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Var | Falt | Med | média | sd | q.0 | q.25 | q.50 | q.75 | q.100 |
|-------------|------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| FC | 140 | 3.23 | 5.85 | 6.33 | 0.00 | 0.99 | 3.23 | 9.06 | 29.38 |
| LST | 768 | 15362.00 | 15353.09 | 72.02 | 15049.32 | 15322.19 | 15362.24 | 15399.23 | 15517.23 |
| NDDI | 19 | 1.28 | 1.51 | 1.55 | -23.56 | 0.84 | 1.28 | 1.97 | 32.40 |
| NBR | 19 | 0.27 | 0.29 | 0.16 | -0.14 | 0.17 | 0.27 | 0.38 | 0.77 |
| EV | 74 | 31.00 | 27.44 | 6.91 | 11.00 | 21.00 | 31.00 | 31.00 | 42.00 |
| CC | 19 | 19.00 | 30.13 | 32.94 | 0.00 | 0.00 | 19.00 | 53.00 | 100.00 |
| ET | 477 | 82.26 | 84.44 | 25.12 | 35.82 | 69.61 | 82.26 | 94.49 | 260.50 |
| RAD | 0 | 99.90 | 100.39 | 1.51 | 97.25 | 99.27 | 99.90 | 101.50 | 103.56 |

FONTE: O autor (2023).

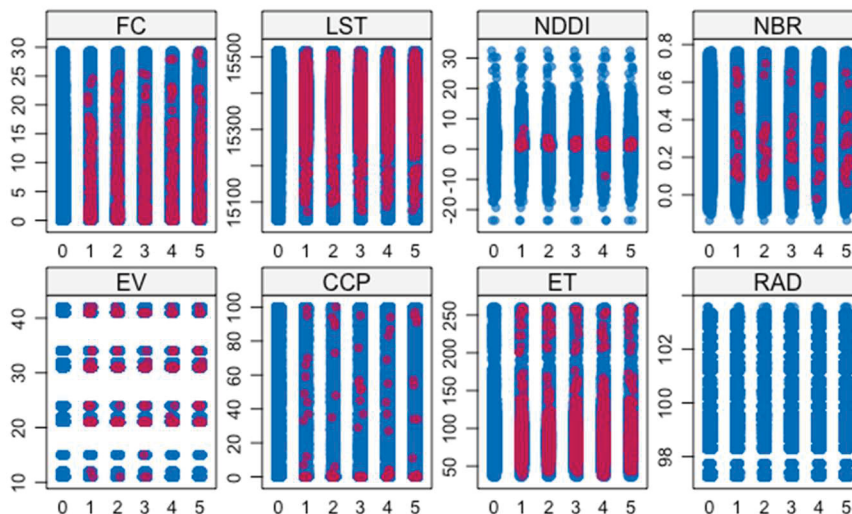
TABELA 12 - INDICADORES ESTATÍSTICOS APÓS IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

| Var | Falt | Med | média | sd | q.0 | q.25 | q.50 | q.75 | q.100 |
|-------------|------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| FC | 0 | 3.29 | 5.85 | 6.33 | 0.00 | 0.99 | 3.23 | 9.06 | 29.38 |
| LST | 0 | 15361.00 | 15353.20 | 71.98 | 15049.32 | 15322.21 | 15362.32 | 15399.31 | 15517.23 |
| NDDI | 0 | 1.29 | 1.51 | 1.55 | -23.56 | 0.84 | 1.28 | 1.97 | 32.40 |
| NBR | 0 | 0.28 | 0.29 | 0.16 | -0.14 | 0.17 | 0.27 | 0.38 | 0.77 |
| EV | 0 | 31.00 | 27.43 | 6.91 | 11.00 | 21.00 | 31.00 | 31.00 | 42.00 |
| CC | 0 | 20.00 | 30.13 | 32.95 | 0.00 | 0.00 | 19.00 | 53.00 | 100.00 |
| ET | 0 | 82.67 | 84.46 | 25.21 | 35.82 | 69.60 | 82.26 | 94.49 | 260.50 |
| RAD | 0 | 100.18 | 100.39 | 1.51 | 97.25 | 99.27 | 99.90 | 101.50 | 103.56 |

FONTE: O autor (2023).

