



Universidade de Brasília
Curso de Graduação em Ciências Ambientais
Disciplina: Trabalho de Conclusão de Curso - Turma B
Docente: Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Francisca Deuzilene Nobre de Lima
Tatiana Harumi Tanaka da Anunciação

**SEVERIDADE DO INCÊNDIO E SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO NO
PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA ENTRE OS MESES DE ABRIL DE 2016 A
JUNHO DE 2017**

Brasília - DF, 2019.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Francisca Deuzilene Nobre de Lima
Tatiana Harumi Tanaka da Anunciação

**SEVERIDADE DO INCÊNDIO E SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO NO
PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA ENTRE OS MESES DE ABRIL DE 2016 A
JUNHO DE 2017**

Trabalho utilizado como Avaliação Final da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do Campus Darcy Ribeiro, na Universidade de Brasília.

Orientador: Gustavo Macedo de Mello Baptista

Brasília - DF, 2019.

LIMA, Francisca Deuzilene Nobre de.
ANUNCIACÃO, Tatiana Harumi Tanaka da.

Severidade do Incêndio e Sequestro Florestal de Carbono no Parque Nacional de Brasília entre os Meses de Abril de 2016 a Junho de 2017.

Orientador: Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista.

69 páginas.

Trabalho de Conclusão de Curso em Ciências Ambientais - Instituto de Geociências - Universidade de Brasília.

Brasília-DF, 2019.

1. Incêndio florestal; 2. Severidade do incêndio; 3. Sequestro florestal de carbono; 4. Rebrotas; 5. NBR; 6. CO₂flux; 7. PARNA Brasília.

SEVERIDADE DO INCÊNDIO E SEQUESTRO FLORESTAL DE CARBONO NO
PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA ENTRE OS MESES DE ABRIL DE 2016 A
JUNHO DE 2017

Francisca Deuzilene Nobre de Lima

Tatiana Harumi Tanaka da Anunciação

Prof. Orientador: Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Brasília-DF, 12 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador)
Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

Prof. Dr^a. Cristiane Gomes Barreto (Avaliadora)
Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília

**Dedicamos aos nossos pais, amigos,
filhos e namorados por todo o apoio
dado incondicionalmente...**

**“Nós somos as campeãs,
E nós continuaremos lutando,
Não tem vez para perdedores
Isso foi um desafio.
Agradecemos a todos vocês.
E não iremos fracassar...”**

Adaptado da música do Queen

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus pela saúde e toda coragem nos dada para a realização e desenvolvimento do projeto.

Agradecemos aos familiares, amigos e todos aqueles que contribuíram para que as pesquisas fossem realizadas.

Agradecemos à Universidade de Brasília pela oportunidade de ensino e conhecimento diversificados com qualidade durante toda a graduação.

Agradecemos ao nosso orientador Gustavo Baptista pelo apoio, dedicação, carinho, ensinamento, orientação para que o trabalho fosse realizado de forma dinâmica, proporcionando-nos conhecimentos multidisciplinares.

Agradecemos à professora Cristiane Gomes Barreto por disponibilizar parte do seu tempo para a avaliação do presente estudo.

Agradecemos a todos que por algum modo pode contribuir para a consumação deste trabalho.

RESUMO

Incêndios florestais vêm ocorrendo com grande intensidade no Cerrado brasileiro, e em Brasília a quantidade de queimadas que acontece especialmente no período seco é maior por conta da menor presença de umidade. Diferentes pesquisas vêm sendo realizadas com o uso do sensoriamento remoto para a verificação da intensidade dos incêndios ocorridos; estudo do carbono consumido pelas áreas florestais durante as queimadas, assim como antes e depois dos incêndios; análise da temperatura local com a passagem do fogo; o desenvolvimento da rebrota após o fim de determinado incêndio, verificando o comportamento desses fenômenos em regiões incendiadas. Para isso, utilizam-se índices espectrais capazes de contribuir para essas investigações, como: NBR (*Normalized Burn Ratio*), dBNR (*Differenced Normalized Burn Ratio*), RdNBR (*Relative Differenced Normalized Burn Ratio*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), PRI (*Photosynthetic Reflectance Index*), CO₂flux (*Índice de Eficiência do Processo de Sequestro de Carbono*). Sendo assim, o objetivo geral do estudo foi analisar eficiência do processo metodológico para o cálculo da severidade do incêndio e do sequestro florestal de carbono no Parque Nacional de Brasília referente ao incêndio do dia 18 de maio de 2016. Os objetivos específicos foram a verificação da temperatura local no dia do incêndio, o comportamento da rebrota e a análise das áreas queimadas e não queimadas por RdNBR. Os resultados mostraram que em relação ao sequestro de carbono foi possível identificar os valores de CO₂flux a partir da severidade da queimada e da alta rebrota. Em relação aos dados de severidade, houve algumas contradições nas representações na imagem do dia da queimada, como resultado invertido. Concluiu-se que o NBR pode ser falho para algumas análises, principalmente ao ser utilizado imagens com correção atmosférica, podendo alterar os resultados de forma expressiva.

Palavras-chave: Incêndio florestal. Severidade do incêndio. Sequestro florestal de carbono. Rebrota. NBR. CO₂flux. PARNA Brasília.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Piscina Pedreira no Parque Nacional de Brasília..... | 34 |
| Figura 2 - Trilha da Capivara à esquerda e Córrego Cristal Água à direita..... | 34 |
| Figura 3 - Área de Análise do Incêndio em 18/05/2016 no PARNA Brasília..... | 38 |
| Figura 4 - Representação do Transecto..... | 45 |
| Figura 5 - Transectos da Composição colorida R7G5B4 e Banda termal B10: (5a) R7G5B4, (5b) Banda termal B10..... | 45 |
| Figura 6 - Transectos da Composição colorida R7G5B4 e a imagem CO ₂ flux de 19/06/2016: (6a) R7G5B, (6b) CO ₂ flux de 19/06/2016..... | 48 |
| Figura 7 - Transecto na imagem CO ₂ flux _{18/05/2016} e sua comparação com a composição colorida R7G5B4: (7a) R7G5B4, (7b) CO ₂ flux de 19/06/2016..... | 50 |
| Figura 8 - Composição colorida R7G5B4 (8a) e os NBR de 19/06/2016 (8b) e 06/06/2017 (8c)..... | 52 |
| Figura 9 - Registro das imagens Zoom de R7G5B4 e RdNBR de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3..... | 59 |
| Figura 10 - DS Período 1..... | 60 |
| Figura 11 - DS Período 2..... | 60 |
| Figura 12 - DS Período 3..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Divisões dos comprimentos de ondas das cores da região do visível..... | 25 |
| Tabela 2 - Bandas do Landsat 8 OLI TIRS..... | 27 |
| Tabela 3 - Comportamento do índice de vegetação NDVI em relação à ação da vegetação em uma área..... | 29 |
| Tabela 4 - Imagens analisadas para a obtenção dos objetivos propostos..... | 39 |
| Tabela 5 - Períodos para os cálculos do NBR..... | 40 |
| Tabela 6 - Períodos para os cálculos do RdNBR..... | 41 |
| Tabela 7 - Períodos para os cálculos do RdNBRrebrotado..... | 41 |
| Tabela 8 - Períodos para os cálculos do NDVI, PRI, sPRI e CO ₂ flux..... | 43 |
| Tabela 9 - Níveis de severidade do incêndio analisados para RdNBR e NBR..... | 48 |
| Tabela 10 - RdNBR - 16/04/2016 a 18/05/2016 - período 1..... | 60 |
| Tabela 11 - RdNBR - 18/05/2016 a 19/06/2016 - período 2..... | 60 |
| Tabela 12 - RdNBR - 18/05/2016 a 06/06/2017 - período 3..... | 61 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Variação da temperatura em 18/05/2016..... | 46 |
| Gráfico 2 - Comportamento do sequestro florestal de carbono nos 4 dias..... | 47 |
| Gráfico 3 - Comportamento da severidade do incêndio para os 4 dias..... | 49 |
| Gráfico 4 - Transecto na imagem NBR e sua comparação colorida R7G5B4..... | 50 |
| Gráfico 5 - Análise da rebrota por NBR para os dias 19/06/2016 e 06/06/2017..... | 51 |
| Gráfico 6 - Relação entre NBR e CO ₂ flux pré-fogo - 16/04/2016..... | 53 |
| Gráfico 7 - Dispersão NBR e CO ₂ flux pré-fogo: 16/04/2016..... | 54 |
| Gráfico 8 - Relação entre NBR e CO ₂ flux pós-fogo - 18/05/2016..... | 55 |
| Gráfico 9 - Dispersão NBR e CO ₂ flux pós-fogo: 18/05/2016..... | 55 |
| Gráfico 10 - Relação entre NBR e CO ₂ flux na rebrota 1 - 19/06/2016..... | 56 |
| Gráfico 11 - Dispersão NBR e CO ₂ flux rebrota 1: 19/06/2016..... | 57 |
| Gráfico 12 - Relação entre NBR e CO ₂ flux na rebrota 2 - 06/06/2017..... | 57 |
| Gráfico 13 - Dispersão NBR e CO ₂ flux rebrota 2: 06/06/2017..... | 58 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA - Área de Proteção Ambiental

Blue - Azul

Cirrus - Nuvens atmosféricas

CPAC - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados

CO₂ - Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico

CO₂flux - Índice de Eficiência do Processo de Sequestro de Carbono

COP - Conferência das Partes

dNBR - *Differenced Normalized Burn Ratio* ou Índice Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada

DS - Density Slice

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENGESAT - Soluções em Imagens de Satélite e Geoprocessamento

ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*

GEE - Gases de Efeito Estufa

Green - Verde

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM - Instituto Brasília Ambiental

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NBR - *Normalized Burn Ratio* ou Índice de Queimada Normalizada

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NIR - Infravermelho Próximo

OLI - *Operational Terra Imager*

Pan - Pancromático

PARNA - Parque Nacional

PDOT - Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal

PIB - Produto Interno Bruto

PRI - *Photochemical Reflectance Index* ou Índice de Reflectância Fotoquímica

RA - Região Administrativa

RCEs - Reduções Certificadas de Emissões

RdNBR - *Relative Differenced Normalized Burn Ratio* ou Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada

Red - Vermelho

RGB - Composição colorida *Red* (Vermelho), *Green* (Verde) e *Blue* (Azul)

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

sPRI - *Scaled Photochemical Reflectance Index* ou Índice de Reflectância Fotoquímica com Valores Reescalados

SV - Sempre Verde

SWIR - Infravermelho de Ondas Curtas

TIROS - *Television IR Operational Satellite*

TIRS - *Thermal Infrared Sensor*

TM - *Thematic Mapper*

TOA - *Top of the Atmosphere* ou Topo da Atmosfera

UC - Unidade de Conservação

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

USGS - *United States Geological Survey*

UTM - *Universal Transversa de Mercator*

LISTA DE SÍMBOLOS

Km² - Quilômetros quadrados

S - Sul

W - Oeste

m - metros

% - Porcentagem

° - Graus

< - Menor que

°C - Graus Celsius

pH - potencial hidrogeniônico de uma solução

> - Maior que

≥ – Maior e igual

kW/m - Quilowatts horas por mês

μm - Micrômetro

mm - Milímetro

nm - Nanômetro ou nanómetro

p_{azul} - Reflectância nos comprimentos de onda azul

p_{verde} - Reflectância nos comprimentos de onda verde

ABS - Valor Absoluto

' - Minutos

'' - Segundos

K - Kelvin

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 20 |
| 2.1 Incêndios Florestais..... | 20 |
| 2.2 Severidade do Incêndio..... | 20 |
| 2.3 Sequestro Florestal de Carbono..... | 21 |
| 2.4 Rebrota..... | 23 |
| 2.5 Sensoriamento Remoto..... | 23 |
| 2.5.1 Imagens de Satélite..... | 26 |
| 2.5.1.1 Landsat 8 OLI TIRS..... | 26 |
| 2.5.2 Índices Espectrais..... | 28 |
| 2.5.2.1 NDVI | 28 |
| 2.5.2.2 PRI e sPRI | 29 |
| 2.5.2.3 Co ₂ flux | 30 |
| 2.5.2.4 NBR..... | 31 |
| 2.5.2.5 dNBR..... | 31 |
| 2.5.2.6 RdNBR..... | 32 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 33 |
| 3.1 Área de Estudo - Parque Nacional de Brasília..... | 33 |
| 3.1.1 Localização..... | 33 |
| 3.1.2 Uso e Ocupação do Solo..... | 34 |
| 3.1.3 Relevo..... | 35 |
| 3.1.4 Clima e Temperatura..... | 36 |
| 3.1.5 Vegetação..... | 36 |
| 3.1.6 Fauna..... | 37 |
| 3.1.7 Pedologia..... | 37 |
| 3.2 Região de Análise..... | 38 |
| 3.3 Pré-processamento de Imagens..... | 39 |
| 3.4 Cálculo da Severidade do Incêndio..... | 39 |
| 3.5 Cálculo da Rebrota..... | 41 |
| 3.6 Cálculo do Sequestro Florestal de Carbono..... | 42 |
| 3.7 Transformação dos Dados TIRS da Banda Termal B10 em Temperatura de Brilho (K) e Conversão em °C (Celsius)..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 3.8 Transecto e Density Slice..... | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 44 |
| 4.1 Análise da Temperatura..... | 45 |
| 4.2 Análise do Sequestro Florestal de Carbono (CO ₂ flux)..... | 46 |
| 4.3 Análise da Severidade do Incêndio (NBR)..... | 48 |
| 4.4 Análise da Rebrota..... | 50 |
| 4.5 Análise da Relação do CO ₂ flux com NBR..... | 52 |
| 4.5.1 NBR e CO ₂ flux pré-fogo - 16/04/2016..... | 53 |
| 4.5.2 NBR e CO ₂ flux pós-fogo - 18/05/2016..... | 54 |
| 4.5.3 NBR e CO ₂ flux rebrota 1 - 19/06/2016..... | 56 |
| 4.5.4 NBR e CO ₂ flux rebrota 2 - 06/06/2017..... | 57 |
| 4.6 Análise do Fatiamento da Severidade do Incêndio (RdNBR) por Density Slice..... | 58 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 61 |
| REFERÊNCIAS..... | 63 |
| APÊNDICE A - Registro das Imagens Zoom de R7G5B4 e RdNBR de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3..... | 68 |
| APÊNDICE B - Registro das Imagens Zoom de R7G5B4, Banda Termal B10 de 18/05/2016, NBR e CO ₂ flux de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3..... | 69 |

1 INTRODUÇÃO

Incêndios florestais estão provocando a preocupação das entidades governamentais, como também de pesquisadores e da população. A intensidade dos incêndios acaba sendo maior em períodos secos, com pouca chuva ou sem presença alguma de umidade, provocando ameaças à biodiversidade e descontrolando a homeostase ecológica.

Conforme mencionado por Eva & Fritz (2003), diferentes pesquisadores estão utilizando o sensoriamento remoto como meio de monitorar incêndios florestais, verificando a sua viabilidade.

Para que a realização do monitoramento e análises dos incêndios florestais utilizando o sensoriamento remoto seja eficiente, é preciso verificar a localização, o tamanho da área incendiada, os comportamentos meteorológicos, a presença da vegetação, estudar as possíveis causas, os materiais combustíveis, bem como o comportamento do fogo.

No Cerrado a presença de áreas agrícolas está sendo mais crescente o que ocasiona fortemente a maior presença de queimadas mesmo em áreas de conservação ou áreas destinadas à preservação ambiental. E nas áreas pequenas cuja presença de monoculturas é mais intensa, a probabilidade de serem mais afetadas por algum tipo de incêndio, seja ele ocasionado por ações antrópicas ou de forma natural, é muito maior.

No dia 18 de maio de 2016, no Parque Nacional de Brasília - PARNA Brasília, ocorreu um incêndio de grandes proporções, atingindo espécies de fauna e flora diversas, tendo sido controlado horas depois. Apesar das medidas de controle realizadas pelo corpo de bombeiros, aproximadamente 1 mês depois, em 16 de junho do ano corrente, por volta das 12h00, outra área do PARNA Brasília, próximo à região afetada no mês anterior, teve outro foco de incêndio o qual foi amenizado cerca de 4 horas após (GLOBO, 2016).

Por meio do uso de imagens de satélite, como o satélite Landsat 8 OLI TIRS, foi possível verificar a intensidade das chamas no incêndio ocorrido em 18 de maio de 2016 (USGS, 2019) e observar a segunda área a qual foi atingida pelo fogo no dia 16 de maio do mesmo ano (USGS, 2019), tendo sido bastante divulgado nos noticiários brasileiros.

Com o uso do sensoriamento remoto é possível estudar desastres ambientais com a utilização de ferramentas que contribuem para diferentes análises relacionadas a quantidade de carbono “sequestrado”, consumido pela vegetação (sequestro florestal de carbono), a intensidade da ação do fogo gerado por algum incêndio (Severidade do

incêndio), estimar a temperatura média da região atingida pelo fogo, dentre distintas outras investigações. Segundo UFRRJ (2019), essas ferramentas são os índices espectrais os quais são resultados de cálculos matemáticos entre os valores numéricos dos pixels de bandas de uma imagem de satélite.

Diversos índices espectrais são utilizados para o estudo de área queimadas, como NBR (Índice de Queimada Normalizada), dNBR (Índice Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada), RdNBR (Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada) os quais analisam a intensidade de uma região incendiada, por meio das faixas espectrais infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR); o índice CO₂flux que verifica a quantidade do sequestro de carbono pela vegetação e pode ser proposto para investigar o quão intenso é absorvido antes, durante e após a passagem do fogo nas áreas verdes.

Para a análise do CO₂flux, é preciso saber sobre o índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - calcula a ação fotossintética da vegetação; e conhecer o PRI (Photochemical Reflectance Index) - estuda a eficiência da luz ou a taxa de CO₂ absorvida pela vegetação na fotossíntese, verificando a produtividade e o estresse da vegetação. O CO₂flux é importante para a medição do processo de sequestro de carbono, assim como o processo fotossintético (BAPTISTA, 2004). A relação entre os dois (CO₂flux e NDVI) mostra a intensidade da queimada frente a vegetação, observando que a ação do fogo está relacionada com a perda de ação fotossintética das folhas.

Com isso, o objetivo geral do estudo foi analisar eficiência do processo metodológico para o cálculo da severidade do incêndio e do sequestro florestal de carbono pela vegetação referente ao incêndio de maio de 2016 no Parque Nacional de Brasília, por meio dos índices espectrais citados. Também, especificamente, houve a necessidade de verificar a temperatura local no momento do incêndio e o comportamento da rebrota na região afetada no período de aproximadamente um mês e um ano após a passagem do fogo. As análises foram realizadas durante quatro períodos: um mês anterior ao incêndio (16 de abril de 2016), no dia 18 de maio de 2016 (estudo de caso), 1 mês após o incêndio (19 de junho de 2016) e 1 ano após o incêndio analisado (06/06/2017), por meio dos índices NBR, dNBR, RdNBR e CO₂flux.

Para utilizar imagens de satélite com o intuito de atingir o objetivo desejado foi necessária a consideração sobre o comportamento do tempo, verificando a presença de nuvens, de modo a obter imagens com as menores interferências possíveis, e assim, impedir a realização de análises errôneas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Incêndios Florestais

De acordo com Soares (1984), ‘Incêndios florestais’ é um termo usado como “fogo incontrolado”, aumentando livremente e consumindo todo tipo de material combustível presente em florestas.

Para Beutling (2005), o fogo tem uma responsabilidade direta por danos econômicos e sociais, o qual ocorre com mais intensidade em áreas de culturas homogêneas. No Brasil, especialmente no período seco, com menor intensidade de chuvas, a presença do fogo é mais intensa quando ocasionada por alguma atividade antrópica ou por fatores naturais, enfatizando a preocupação em áreas protegidas. Ressaltando-se que nas florestas, bem como nas savanas, os incêndios são potenciais destruidores da biodiversidade. O teor de umidade de uma vegetação é o principal fator para a sua divisão entre material vivo e morto (BATISTA, 1990).

Segundo Rimmel & Perera (2001), é possível diferenciar regiões queimadas e não queimadas por meio do contraste entre os gradientes térmicos de satélites, como por exemplo, o Landsat: usando as imagens termais e do infravermelho médio, as quais são utilizadas para o mapeamento de áreas detectadas com incêndios.

Vale destacar que a eficiência do monitoramento de incêndios deve-se a informações obtidas sobre o ambiente, como: o tipo do material, as características climáticas, os dados sobre a restauração de forma natural, a fenologia da vegetação, localização, dentre outros (RAZAFIMPANILO et al, 1995). Salientando que o espaço-temporal da temperatura e da reflectância são fatores importantes os quais devem ser considerados nos algoritmos de verificação de incêndios com o uso das imagens de satélites (UGARTE et al, 2001).

2.2 Severidade do Incêndio

Diversas definições são ditas a respeito da severidade do incêndio. Uma delas é:

A severidade de um incêndio florestal é um termo descritivo que integra as mudanças físicas, químicas e biológicas que ocorreram em um local como resultado do incêndio (WHITE et al., 1996).

De forma mais simplificada, conforme Castillo S. et al. (2018, p. 10), “Corresponde à caracterização dos danos ao meio ambiente, em seus componentes bióticos e abióticos”.

A severidade pode ser avaliada por meio de sensores remotos, podendo avaliar os efeitos ocasionados pelo fogo como a perda da biomassa florestal, modificações na vegetação e no solo, dentre outras alterações ocorridas, os quais são identificados por diversos produtos de satélite, avaliando a qualidade dos dados e os processamentos realizados como correção atmosférica e geométrica, garantindo a melhor qualidade das informações obtidas de acordo com cada sensor (WHITE et al., 1996).

Segundo Fernandes (2004), severidade do incêndio é a interação da combustibilidade e a estrutura da vegetação que qualifica o grau de dificuldade de extinção de um incêndio e os danos ao estrato arbóreo.

A intensidade do fogo se comporta dada as características atribuídas, as quais seriam a carga e distribuição de combustível (vegetação), tanto vertical quanto horizontal, e por esta razão atrela-se à severidade da queimada.

Analisar a severidade do incêndio é importante por diversos fatores, inclusive para o mapeamento da avaliação pós-incêndio, objetivando a restauração, monitoramento de regeneração, proteção do solo contra a erosão, dentre outras ações. É importante mencionar que a análise da severidade gera dados valiosos para a construção de modelos probabilísticos utilizados em simulação de incêndio, baseado no estudo das relações entre a severidade e os parâmetros ambientais (KUSHLA E RIPPLE, 1997).

2.3 Sequestro Florestal de Carbono

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Convenção do Clima) trata sobre o sequestro de carbono de forma biológica: o modo natural de sequestrar o dióxido de carbono ou gás carbônico (CO₂) por meio da vegetação pelo processo fotossintético, permitindo a fixação do carbono em matéria lenhosa nas plantas. O sequestro é a forma de crescimento das plantas: quanto maior o tamanho das plantas, mais biomassa é acumulada e, posteriormente, mais carbono é fixado. Ressalta-se que a maior parte do carbono terrestre se encontra no solo florestal em virtude da decomposição da matéria-prima armazenada por séculos.

De acordo com Rezende (2001), a importância dada sobre o processo de sequestro florestal de carbono ocorreu na COP 3, em Quioto, no Japão, no ano de 1997, criando-se o Protocolo de Kyoto, com o intuito de conter, reverter e reduzir a quantidade de

CO₂ acumulada na atmosfera. O referido protocolo teve como meta a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para os países que faziam parte do acordo, em sua maioria eram países denominados desenvolvidos. A atividade de redução de GEE gerava uma certificação o qual possibilitava a venda como um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), ou seja, a venda como RCEs (Reduções Certificadas de Emissões) que contribuía para a mitigação das alterações climáticas (SEIFFERT, 2009).

Seiffert (2009) definiu dois tipos de atores no mercado de créditos de carbono: os compradores (empresas ou países que ainda emitem GEE acima das metas estabelecidas); e os vendedores (países, organizações que atingiram suas metas, sendo referências como redutores de GEEs ou sequestro de carbono). Salienta-se que o crédito de carbono se refere ao CO₂ resultante da multiplicação das toneladas emitidas de um determinado GEE (SEIFFERT, 2009).

YU (2004) diz que por se tratar de uma mitigação com menor custo para a diminuição do acúmulo de CO₂, o sequestro de carbono foi consagrado na Conferência de Kyoto. E o grande interesse voltado para as florestas tropicais úmidas (brasileiras) se deve às características de alta taxa de produtividade primária, onde:

na fase de crescimento que as árvores removem e retêm quantidades significativas de carbono da atmosfera e que reduzem gradativamente a taxas quase insignificantes quando já formadas (YU, 2004, p. 49).

Inicialmente o Protocolo de Kyoto considerou quatro formas de sequestro de carbono: reflorestamento; manejo florestal sustentável; conservação e proteção contra o desmatamento; e substituição do combustível fóssil por biomassa renovável para minimização das emissões. No entanto, somente a substituição do combustível fóssil seria permanente, pois as outras formas implicariam em maiores emissões de CO₂ (IPCC, 2001).

Diversos especialistas dizem que:

o maior efeito associado a florestas sobre a mudança climática seria a cessação do desmatamento tropical e não o reflorestamento e estimam uma emissão evitada de 1,6 bilhão de toneladas de carbono ao ano (YU, 2004, p. 62).

A minimização do desmatamento geraria benefícios como a preservação da biodiversidade, a proteção de bacias hidrográficas, bem como a conservação dos solos (YU, 2004).

2.4 Rebrotas

O processo de rebrotas após uma queimada varia conforme o bioma, as espécies envolvidas, a intensidade do fogo, dentre outros. Existem muitas espécies que acabam sendo perdidas por completo com a passagem do fogo e quando isso ocorre, o meio de promover a reprodução é por sementes (reprodução sexuada) (CIRNE & SCARANO, 1996; CASTRO-NEVES, 2007).

A rebrotas apresenta grande importância quando se trata de regeneração de uma área após a passagem do fogo e é mostrada por diferentes ecossistemas florestais tropicais (UHL et al 1981, 1982, KRUGER 1984B, ROUWN 1993, MAROD et al. 2002 E KENNARD et al. 2002). Como por exemplo, estudos mostraram que em Floresta do tipo Estacional Semidecidual a capacidade de rebrotas é grande por causa da presença de espécies favoráveis (CASTELANI & STUBBLEBINE 1993, HAYASHI et al 2001, RODRIGUES et al. 2004).