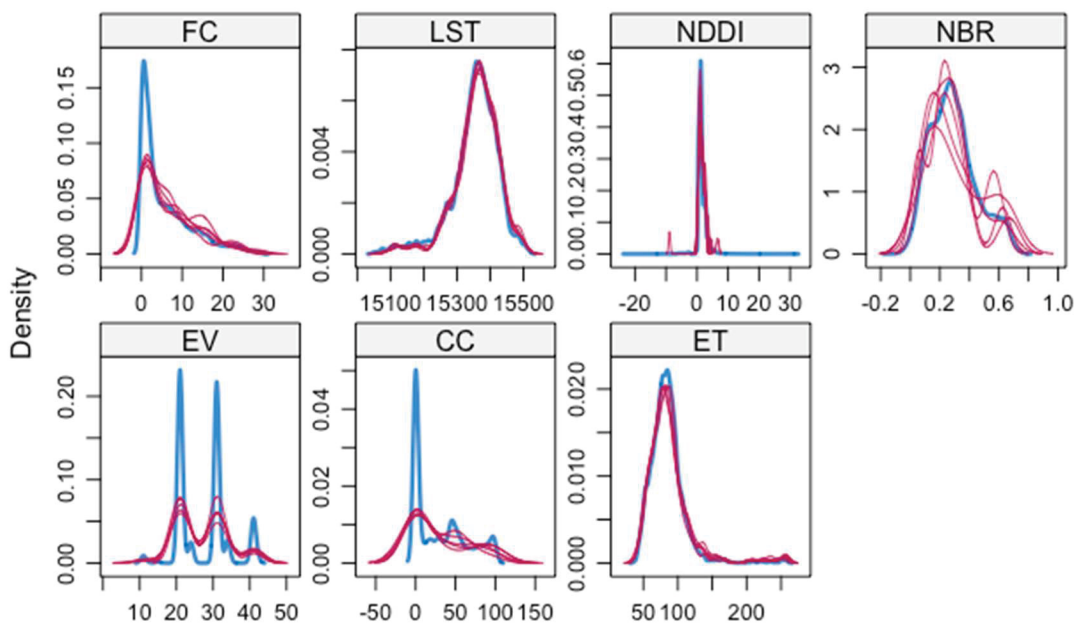
Os gráficos de imputações e de densidade dos dados imputados (vermelho) e dos existentes (azul) por IM Gráfico 4 e 5.

GRÁFICO 4 - INSERÇÕES DOS DADOS POR IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 5 - DENSIDADE DOS DADOS IMPUTADOS E EXISTENTES DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