Coutinho (1990) verificou que após o incêndio, a rebrotas de espécies lenhosas de Cerrado ocorre de três maneiras distintas: copa, rizoma dos caules e estruturas subterrâneas. No Cerrado *stricto sensu*, a vegetação lenhosa apresentou 66% de rebrotas na parte do caule e ramos, enquanto que 20% apresentaram rebrotas na parte subterrânea e base da planta (SAITO, 1996). No caso de restinga, houve um aumento de 28% das estruturas reprodutivas clonais que surgiram do solo, após o fogo (CIRNE & SCARANO, 1996).

O fogo ao atingir a vegetação pode destruir completamente as estruturas mais altas das plantas e, conseqüentemente, para prosseguir existindo é preciso que tenha a capacidade de rebrotar por meio das estruturas basais, subterrâneas (reprodução assexuada) (MURAKAMI & KLINK, 1996).

Armando (1994) diz que o fogo reduz de forma drástica a taxa de crescimento, mesmo havendo alguma regeneração após o incêndio; ressaltando que no período seco a rebrotas ocorre mais vagarosamente que no período chuvoso (COCHRANE 1968, apud ARMANDO, 1994).

Nos estudos realizados por Sartorelli (2007), verificaram-se que algumas espécies apresentaram a velocidade de crescimento rápido após a passagem do incêndio, como as *P. rotundifolia* e *M. ligustroides* que são espécies consideradas sempre verdes (SV), podendo ser alternativas para a recuperação de áreas degradadas e além de terem sido floridas e frutíferas após a passagem do fogo.

2.5 Sensoriamento Remoto

Em 1960 originou-se o primeiro foguete, lançando satélites, na época em que aconteceu a corrida espacial, ocasionando vários lançamentos de foguetes com satélites, originando de forma acidental um dos primeiros sensores remotos, que foi o *TIROS (Television IR Operational Satellite)* lançado pelos EUA. O *TIROS* originava imagens de feições terrestres pouco nítidas e com cobertura de nuvens, mas com a capacidade de trazer a certeza de que conseguia captar imagens de fora da Terra. (MENESES et al., 2012).

Com o crescente uso de fotografias aéreas, houve o incentivo de melhorar o uso do sensoriamento remoto:

Somente após a Segunda Guerra Mundial, é que foi possível utilizar um sensor radiométrico capaz de detectar os sinais de radiação eletromagnética e um computador com capacidade de gravar e armazenar rapidamente os imensos dados adquiridos (LIU, 2007).

No Brasil, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) lançou em 1972 o primeiro satélite, sendo que antes mesmo do lançamento já havia uma grande pesquisa sobre o sensoriamento remoto e sua tecnologia, juntamente com a NASA, onde a Missão 96 era justamente um projeto, na qual realizou um levantamento espacial em Minas Gerais. (MENESES, cap. 1, p. 1, 2012).

O sensoriamento remoto tem como objetivo gerar imagens com dados, através das imagens de satélites, sem ter o necessário contato entre o objeto e o sensor, por mediações da radiação eletromagnética (onda e energia), conhecida como dois modelos, o modelo ondulatório e o modelo corpuscular, que explicam, sucessivamente, o comportamento de onda e energia (MENESES, cap. 1, p. 3, 2012).

A aplicação nas áreas de recursos naturais, mapeamentos temáticos, desmatamento, detecção de desastres naturais, monitoramento e afins, já é possível de ser realizada pelo fato da sua resolução espectral ultrapassar centenas de bandas e conseqüentemente sua resolução espacial ser maior que 1 metro (MENESES, cap. 1, p.1, 2012).

Para Meneses (2012), a identificação de um objeto na superfície da terra através do sensoriamento remoto é determinada por quatro tipos diferentes de mediações: área do campo de visada do sensor (resolução espacial); comprimento de onda das bandas (resolução espectral); valores numéricos da medida da radiância do alvo (resolução radiométrica); data que a imagem foi tomada (resolução temporal). As quatro interagem em conjunto.

O termo resolução espectral contém três medidas: número de bandas espectrais, largura em comprimento de ondas das bandas e posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético (MENESES, cap. 1, p. 27, 2012).

De acordo com Meneses (2012), as imagens são definidas abrangendo pequenos intervalos, chamados bandas espectrais.

A Tabela 1 mostra as divisões dos comprimentos e as cores da luz refletida na região do visível.

Tabela 1 - Divisões dos comprimentos de ondas das cores da região do visível

| Comprimento de onda (μm) | Cor da luz refletida |
|---|-----------------------------|
| 0,380-0,455 | Violeta |
| 0,455-0,482 | Azul |
| 0,482-0,487 | Azul - esverdeado |
| 0,487-0,493 | Azul - verde |
| 0,493-0,498 | Verde - azulado |
| 0,498-0,530 | Verde |
| 0,530-0,559 | Verde - amarelado |
| 0,559-0,571 | Amarelo - verde |
| 0,571-0,576 | Amarelo - esverdeado |
| 0,576-0,580 | Amarelo |
| 0,580-0,587 | Laranja - amarelado |
| 0,587-0,597 | Laranja |
| 0,597-0,617 | Laranja - avermelhado |
| 0,617-0,760 | Vermelho |

Fonte: Adaptado de Meneses (2012).

Na banda do infravermelho próximo, os níveis de cinza se dão à alta reflectância da vegetação nesse comprimento de onda. As faces frontais mostram níveis de cinza claro, obtendo contraste entre as faces que favorecem a visualização em 3D (Meneses et al., 2012). Essas cores em tons de cinza indicam a variação de vegetação. Quanto mais claro o tom de cinza, indica que maior a densidade de vegetação. E quanto mais escuro, pode indicar tanto a falta de vegetação ou corpos d'água, solos expostos ou nuvens.

A faixa do visível (0.45-0.76 mm) é muito usada no sensoriamento remoto pelo fato de ser a região do espectro com mais alta intensidade de fluxo radiante, que ocasiona a

passagem de uma grande quantidade de radiação. Responsável pelos pigmentos da vegetação.

Segundo Meneses (2012), a vegetação, a principal banda de absorção está centrada em 650 nm, região visível da luz vermelha. Realizando a divisão da banda 4 pela banda 3 os pixels situados nas áreas com vegetação resultarão em valores bem maiores do que 1.

2.5.1 Imagens de Satélite

As imagens de satélite começaram a existir na década de 1960 quando equipamentos foram testados em aeronaves e, posteriormente, colocados em satélites, os quais foram nomeados como sensores imageadores devido a “cobertura do terreno ser feito ser feito na forma de varredura linear do terreno e não por um mecanismo de tomada instantânea de área, em quadro, como é feito com câmeras fotográficas”. Com isso, o dado obtido recebeu o nome de imagem, diferenciando de fotos aéreas por causa do processo de aquisição (MENESES, cap. 1, p. 2, 2012).

Segundo Meneses (2012), com o novo processo por sensores imageadores, foi possível obter imagens concomitantes em diversas faixas do espectro eletromagnético, além de mapear em um curto período de tempo toda a superfície da Terra, em virtude do satélite orbitar de forma contínua o planeta.

Sendo assim, podem-se detectar e fiscalizar as alterações que ocorrem na superfície da terra, tornando-se o motivo primordial para as imagens de satélites tornarem-se mais eficiente ferramenta para a utilização em aplicações que incorporam análises ambientais dos diversos ecossistemas terrestres (MENESES, cap. 1, p. 2, 2012).

2.5.1.1 Landsat 8 OLI TIRS

O satélite Landsat 8 OLI TIRS foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 operando com os instrumentos OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor). As imagens são ortorretificadas, apresentando resolução espacial de imagens pancromáticas de 15 metros, imagens multiespectrais de 30 metros (região do visível, NIR, SWIR) e termais de 100 metros reamostradas para 30 m, conforme a Tabela 4 (NASA, 2019).

Segundo NASA (2013, apud EMBRAPA, 2019), o sensor TIRS contém bandas espectrais na faixa do infravermelho termal, oferecendo a continuidade da aquisição de dados obtidos pela banda 6 do TM e ETM+. Os dados do sensor TIRS apresentam uma

resolução espacial de 100m, com resolução radiométrica de 12 bits e correção com os dados oriundos do sensor OLI.

O OLI coleta dados para bandas espectrais de infravermelho visível, infravermelho próximo e de ondas curtas, além de uma banda pancromática. Ele tem uma vida útil de cinco anos. O OLI fornece duas novas bandas espectrais, uma adaptada especialmente para detectar nuvens de cirrus e a outra para observações da zona costeira (NASA, 2019).

Segundo a NASA (2019), o Landsat 8 mede distintas faixas ao longo do espectro eletromagnético e possui 11 bandas (11 faixas). Os sensores RGB (4, 3 e 2) quando combinadas obtêm-se imagens em cores reais. Somente as bandas com comprimentos de onda muito curtos (1 a 4 e 8) detectam luz visível.

A Tabela 2 mostra mais detalhes sobre as 11 bandas do respectivo satélite, o qual será utilizado nas análises da severidade do incêndio e o sequestro de carbono para o presente estudo.

Tabela 2 - Bandas do Landsat 8 OLI TIRS

| Sensor | Bandas Espectrais | Resolução Espectral (μm) | Resolução Espacial | Uso Típico |
|--------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|--|
| OLI | B1 (Coastal/Aerosol) | 0.435 - 0.451 | 30 m | Estudos costeiros e aerossóis |
| OLI | B2 (Blue) | 0.452 - 0.512 | 30 m | Mapeamento batimétrico, distinção de solo da vegetação e vegetação decídua da conífera |
| OLI | B3 (Green) | 0.533 - 0.590 | 30 m | Ressalta o pico da vegetação e vigor das plantas |
| OLI | B4 (Red) | 0.636 - 0.673 | 30 m | Diferencia as encostas da vegetação |
| OLI | B5 (NIR) | 0.851 - 0.879 | 30 m | Enfatiza o conteúdo de biomassa e as linhas costeiras |
| OLI | B6 (SWIR-1) | 1.566 - 1.651 | 30 m | Distingue o teor de umidade no solo e na vegetação, penetra nuvens finas |
| OLI | B7 (SWIR-2) | 2.107 - 2.294 | 30 m | Melhor conteúdo de umidade do solo e da vegetação e penetração de nuvens finas |
| OLI | B8 (Pan) | 0.503 - 0.676 | 15 m | Definição de imagem mais nítida |
| OLI | B9 (Cirrus) | 1.363 - 1.384 | 30 m | Deteção aprimorada das nuvens Cirrus |

Tabela 2 - Bandas do Landsat 8 OLI TIRS

| Sensor | Bandas Espectrais | Resolução Espectral (μm) | Resolução Espacial | Uso Típico |
|--------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|---|
| TIRS | B10 (TIR-1) | 10.60 - 11.19 | 100 m | Mapeamento térmico e estimativa da umidade do solo |
| TIRS | B11 (TIR-2) | 11.50 - 12.51 | 100 m | Aprimorado mapeamento térmico e estimativa da umidade do solo |

Fonte: Adaptado da NASA (2013) e USGS (2019).

2.5.2 Índices Espectrais

Os índices espectrais utilizados no presente estudo serão para avaliar a severidade do incêndio com o uso dos índices NBR, dNBR e RdNBR; e o sequestro de carbono por meio do índice CO₂flux (RAHMAN et al., 2000) resultante do produto entre o NDVI (ROUSE et al., 1973) e o sPRI (SILVA & BAPTISTA, 2013) referente ao incêndio ocorrido em 18 de maio de 2016.

2.5.2.1 NDVI

O NDVI, em português, é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada aplicado para analisar a situação da vegetação em uma área por sensoriamento remoto, verificando a intensidade da ação clorofiliana em períodos distintos (ROUSE et al, 1973, apud ENGESAT, 2019).

Segundo Rouse et al. (1973, apud ENGESAT 2019), o NDVI utiliza duas bandas em sua composição para a realização do cálculo, resultando em imagem com valores entre -1 a 1. Quanto mais perto de 1, maior é a ação vegetativa na área do pixel e quanto mais próximo de zero (0) ou -1 significa que pode ser uma área edificada, ou com água, solo exposto, regiões com pouca ou nenhuma ação fotossintética.

A teoria diz que:

a vegetação, quanto mais ativa, mais absorve a luz solar na região do vermelho, no processo de trabalho da clorofila nos tecidos vegetais, deixando os valores digitais baixos da imagem de satélite no canal vermelho. Da mesma forma, as estruturas celulares das folhas provocam uma forte reflexão da luz solar na região do Infravermelho próximo (...) deixando os valores digitais altos da imagem de satélite na faixa do infravermelho (ENGESAT, 2019).

O índice de vegetação NDVI é a combinação das bandas na região do vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR), calculado por meio da divisão entre a diferença entre o NIR e o Red pelo somatório das duas bandas, representado pela Equação 1.

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

Onde:

NIR - Infravermelho próximo

Red - Região do Vermelho

De acordo com Meneses et al. (2012), o NDVI pode sofrer menos influência das alterações das condições climáticas, tornando o índice espectral bem apropriado ao se comparar uma mesma região ao longo do tempo.

O comportamento do índice de vegetação NDVI é diferente de acordo com o comportamento da atividade clorofiliana na região (ENGESAT, 2019), conforme visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Comportamento do índice de vegetação NDVI em relação à ação da vegetação em uma área

| Comportamento do NDVI | | | |
|---|------------------------|--|------------------------|
| Área de forte atividade clorofiliana | Numerador | Infra Vermelho (alto) – Vermelho (baixo) | Valor resultante alto |
| | Denominador | Infra Vermelho (alto) + Vermelho (baixo) | Valor resultante alto |
| | Resultado Final | NDVI => Valor resultante sobe em direção a 1 | |
| Área de baixa atividade clorofiliana | Numerador | Infra Vermelho (baixo) – Vermelho (alto) | Valor resultante baixo |
| | Denominador | Infra Vermelho (baixo) + Vermelho (alto) | Valor resultante alto |
| | Resultado Final | NDVI => Valor resultante desce em direção a -1 | |

Fonte: Adaptado do ENGESAT (2019).

2.5.2.2 PRI e sPRI

O índice PRI denominado *Photochemical Reflectance Index*, em português “Índice de Reflectância Fotoquímica”, verifica a produtividade e o estresse da vegetação por meio da sensibilidade das diferenças nos pigmentos carotenoides, os quais mostram a eficiência do uso da luz durante o processo da fotossíntese, verificando a taxa de CO₂ contida na folha (CANAVESI et al., 2010).

Segundo Gamon et al. (1997), o PRI calcula a divisão da diferença entre a reflectância nos comprimentos de onda azul e verde pelo somatório entre estas duas

reflectâncias, conforme visto na Equação 2. Os valores ficam entre -1 a 1, cuja vegetação sadia apresenta valores entre -0.2 e 0.2.

$$PRI = \frac{(\rho_{azul} - \rho_{verde})}{(\rho_{azul} + \rho_{verde})} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{azul} - Reflectância nos comprimentos de onda azul

ρ_{verde} - Reflectância nos comprimentos de onda verde

O sPRI é o mesmo índice PRI, porém com os valores reescalados para positivos (SILVA & BAPTISTA, 2013), normalizando as informações obtidas de “verdor” da vegetação e é utilizado para medir a eficiência do sequestro de carbono realizado pela vegetação (CO_2flux), de acordo com a Equação 3.

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (3)$$

2.5.2.3 CO_2flux

Conforme Rahman et al. (2000), o índice de vegetação NDVI é capaz de contribuir na estimativa do valor de fluxo de carbono pela vegetação e que o PRI, segundo Baptista (2003), pode estar correlacionado com as taxas de fotossíntese. A interação desses dois índices espectrais podem determinar o fluxo de CO_2 (RAHMAN et al., 2000).

Segundo a nomenclatura dada por Baptista (2003) do Índice de Eficiência do Processo de Sequestro de Carbono - CO_2flux e proposto por Rahman et al. (2000), o presente índice baseado na integração do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), com o sPRI (Índice de Reflectância Fotoquímica reescalado para valores positivos), mede a eficiência do sequestro de carbono do fluxo de CO_2 em cada pixel da imagem.

O cálculo do sequestro de carbono pela vegetação é o produto do resultado do sPRI (reescalado para valores positivos) pelo NDVI (ROUSE et al., 1973) de acordo com a Equação 4.

$$CO_2flux = (NDVI \times sPRI) \quad (4)$$

Onde:

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

2.5.2.4 NBR

O NBR (Índice de Queimada Normalizada) é um índice espectral designado para detectar áreas queimadas e severidade do fogo, tendo sido o primeiro índice a inserir a região do infravermelho médio (KEY & BENSON, 1999). Ressalta-se que esta área do espectro é fortemente absorvida pela água contida no solo ou na vegetação e, conseqüentemente, com a presença de fogo e diminuição da água, a reflectância aumenta ocasionando em menores valores de NBR (CHUVIECO, 1997).

Segundo Key & Benson (2006), apud Castillo S. et al. (2018, p. 10), NBR é um índice que enfatiza a resposta espectral da vegetação afetada pelo fogo através do uso de bandas Landsat TM / ETM (infravermelho próximo e infravermelho médio), a fim de fornecer o melhor contraste entre a saúde fotossintética e a vegetação queimada.

Após um incêndio, a área queimada apresenta um comportamento espectral da vegetação diferenciado devido a perda da biomassa, o aumento da temperatura, a modificação na transpiração, permanência de resíduos queimados e estas modificações podem ser analisadas pelas faixas espectrais infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas (SWIR). Com a utilização dessas faixas espectrais, é feito o cálculo do índice NBR utilizado para medir a severidade do fogo pré-incêndio e pós-incêndio por meio da Equação 5.

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (5)$$

Onde:

NIR - Faixa do infravermelho próximo

SWIR - Faixa do infravermelho de ondas curtas

O índice NBR mostra que quanto mais próximas às assinaturas espectrais, menor a severidade. Quanto maiores as diferenças entre as firmas, maior a destruição das plantas e, portanto, é possível obter um maior grau de severidade do fogo durante as análises. À medida que o território se recupera, os níveis de reflectância da banda NIR aumentam e maior é a absorção no SWIR (CASTILLO S. et al., 2018).

2.5.2.5 dNBR

O Índice Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada - dNBR objetiva estimar a extensão e o grau de severidade na região queimada ocasionada na área de estudo, por meio da relação entre a diferença do valor de NBR antes do incêndio e o valor de NBR após o incêndio (KEY & BENSON, 2006), através da Equação 6.

$$dNBR = NBR_{pré-fogo} - NBR_{pós-fogo} \quad (6)$$

O dNBR pode identificar as áreas queimadas das áreas não queimadas e verificar as classes de severidade da queimada na vegetação (KEY & BENSON, 2006). Também utilizado para analisar a área após a rebrota (ROY et al., 2006).

2.5.2.6 RdNBR

De acordo com Miller e Thode (2007), o Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada (RdNBR) pode analisar de modo mais eficiente a severidade da área queimada, medindo a biomassa queimada em diversas fitofisionomias. O RdNBR faz uma relação entre o tipo da vegetação e a densidade da mesma onde aconteceu o incêndio, ao ser comparado com o dNBR.

A relativização do dNBR ocorreu por meio da raiz quadrada dos valores do NBR pré-incêndio dividido por 1000, onde foi encontrado o ajuste mais adequado em parcelas de vegetação escassa, não necessitando da calibração adicionais de campo para cada fogo (MILLER & THODE (2007), conforme a Equação 7.

$$RdNBR = \left(\frac{NBR_{pré-fogo} - NBR_{pós-fogo}}{\sqrt{ABS\left(\frac{NBR_{pré-fogo}}{1000}\right)}} \right) \quad (7)$$

A análise da eficiência da rebrota no Parque Nacional de Brasília foi feito calculando-se o RdNBR na região afetada após a passagem do fogo, verificando a quantificação da rebrota após o período da queimada. A equação 8 foi adaptada da anterior para a estimativa da rebrota, conforme visto abaixo.

$$RdNBR = \left(\frac{NBR_{pós-fogo} - NBR_{rebrota}}{\sqrt{ABS\left(\frac{NBR_{pós-fogo}}{1000}\right)}} \right) \quad (8)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo - Parque Nacional de Brasília

3.1.1 Localização

O Decreto nº 241, de 29 de novembro de 1961 criou o Parque Nacional de Brasília (PARNA Brasília), vide Lei nº 11.285, de 8 de março de 2006, subordinado pelo Ministério da Agricultura. Segundo a lei, a vegetação do PARNA Brasília é de extrema importância na proteção dos rios que abastecem o Distrito Federal, e que merecem cuidados e proteção pelo Poder Público (BRASIL, 1961). O nome foi definido pelo fato da área florestal encontrar-se nas proximidades de Brasília.

O PARNA Brasília apresenta uma extensão territorial de 42.389,01 hectares (423.8901 Km²), abrangendo as Regiões Administrativas (RAs) I (Brasília), V (Sobradinho) e IV (Brazlândia), além da cidade Padre Bernardo em Goiás (ICMBIO, 2019). Sua área de influência ocupa mais de 1/3 da área territorial do Distrito Federal e a maior parte de sua área urbana faz limite com o noroeste do Distrito Federal até o limite do sudoeste do estado de Goiás, exceto uma parte do rio Descoberto (IBAMA, 2019).

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2019), próximo ao PARNA Brasília está situada a APA de Cafuringa e a APA do Rio Descoberto. Na porção sudoeste podem ser verificadas as Regiões Administrativas de Ceilândia (RA IX), Taguatinga (RA III), Samambaia (RA XII), Recanto das Emas (RA XV), Gama (RA II) e Santa Maria (RA XIII), lugares com bastante conflitos socioambientais.

As Regiões Administrativas Brasília (RA I), Lago Paranoá (Lago Sul - RA XVIII e Lago Sul - RA XVI), Guará (RA X), Núcleo Bandeirante (RA VIII), Riacho Fundo (Riacho Fundo I - RA VII e Riacho Fundo II - RA XXI) e Park Way (RA XXIV) ficam na porção sul e sudeste, enquanto que Sobradinho localiza-se na parte leste onde também ficam as escarpas da chapada da Contagem (IBAMA, 2019).

O PARNA Brasília é uma Unidade de Conservação (UC) com o intuito de proteger os rios que fornecem água para a região, controlando as condições climáticas favoráveis e evitando erosões de solos. Por ser de interesse no âmbito turístico, a manutenção do local é feita por meio dos arrecadamentos de acesso ao parque, pelos quais ocorrem visitas às piscinas naturais (Figura 1) e pequenas trilhas (Figura 2), além da contemplação da paisagem e animais do Cerrado (ICMBIO, 2019).

Figura 1 - Piscina Pedreira no Parque Nacional de Brasília



Fonte: Acervo ICMBIO (2019).

Figura 2 - Trilha da Capivara à esquerda e Córrego Cristal Água à direita



Fonte: Acervo ICMBIO (2019).

Segundo o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2019), na lista de espécies ameaçadas em extinção na unidade de conservação, podem ser encontrados: Galito (*Alectrurus tricolor*), Tico-tico-do-mato (*Coryphospiza melanotis*), Gato-maracajá (*Leopardus pardalis mitis*), Tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga tridactyla*), Codorna-buraqueira (*Nothura minor*), Tatu-canastra (*Priodontes maximus*), Inhambu-carapé (*Taoniscus nanus*) e Águia-cinzenta (*Harpyhaliaetus coronatus*).

3.1.2 Uso e Ocupação do Solo

Na década de 1995, a Secretaria de Indústria e Comércio do Distrito Federal e a Codeplan estimaram um PIB (Produto Interno Bruto) de aproximadamente 8 bi de dólares, cujas atividades envolviam o comércio, indústria e agropecuária nas localizações de influência do Parque Nacional de Brasília (IBAMA, 2019).

A intensidade das atividades agrícolas havia aumentado entre os períodos de 1984 e 1995, alcançando um patamar de 90% em áreas cultivadas com a produção de

hortaliças. O restante da área de influência no PARNA Brasília é pela urbanização ou pequenos grupos rurais (IBAMA, 2019).

Para o Ibama (2019), conforme explicitado no plano de manejo do Parque Nacional de Brasília, vários projetos governamentais envolviam as áreas de influência do Parque, como: a Orla do Lago Paranoá e os planos inclusos no Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) voltado para o uso do solo, tais como: Programa de implantação do Centro Regional, Programa de Adensamento da Faixa de Domínio do Metrô, Programa de Regularização Fundiária nas áreas urbanas, Programa Desenvolvimento das Áreas Rurais do Distrito Federal, dentre outros.

3.1.3 Relevô

A região que envolve o presente parque abrange diferentes formas de relevo e estruturas geomorfológicas: Chapada da Contagem, Depressão do Paranoá e Encosta da Chapada da Contagem (IBAMA, 2019).

A Chapada da Contagem que envolve os limites do Parque encontra-se nas cotas de 1.279 m e 1.200 m. Ressalta-se que na Chapada da Contagem há a presença de cabeceiras de drenagem capazes de manter o nível freático, sendo de extrema importância para a hidrografia da região; além dos murunduns (origem biótica), os quais ocorrem em regiões onde não há drenagens no solo e existem as fraturas, fissuras e falhas (IBAMA, 2019).

Conforme o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2019), a área da Depressão do Paranoá tem grande influência sobre a região do Parque. Nela encontram-se relevo retilíneo-côncavo, encontrado em altitudes de 1.200 m e 1.007 m. Região suavemente ondulada, presença de interflúvios amplos e declividades entre 5 e 10°, representando no Parque as bacias dos Córregos do Acampamento, do Bananal, Milho Cozido, Vargem Grande e Santa Maria, tributários da Represa de Santa Maria. Há forte presença de intemperismo e colúvios enriquecidos em concreções lateríticas que formaram as cascalheiras no Parque, além de ser vulnerável à erosão quando não há vegetação.

Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (2019), a parte da Encosta da Chapada da Contagem na região do PARNA Brasília é encontrado na margem esquerda dos cursos médios e na porção inferior do ribeirão Três Barras, além dos ribeirões Tortinho e Torto. Nas margens do Três Barras observam-se os elementos sílticos e arenosos predominam sobre as ardósias, constatando os movimentos de

terra. No parque podem ser observadas diferentes níveis de quartzito alternados com metassiltitos, predominando areia e argila de tal forma que gera uma paisagem em degraus.