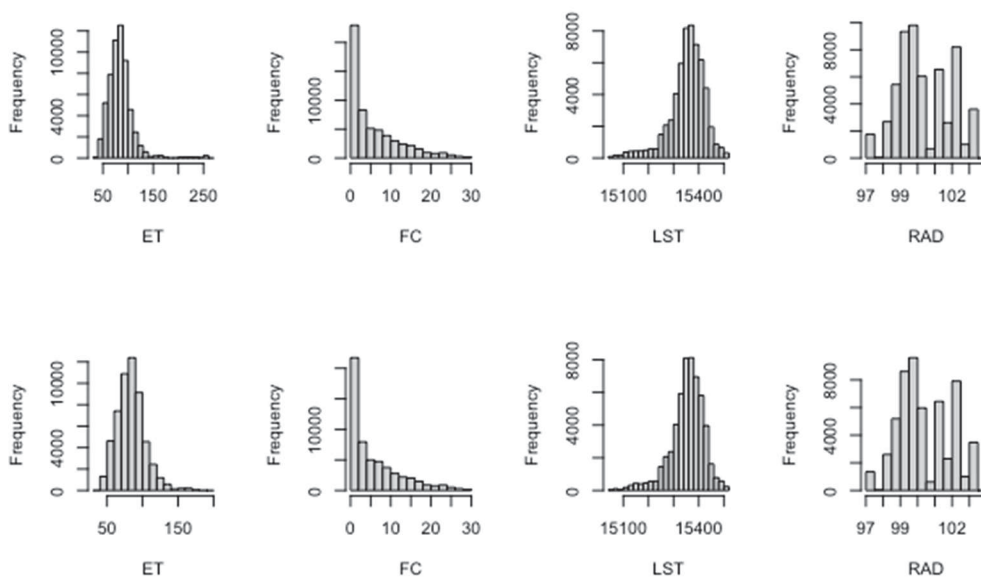


FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 3 – REMOÇÃO DE *OUTLIERS*

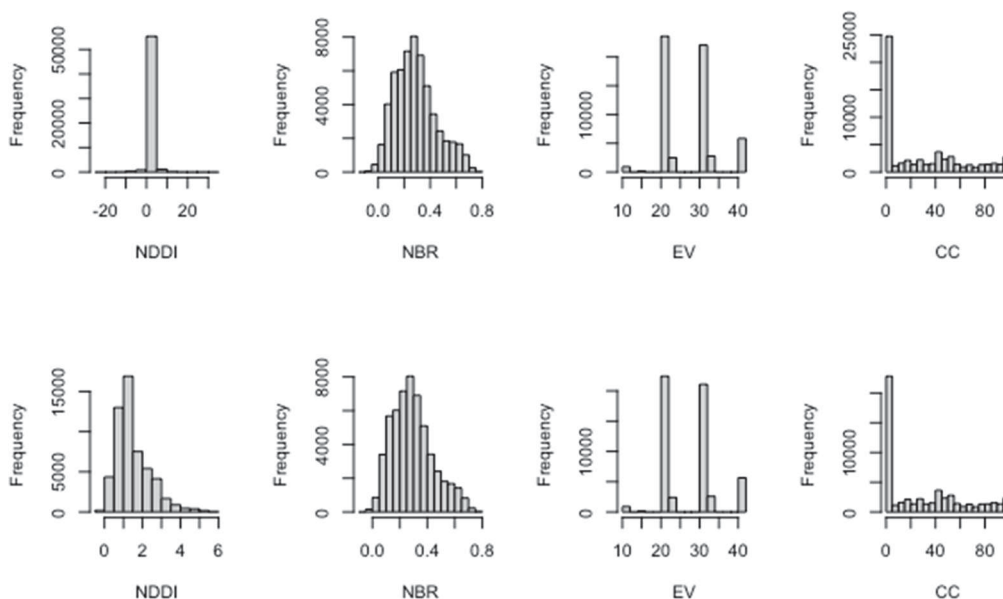
As informações gráficas da variabilidade e médias dos histogramas antes e depois da remoção dos *outliers* estão presentes nos Gráficos 6 e 7, respectivamente.

GRÁFICO 6 - HISTOGRAMAS ANTES DA REMOÇÃO DAS *OUTLIERS* DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 7 - HISTOGRAMAS APÓS A REMOÇÃO DAS *OUTLIERS* DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019