3.1.4 Clima e Temperatura

Pela posição geográfica do Distrito Federal, é considerado um clima como tropical, com elevadas temperaturas por mais da metade do ano, em consequência da dupla passagem do sol nessa área (IBAMA, 2019).

Para o Ibama (2019), o Parque Nacional de Brasília não tem estações meteorológicas no local, conseqüentemente não havendo uma coleta de dados local. Entretanto, a estação mais próxima é o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e o Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC) da Embrapa, que são utilizados dados desses locais para o Parque, com mais de 20 anos de coletas.

O relevo participa da influência sobre os aspectos térmicos e pluviométricos. As variações de temperatura nessas áreas é decorrente dos diferentes níveis altimétricos. Por não ser provido dos ventos oceânicos e pela continentalidade, a secura do ar e a falta de umidade são características desse clima savânico, o que agrava nos meses de Agosto e Setembro (IBAMA, 2019).

Segundo Köppen (1974), nas serras e chapadas do Distrito Federal, adentra-se no Tipo Climático - Cwb, que seria clima temperado úmido, com temperatura média mais fria sendo $< 18^{\circ}\text{C}$ e a temperatura média mais quente sendo em torno de 22°C (EMBRAPA, 2019). Estação seca com inverno e precipitação do mês mais úmido é maior que no mês seco. (IBAMA, 2019).

3.1.5 Vegetação

Segundo o Instituto Brasília Ambiental (2018), a vegetação do Cerrado apresenta uma grande riqueza florística, contendo 6.600 espécies em sua flora, sendo 40% das espécies arbóreas, endêmicas. Os fatores bióticos do Cerrado pode influenciar a distribuição de espécies ao longo do território. Como por exemplo, clima, fertilidade do solo, pH do solo, disponibilidade de água, sua geomorfologia e topografia e principalmente a frequência do fogo de forma natural ou antrópica.

Conforme o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2019), a vegetação do PARNA Brasília é composta por mata de galeria pantanosa, mata de galeria não pantanosa, vereda, Cerrado sensu stricto, cerradão, mata seca, campo sujo, campo limpo, campo rupestre, campo úmido e campo de murundus.

3.1.6 Fauna

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2019), o Cerrado contém 5% da biodiversidade da Terra, sendo considerada a savana mais rica do mundo, em contrapartida, é o bioma mais ameaçado do país.

O Cerrado contém 196 espécies de mamíferos, sendo 18 endêmicas; 856 espécies de aves, sendo 36 endêmicas; 253 espécies de répteis, sendo 24 endêmicas; 160 espécies de anfíbios, sendo 56 endêmicas e aproximadamente 780 espécies de peixes (IBRAM, 2018).

O PARNA Brasília apresenta diversas espécies raras ou ameaçadas de extinção, como:

lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), tatu-canastra (*Priodontes maximus*), tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga tridactyla*), jaguatirica (*Leopardus pardalis*), ouriço-caixeiro (*Coendou prehensilis*); além de espécies endêmicas como pequeno roedor (*Akodom lindberg*), gralha-do-campo (*Cyanocorax cristatellus*), papagaio-galego (*Alipiopsitta xanthops*) (ICMBIO, 2019).

Salientando-se que o parque também é composto por demais grupos taxonômicos, as quais não se encontram em estado de extinção: anfíbios, aves, mamíferos, peixes, répteis, além dos moluscos, crustáceos, insetos e pequenos organismos (ICMBIO, 2019).

3.1.7 Pedologia

Os tipos de solo encontrados no Parque Nacional de Brasília são os Latossolos, classificados em Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolos, solos Hidromórficos, separados em Gley Húmico, Gley Pouco Húmico e Solos Orgânicos, Laterita Hidromórfica (Plintossolo), Podzol Hidromórfico e Areias Quartzosas (IBAMA, 2019).

O Latossolo em geral é caracterizado por apresentar um pH ácido, entre 4.4 e 5.5, contendo baixos teores em cálcio e magnésio, além de ser carente em nitrogênio, fósforo, potássio e outros micronutrientes (IBAMA, 2019). Por ter um relevo plano ou suave ondulado, ocasiona a boa drenagem e tem baixa suscetibilidade de erosão.

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2019), o Cambissolo também apresenta os mesmos problemas do Latossolo, como o solo ácido, saturação de alumínio e poucos micronutrientes.

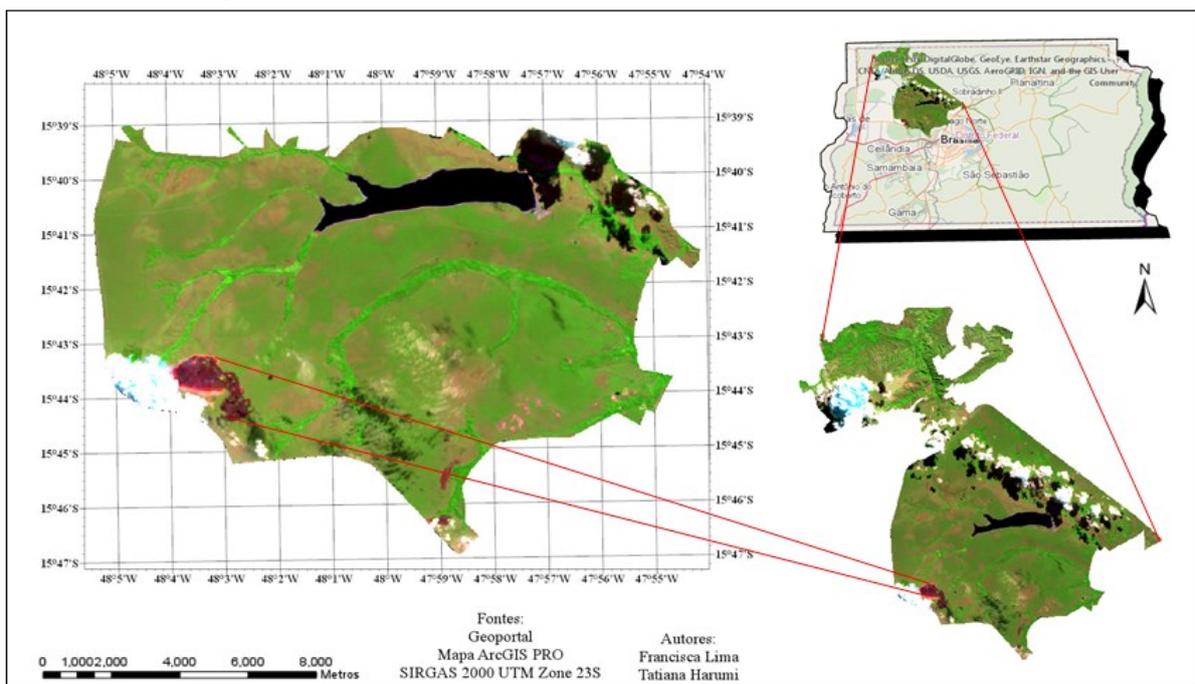
Os solos Hidromórficos, Plintossolos e Podzol Hidromórfico apresentam características como falta de fertilidade com alta acidez, mas contém teores médios de alumínio em relação ao Latossolo e Cambissolo. Pelo fato do nível freático permanecer boa parte do ano próximo à superfície, o acúmulo de matéria orgânica é presente nesses solos, gerando uma grande redução de ferro no perfil do solo (IBAMA, 2019).

No caso dos solos de Areias Quartzosas e Solos Litólicos, estes são extremamente pobres em micro e macronutrientes e sujeitos a erosão com facilidade.

3.2 Região de Análise

O estudo realizado no Parque Nacional de Brasília ocorreu na porção Sudoeste onde aconteceu o incêndio no dia 18 de maio de 2016 identificado pelo satélite Landsat 8 OLI TIRS, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Área de Análise do Incêndio em 18/05/2016 no PARNA Brasília



Fonte: Elaborado pelos autores.

Situada entre as coordenadas geográficas Latitude Sul ($15^{\circ}43'19''S$ $15^{\circ}44'24''S$) e Longitude Oeste ($48^{\circ}4'2''W$ $48^{\circ}2'32''W$), próximo à (FLONA) Floresta Nacional de Brasília, segundo ICMBIO (2019), como responsável pela proteção de uma

área do Cerrado de 9 mil hectares, além da nascente que irriga o reservatório Descoberto (abastece cerca de 70% do Distrito Federal).

3.3 Pré-processamento de Imagens

Para a análise do estudo na Unidade de Conservação Parque Nacional de Brasília, foram utilizadas cinco imagens do Landsat 8 OLI TIRS, cujas todas datadas antes, durante e após o incêndio, porém sendo quatro direcionadas para a avaliação da severidade do incêndio, o sequestro florestal de carbono e a rebrota; e a quinta imagem referente à banda termal B10 foi usada para a verificação da temperatura no momento da queimada, conforme a Tabela 4. As imagens foram processadas no software ENVI 5.3.

Tabela 4 - Imagens analisadas para a obtenção dos objetivos propostos

| Imagem | Sensor | Data | Período | Análise |
|--------|--------|------------|-----------------|---|
| 1 | OLI | 16/04/2016 | Pré-fogo | Severidade do incêndio e Sequestro florestal de carbono |
| 2 | OLI | 18/05/2016 | Dia do incêndio | Severidade do incêndio e Sequestro florestal de carbono |
| 3 | OLI | 19/06/2016 | Pós-fogo | Severidade do incêndio, Sequestro florestal de carbono e Rebrotas |
| 4 | OLI | 06/06/2017 | Rebrotas | Severidade do incêndio, Sequestro florestal de carbono e Rebrotas |
| 5 | TIRS | 18/05/2016 | Dia do Incêndio | Temperatura no momento da queimada |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a escolha das imagens, a metodologia foi dividida em quatro partes:

1. Cálculo da Severidade do Incêndio;
2. Cálculo do Sequestro Florestal de Carbono;
3. Cálculo da Rebrotas;
4. Transformação dos Dados TIRS da Banda Termal B10 em Temperatura de Brilho (K) e Conversão em °C (Celsius).

3.4 Cálculo da Severidade do Incêndio

O estudo da severidade do incêndio no Parque Nacional de Brasília deu-se por meio da aplicação dos cálculos direcionados para os índices espectrais NBR (Normalized Burn Ratio) e RdNBR (Relative Differenced Normalized Burn Ratio), com o uso do Envi 5.3, por meio da ferramenta Band Math em Basic Tools.

Primeiramente, calcularam-se os valores do NBR multiplicado por 1000 para serem reescalados em valores positivos, conforme a Equação 1. Com os resultados foi

possível analisar a relação entre a severidade do incêndio com o sequestro de carbono em cada data.

$$NBR = \frac{(B5 - B7)}{(B5 + B7)} \times 1000 \quad (1)$$

Onde:

NIR - Faixa do infravermelho próximo = B5 (Landsat 8 OLI TIRS)

SWIR - Faixa do infravermelho de ondas curtas = B7 (Landsat 8 OLI TIRS)

Na Tabela 5 encontram-se as datas aproximadamente entre um mês pré-fogo a um ano pós-fogo, para as quais foram realizados os procedimentos da verificação do NBR. Ressalta-se que o NBR_{18/05/2016} encontrado foi considerado NBRpós-fogo.

Tabela 5 - Períodos para os cálculos do NBR

| NBR | Período | Cálculo |
|---------------------------|------------------|----------------------------------|
| NBR _{16/04/2016} | Mês pré-fogo | NBRpré-fogo |
| NBR _{18/05/2016} | Mês pós-fogo | NBRdia do incêndio = NBRpós-fogo |
| NBR _{19/06/2016} | Ano pós-fogo | NBRrebrotas 1 |
| NBR _{06/06/2017} | Ano pós-pós-fogo | NBRrebrotas 2 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com os valores de NBR calculados, determinaram-se os resultados do RdNBR referentes aos períodos antes e após o incêndio com a mesma ferramenta anterior (Band Math), de acordo com a Equação 2.

$$RdNBR = \left(\frac{NBR_{pré-fogo} - NBR_{pós-fogo}}{\sqrt{ABS\left(\frac{NBR_{pré-fogo}}{1000}\right)}} \right) \quad (2)$$

Sabendo-se que o RdNBR é baseado nos resultados do NBRpré-fogo e NBRpós-fogo, para efeito dos cálculos, adotaram-se os dias 16/04/2016 (mês antes do incêndio) como pré-fogo, 18/05/2016 (dia do incêndio) como pós-fogo, 19/06/2016 (mês após o

incêndio) como rebrota 1 e 06/06/2017 (ano após o incêndio) como rebrota 2. A Tabela 6 apresenta detalhadamente as datas utilizadas para a resolução do RdNBR.

Tabela 6 - Períodos para os cálculos do RdNBR

| RdNBR | Período | NBR adotados |
|--|----------------------|---|
| RdNBR _{16/04/2016 - 18/05/2016} | Pré-fogo e pós-fogo | NBR _{16/04/2016} - NBR _{18/05/2016} |
| RdNBR _{18/05/2016 - 19/06/2016} | Pós-fogo e rebrota 1 | NBR _{18/05/2016} - NBR _{19/06/2016} |
| RdNBR _{18/05/2016 - 06/06/2017} | Pós-fogo e rebrota 2 | NBR _{18/05/2016} - NBR _{06/06/2017} |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os cálculos do RdNBR foram feitos com o intuito de estudar os níveis de severidade do incêndio para os períodos por meio do fatiamento de cores (density slice) para as imagens em tons de cinza, de modo a verificar melhor os pixels de um mesmo intervalo.

3.5 Cálculo da Rebrota

O estudo do comportamento da rebrota foi feito para os períodos entre 18/05/2016 - 19/06/2016 e 18/05/2016 - 06/06/2017, conforme o mesmo procedimento para a severidade do incêndio por meio da Equação 3.

$$RdNBR = \left(\frac{NBR_{pós-fogo} - NBR_{rebrota\ 1\ ou\ 2}}{\sqrt{ABS\left(\frac{NBR_{pós-fogo}}{1000}\right)}} \right) \quad (3)$$

A equação 3 foi usada para a análise da rebrota referente ao mês depois da passagem do fogo: o $NBR_{pós-fogo} = NBR_{18/05/2016}$ e o $NBR_{19/06/2016} = NBR_{rebrota\ 1}$; para o período posterior há um ano ao fogo: o $NBR_{pós-fogo} = NBR_{18/05/2016}$ e o $NBR_{rebrota\ 2} = NBR_{06/06/2017}$, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Períodos para os cálculos do RdNBRrebrota

| RdNBRrebrota | Período | NBR adotados |
|--|----------------------|---|
| RdNBR _{18/05/2016 - 19/06/2016} | Pós-fogo e rebrota 1 | NBR _{18/05/2016} - NBR _{19/06/2016} |
| RdNBR _{18/05/2016 - 06/06/2017} | Pós-fogo e rebrota 2 | NBR _{18/05/2016} - NBR _{06/06/2017} |

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.6 Cálculo do Sequestro Florestal de Carbono

Para o sequestro florestal de carbono, utilizou-se a ferramenta Band Math em Basic tools para todos os procedimentos abaixo, cujo método inicial foi a realização do índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) por meio da Equação 4.

$$NDVI = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)} \quad (4)$$

Onde:

NIR - Infravermelho próximo = B5 (Landsat 8 OLI TIRS)

Red - Região do Vermelho = B4 (Landsat 8 OLI TIRS)

Em seguida, verificou-se o PRI e seus valores reescalados positivamente (sPRI), de acordo com as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$PRI = \frac{(B2 - B3)}{(B2 + B3)} \quad (5)$$

Onde:

azul - Reflectância nos comprimentos de onda azul = B2 (Landsat 8 OLI TIRS)

verde - Reflectância nos comprimentos de onda verde = B3 (Landsat 8 OLI TIRS)

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (6)$$

Por fim, determinaram-se os resultados do CO₂flux, que é o índice responsável pela quantificação da absorção do carbono realizado pela vegetação, usando a Equação matemática 7.

$$CO_2flux = (NDVI \times sPRI) \quad (7)$$

Os períodos e as datas utilizadas para a realização dos cálculos matemáticos dos índices espectrais NDVI, PRI, sPRI e CO₂flux estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Períodos para os cálculos do NDVI, PRI, sPRI e CO₂flux

| Período | NDVI | PRI | sPRI | CO ₂ flux |
|------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Mês pré-fogo | NDVI _{16/04/2016} | PRI _{16/04/2016} | sPRI _{16/04/2016} 6 | CO ₂ flux pré-fogo |
| Dia do incêndio | NDVI _{18/05/2016} | PRI _{18/05/2016} | sPRI _{18/05/2016} 6 | CO ₂ flux pós-fogo |
| Mês pós-fogo | NDVI _{19/06/2016} | PRI _{19/06/2016} | sPRI _{19/06/2016} 6 | CO ₂ flux rebrota 1 |
| Ano pós-pós-fogo | NDVI _{06/06/2017} | PRI _{06/06/2017} | sPRI _{06/06/2017} 7 | CO ₂ flux rebrota 2 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.7 Transformação dos Dados TIRS da Banda Termal B10 em Temperatura de Brilho (K) e Conversão em °C (Celsius)

O último procedimento cumprido foi a conversão do TIRS em TOA Spectral Radiance na banda termal B10 do Landsat 8 OLI TIRS foi processada sobre a imagem do dia do incêndio (18 de maio de 2016) para obter as informações da temperatura no momento da queimada.

O procedimento inicial foi por meio da ferramenta “Band Math”, aplicando-se o cálculo sobre a Equação 8, obtendo o resultado em TOA Spectral Radiance.

$$TOA\ Spectral\ Radiance = float((0.0003342 \times B1) + (-0.10000)) \quad (8)$$

Onde:

B1 = Banda termal B10 (Landsat 8 OLI TIRS)

Por consequência, converteu-se o TOA Spectral Radiance para Temperatura de Brilho em K pela Equação 9.

$$Temperatura\ de\ Brilho\ em\ K = float((1321.08)/(ALOG((774.89/B1) + 1))) \quad (9)$$

Onde:

B1 = Resultado do TOA Spectral Radiance

Com o resultado da temperatura em Kelvin, converteu-o para graus Celsius (°C) empregando a Equação 10.

$$\text{Temperatura } ^\circ\text{C} = B1 - 273 \quad (10)$$

Onde:

B1 = Resultado da Temperatura de Brilho em K

3.8 Transecto e Density Slice

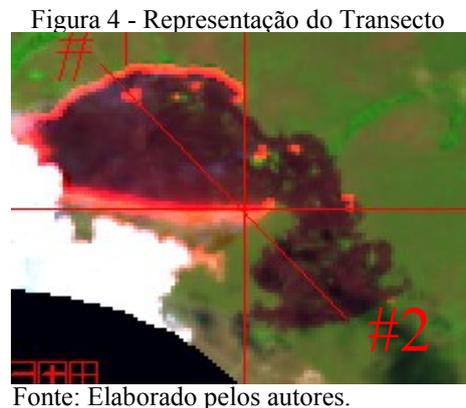
Após os cálculos realizados, passou-se o transecto na composição colorida R7G5B4 do dia 18/05/2016 usada como suporte para a análise e a realização dos transectos nas demais imagens obtidas posterior aos cálculos do CO₂flux (Sequestro florestal de carbono) e RdNBR (Severidade do incêndio), assim como para a verificação da temperatura no dia do incêndio (18/05/2016) por meio do Link Displays (Tools).

O procedimento do density slice consiste no fatiamento dos valores de brilho de uma imagem, dividindo-se o intervalo digital em mínimo e máximo de uma banda selecionada em intervalos definidos pelo especialista (MENESES et al., 2012). Com isso, os pixels que estão no mesmo intervalo são transformados para um valor único, sendo visivelmente mapeados de acordo com a cor escolhida (MENESES et al., 2012). Sendo assim, o procedimento foi feito somente nas imagens geradas pelos cálculos do Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada (RdNBR): RdNBR_{16/04/2016 - 18/05/2016}, RdNBR_{18/05/2016 - 19/06/2016} e RdNBR_{18/05/2016 - 06/06/2017}, para ver o quão o nível de intensidade do fogo em cada período.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos a partir dos processamentos de 5 imagens, sendo 1 imagem referente à banda termal B10 utilizada para diagnosticar a temperatura na região afetada pelo fogo no dia do incêndio; e 4 mencionam aos períodos de 16/04/2016 (mês pré-fogo), 18/05/2016 (dia do incêndio), 19/06/2016 (mês pós-fogo) e 06/06/2017 (ano pós-fogo) para os estudos da severidade do incêndio (NBR e RdNBR), do sequestro florestal de carbono (CO₂flux) e da rebrota (NBRrebrota e RdNBRrebrota).

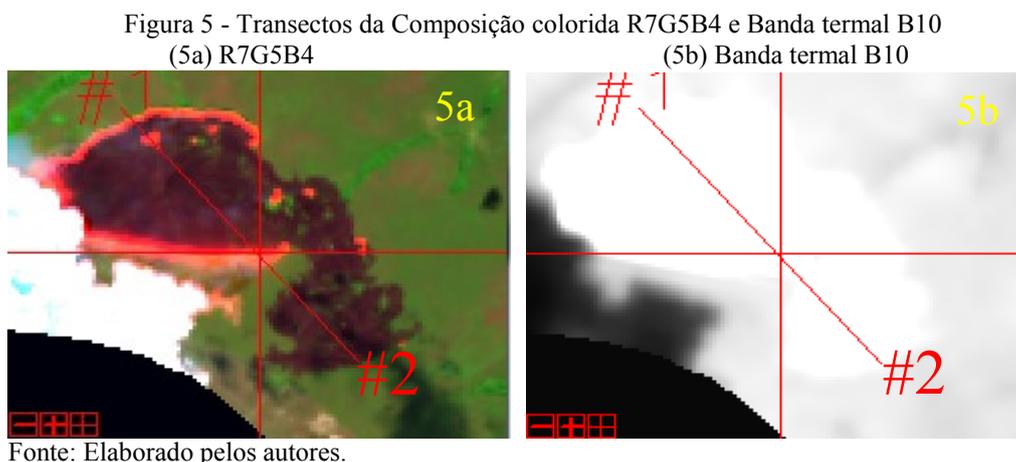
O transecto foi aplicado desde a parte superior da área com as chamas, passando por regiões intactas até a área que apresenta as marcas da ação da queimada na região que envolvia a área de estudo, conforme pode ser visto na Figura 4.



Por meio da composição colorida, foi possível verificar os pontos onde seriam passados os demais transectos usados para a detecção da temperatura, quantificação do sequestro de carbono (CO_2flux), severidade da queimada (NBR e RdNBR), bem como o comportamento da rebrota após o incêndio. No total foram gerados 9 transectos: 1 - temperatura, 4 - CO_2flux e 4 - NBR.

4.1 Análise da Temperatura

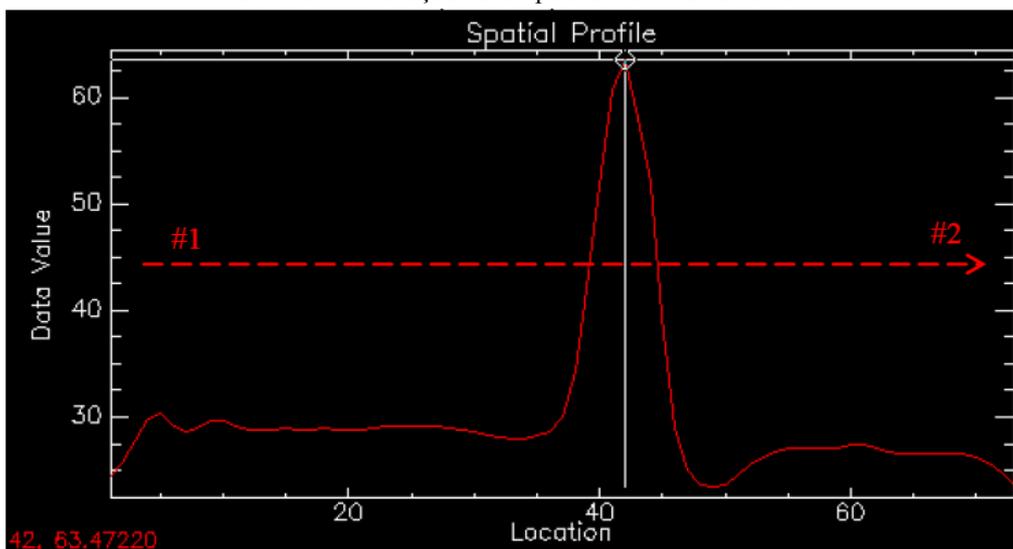
Analisou-se a temperatura do local no momento do incêndio, conforme observado na Figura 5, cujos dados foram adquiridos com o transecto o qual foi linkado em relação à composição colorida (4a) com o traçado da parte superior (#1) até a região inferior direita (#2) onde se observa o espalhamento da atividade da queima, mas sem a presença das chamas.



Os dados obtidos sobre a temperatura em °C (Graus Celsius) mostraram uma variação aproximada entre 23°C a 64°C, cuja menor temperatura diagnosticada foi de 23,50°C (Cerrado, solo, perto da mata de galeria) e a maior foi de 63,47°C (no meio das chamas - ponto 42), vistos no Gráfico 1. No entanto, é importante salientar que os dados obtidos da temperatura não se remetem a temperatura radiométrica do foco do incêndio, pois foi usada a banda termal B10 do Landsat 8, que contém ondas de 10 a 12 μm as quais captam alvos de superfície com temperatura normal. Sendo assim, para que houvesse a captura da faixa de calor real do foco do incêndio, seria necessário usar ondas de 3 a 5 μm (infravermelho médio). Com isso, o aumento da temperatura diminui o comprimento, fazendo com que temperaturas de 800 Kelvins (em torno de 300°C), por exemplo, tenham uma redução do comprimento para o infravermelho médio.

Ressaltando que apesar do sensor TIRS não calcular a temperatura que deveria ser (na faixa dos 800°C), o procedimento foi realizado para identificar a variação que existe das frentes do incêndio, independente do valor, mostrando a oscilação, como o pico (ponto 42) na área queimada.