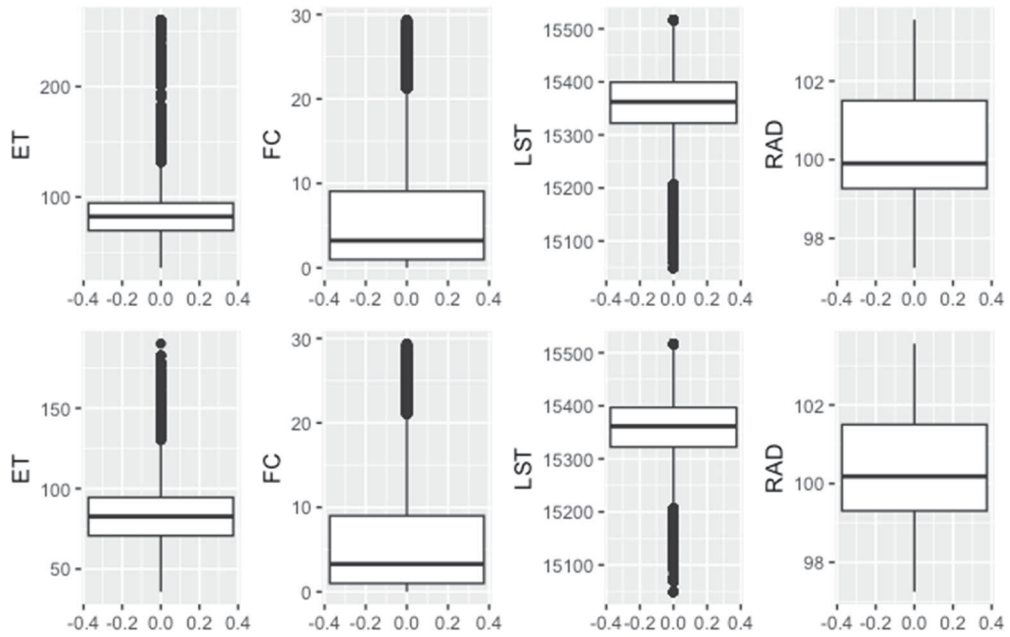


FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 4 – BOXPLOT

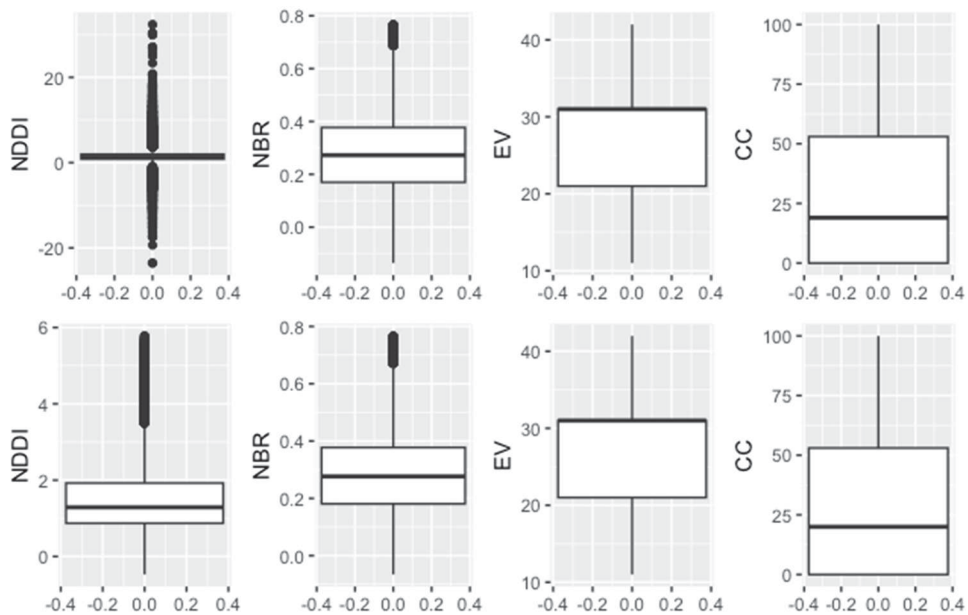
As informações estatísticas dos *boxplot* antes e depois da remoção dos *outliers* estão presentes nos Gráficos 8 e 9, respectivamente.

GRÁFICO 8 - BOXPLOT ANTES DA REMOÇÃO DAS OUTLIERS DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 9 - BOXPLOT APÓS A REMOÇÃO DAS OUTLIERS DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PNCG NO PERÍODO DE 2000 A 2019



FONTE: O autor (2023).

APÊNDICE 5 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO

TABELA 13 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE VULNERABILIDADE E DE VALIDAÇÃO DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DOS GUIMARÃES

| | ET | FC | LST | RAD | NDDI | NBR | EV | CC |
|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|
| ET | 1 | -0.23688 | -0.47304 | 0.175984 | -0.56291 | 0.607481 | 0.106277 | 0.424226 |
| FC | -0.23688 | 1 | 0.06191 | -0.45865 | 0.000774 | -0.05189 | -0.01082 | 0.033178 |
| LST | -0.47304 | 0.06191 | 1 | 0.140682 | 0.378167 | -0.4214 | 0.104587 | -0.23839 |
| RAD | 0.175984 | -0.45865 | 0.140682 | 1 | 0.055084 | -0.04322 | -0.02924 | -0.13667 |
| NDDI | -0.56291 | 0.000774 | 0.378167 | 0.055084 | 1 | -0.95049 | -0.14362 | -0.73344 |
| NBR | 0.607481 | -0.05189 | -0.4214 | -0.04322 | -0.95049 | 1 | 0.152591 | 0.773404 |
| EV | 0.106277 | -0.01082 | 0.104587 | -0.02924 | -0.14362 | 0.152591 | 1 | 0.215762 |
| CC | 0.424226 | 0.033178 | -0.23839 | -0.13667 | -0.73344 | 0.773404 | 0.215762 | 1 |

FONTE: O autor (2023).