Gráfico 1 - Variação da temperatura em 18/05/2016



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Análise do Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux)

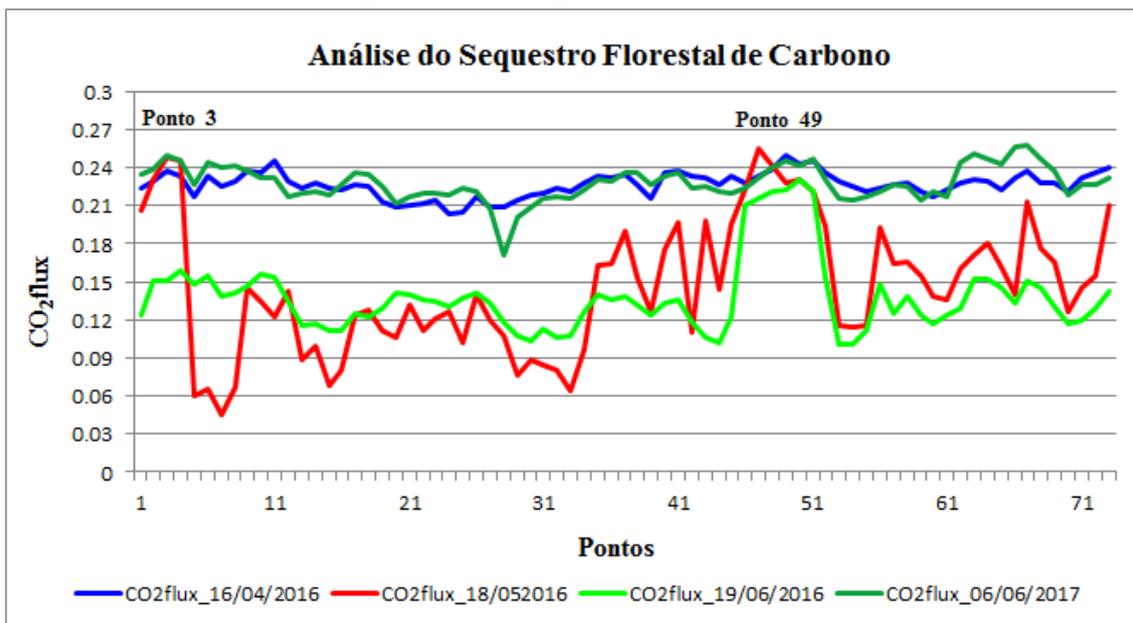
A análise do CO₂flux foi feita para quatro datas distintas, cujos resultados mostraram valores diferenciados. O CO₂flux_{pré-fogo} referente ao dia 16/04/2016 gerou dados de 0.20 a 0.25, com comportamento similar ao da rebrota 2 (CO₂flux_{rebrota 2} = 06/06/2017)

analisado cerca de um ano após o fogo, cujos dados ficaram entre 0.17 a 0.26, como pode ser visualizado no Gráfico 2.

De acordo com o INMET (2019), entre os dias 15/03/2016 a 16/04/2016, cerca de um mês anterior ao incêndio a precipitação foi baixíssima, com a presença de apenas dois dias de chuva (26/03/2016 - precipitação de 1.4 mm e 27/03/2016 - precipitação de 12.8 mm) e temperatura máxima em torno de 30°C, o que provavelmente influenciou no índice de vegetação no dia 16/04/2016, tornando-a mais seca e menos ativa (menor ação fotossintética), mesmo estando no fim do período chuvoso, e assim influenciando na absorção natural do carbono e menor sequestro de CO₂flux para este dia. No caso da rebrota 2, com dados similares ao do dia 16/04/2016, o CO₂flux foi baixo devido à presença de espécies que nem sempre estão ativas, visto que é o início de um período mais seco de acordo com a classificação de Koppen (1974).

Referente ao dia 18/05/2016, dia do incêndio, assumido como pós-fogo para efeito de cálculos, o CO₂flux_{pós-fogo} permaneceu baixo, entre 0.04 a 0.25, devido à baixa ação fotossintética da vegetação.

Gráfico 2 - Comportamento do sequestro florestal de carbono nos 4 dias

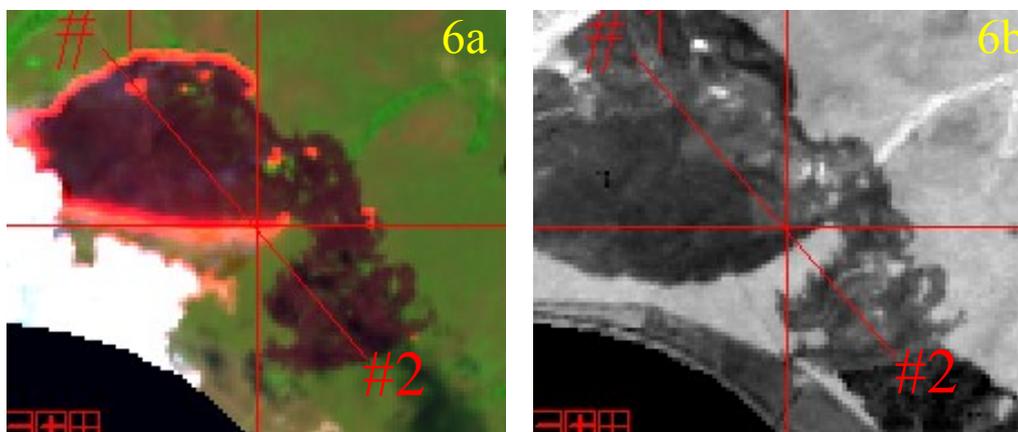


Fonte: Elaborado pelos autores.

No caso do dia 19/06/2016, cerca de um mês após a passagem do fogo, os valores do CO₂flux_{rebrotas 1} obtidos apresentaram-se na faixa de 0.1 a 0.23, ressaltando que no dia 16/06/2016 houve outro incêndio na região, prejudicando as espécies, permanecendo-as pouco ativas e contribuindo para um menor sequestro de carbono.

Ressalta-se que a presença de alguns picos elevados para os quatro períodos (pontos 3 e 49) dizem respeito a áreas não queimadas ou pouco afetadas, por onde foi passado o transecto (Gráfico 2 e Figuras 6a e 6b).

Figura 6 - Transectos da Composição colorida R7G5B4 e a imagem CO2flux de 19/06/2016
(6a) R7G5B4 (6b) CO2flux de 19/06/2016



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 Análise da Severidade do Incêndio (NBR)

Em seguida foram investigados o quanto intenso foi a ação do fogo no PARNA Brasília entre os períodos de 16/04/2016 a 06/06/2017 por meio do NBR e RdNBR. O NBR foi usado para o estudo da relação com o CO2flux; enquanto que o RdNBR utilizou-se para a aplicação do *density slice*, identificado as áreas com alta severidade até alta rebrota.

A Tabela 9, em geral, é utilizada para estudos de NBR, dNBR e RdNBR, como já realizados em outras pesquisas, como por exemplo: no Parque Nacional de Brasília entre 2010 e 2011 por Teobaldo et al. (2013) e na Amazônia em 2012 por Ribeiro et al. (2015). Os primeiros autores verificaram os níveis de severidade do dNBR e RdNBR, inferindo que o RdNBR identificou melhor os focos de queimada que o dNBR; enquanto que Ribeiro et al. (2015) analisaram a severidade por NBR.

Tabela 9 - Níveis de severidade do incêndio analisados para RdNBR e NBR

| Níveis de Severidade | Density Slice | Valores Estimados |
|----------------------|--|-------------------|
| Alta rebrota |  | -500 a -250 |
| Baixa rebrota |  | -250 a -100 |
| Não queimada |  | -100 a +100 |
| Baixa severidade |  | +100 a +270 |

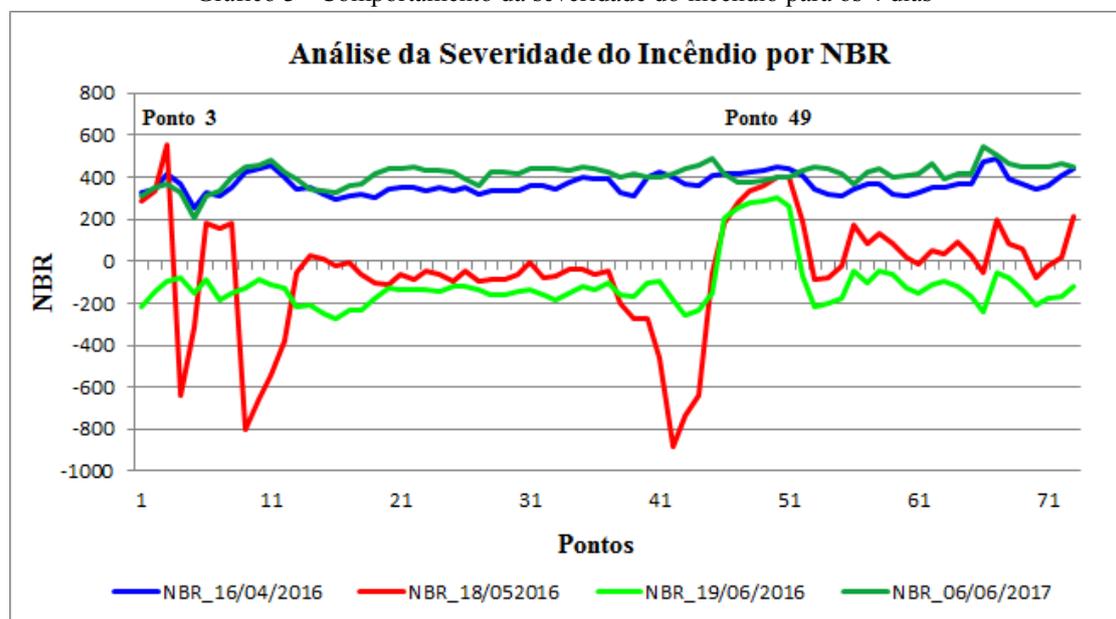
Tabela 9 - Níveis de severidade do incêndio analisados para RdNBR e NBR

| Níveis de Severidade | Density Slice | Valores Estimados |
|---------------------------|---------------|-------------------|
| Severidade moderada baixa | | +270 a +440 |
| Severidade moderada alta | | +440 a +660 |
| Alta severidade | | +660 a +1300 |

Fonte: KEY & BENSON (1999).

Considerando a Tabela 9, alguns resultados obtidos foram coerentes e outros pouco coerentes. A imagem do dia 16/04/2016 apresentou resultados como severidade moderada baixa à severidade moderada alta. Esse resultado pode ser analisado pelo Gráfico 3. A explicação para essa divergência com o que há na literatura se deve à utilização das imagens, que já continham correção atmosférica (imagens de reflectância), as quais alteram os dados gerados por meio da utilização de algoritmos, o que explica o fato dos dados obtidos terem sido distintos.

Gráfico 3 - Comportamento da severidade do incêndio para os 4 dias

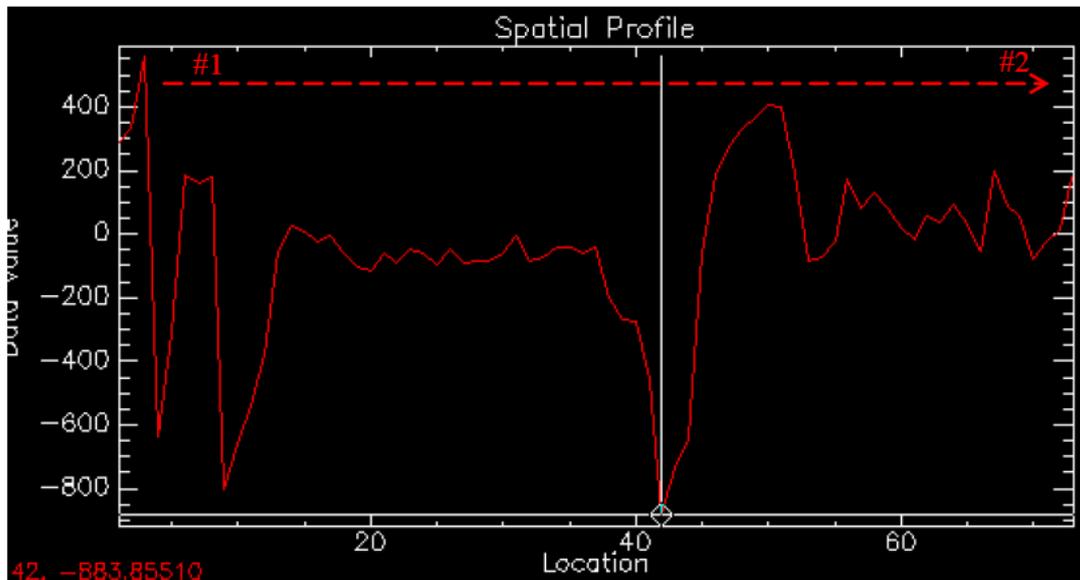


Fonte: Elaborado pelos autores.

A imagem do dia 18/05/2016 (dia do incêndio) gerou dados incoerentes em relação com a tabela 9. Por exemplo, em algumas partes por onde o transecto foi traçado (Gráfico 4 e Figuras 7a e 7b), principalmente nos pontos na região da borda do fogo, foram obtidos valores na faixa de -800, sendo todo e qualquer valor negativo implicando em alta rebrota, concluindo que a utilização das imagens com correção atmosférica geram resultados diferentes, devido aos algoritmos alterarem os dados significativamente (Terra

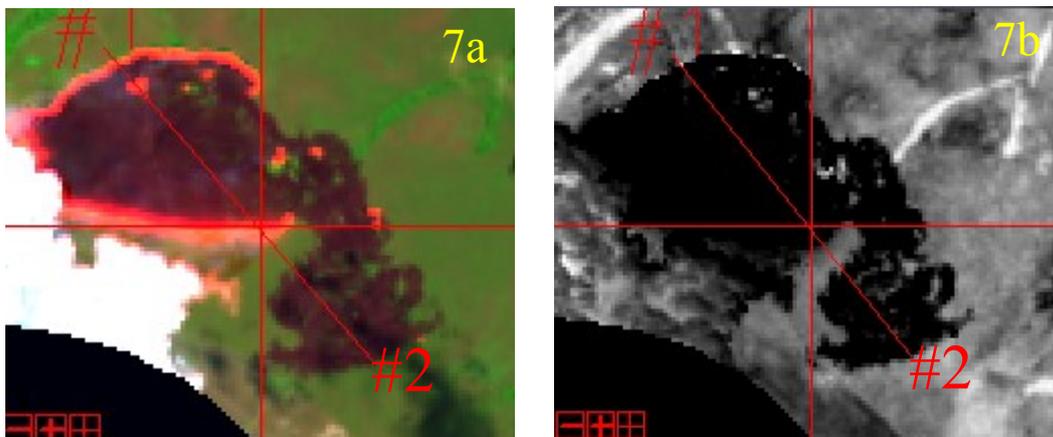
de Oliveira, comunicação oral do autor). Vale salientar que a imagem analisada referiu-se ao período do dia do incêndio, o que provavelmente ocasionou em uma diferenciação dos resultados em comparação com a padronização criada por Key & Benson em 1999, como visto na Tabela 9 (Lima & Anunciação, 2019).

Gráfico 4 - Transecto na imagem NBR_{18/05/2016} e sua comparação com a composição colorida R7G5B4



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 - Transecto na imagem CO₂flux_{18/05/2016} e sua comparação com a composição colorida R7G5B4
(7a) R7G5B4 (7b) CO₂flux de 19/06/2016



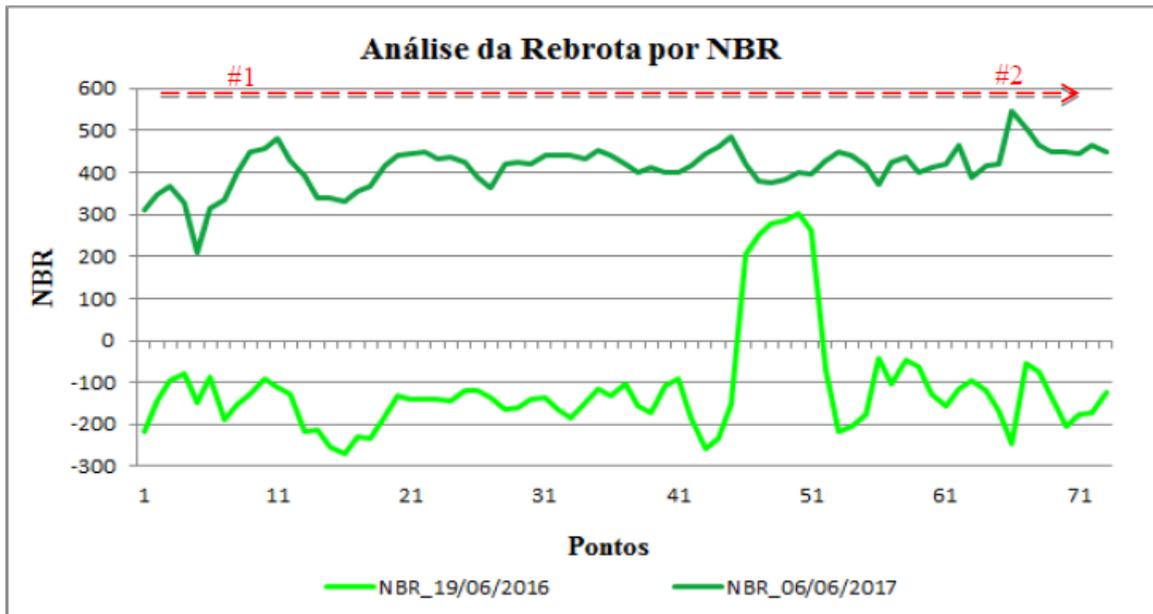
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 Análise da Rebrotas

Os dados do dia 19/06/2016, considerada rebrota 1, foram totalmente coerentes ao ser comparados com os dados da tabela 9. No Gráfico 5 é visível que há uma oscilação

entre alta rebrota e severidade moderada baixa no mesmo local, e mesmo havendo a contradição, é explicado pelo tipo de rebrota que pode ser de três tipos distintos (SARTORELLI et al., 2007). Pelo fato da metodologia ter sido por meio de imagens de reflectância, algumas partes da planta não entram nos dados coletados.

Gráfico 5 - Análise da Rebrota por NBR para os dias 19/06/2016 e 06/06/2017

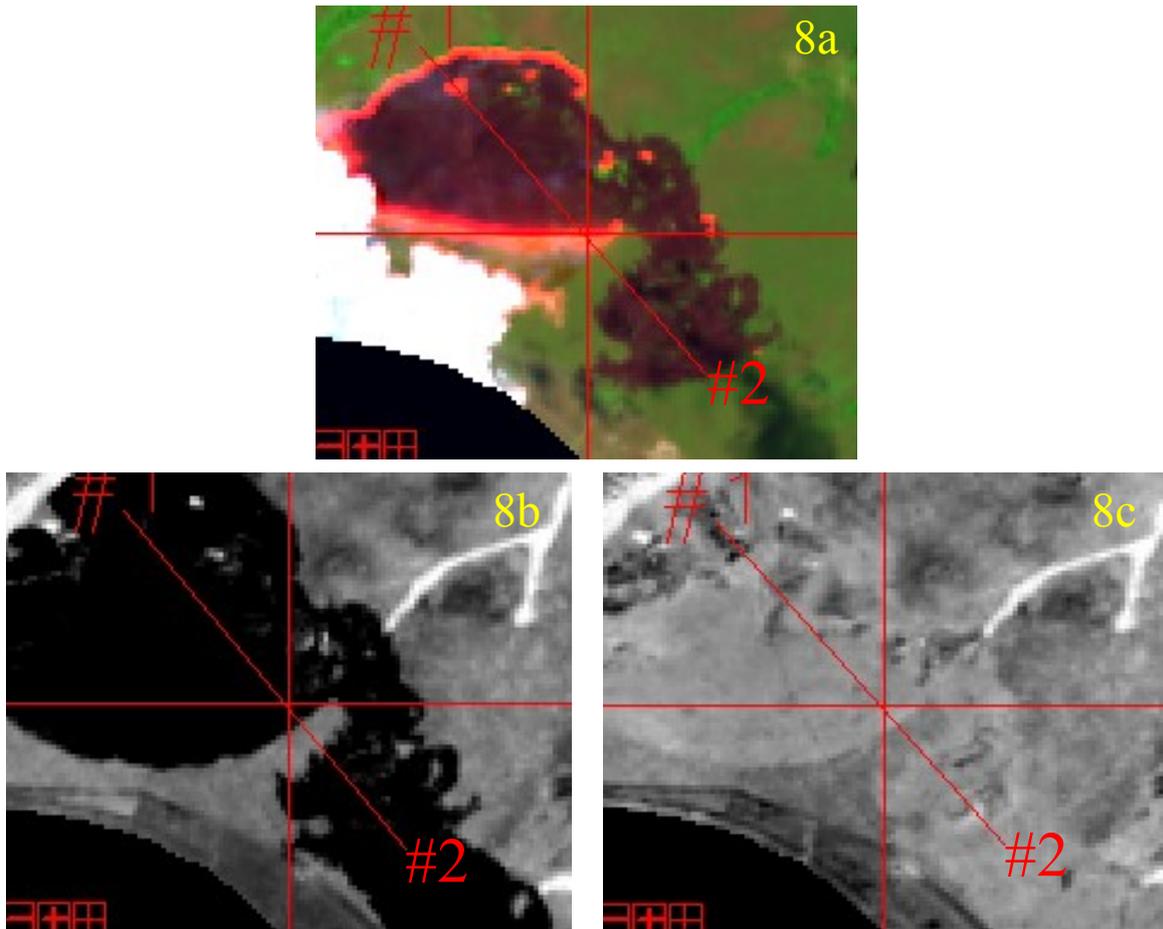


Fonte: Elaborado pelos autores.

No dia 06/06/2017 (ano após o incêndio), ao contrário do que aconteceu na imagem do dia 19/06/2016, a rebrota 2 não foi muito bem representada, apresentando baixa severidade a severidade moderada alta, como se não houvesse nenhuma presença de rebrota, porém pela imagem de satélite é possível verificar a diferença entre os pixels mais escuros (sem ou pouca vegetação) e os pixels mais claros (muita vegetação), constatando que no período da rebrota 2 houve, de fato, uma forte rebrota, como observados na Figura 8.

A falha observada do período referente à rebrota 2 pode ser explicado por ter usado imagem de reflectância que tem a capacidade de verificar com mais precisão os alvos superficiais, confundindo vegetação de baixa ação fotossintética (vegetação seca) com a vegetação do período após a queimada, causando “desordem” nos dados pelo fato de não ter exatidão sobre o desenvolvimento das espécies em um ano.

Figura 8 - Composição colorida R7G5B4 (8a) e os NBR de 19/06/2016 (8b) e 06/06/2017 (8c)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Esta diferença pode ser mostrada novamente pelo fato das imagens analisadas serem de reflectância, o que captam apenas de forma mais superficial os tipos de rebrotamento e conseqüentemente geram valores de NBR positivos como se não houvesse nenhuma vegetação no lugar.

No entanto, o fatiamento *density slice* aplicado ao RdNBR foi favorável cujos dados mostraram o inverso, com valores apenas de representações positivas para o crescimento da rebrota. É importante destacar que o RdNBR é uma análise feita entre períodos (entre duas datas); e o NBR é um estudo analisado somente para o único dia, o que pode gerar alterações de valores, mesmo a imagem mostrando que no ano de 2017 a rebrota tenha sido bastante expressiva.

4.5 Análise da Relação do CO₂flux com NBR

A relação da severidade do incêndio (NBR) com o sequestro de carbono (CO₂flux) foi transparecida por meio dos gráficos de linhas e dispersão, para os seguintes

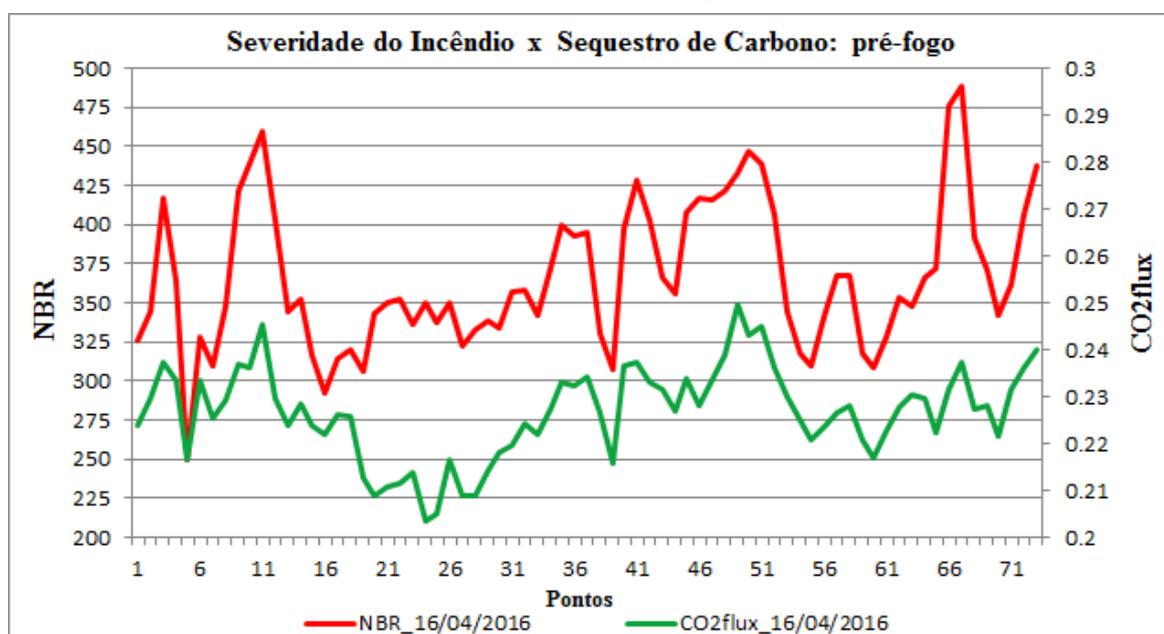
dias: 16/04/2016, 18/05/2016, 19/06/2016 e 06/06/2017. Os valores do sequestro florestal de carbono variam de -1 a +1. Quanto mais próximo de -1, menos fotossinteticamente ativa e quanto mais próximo de +1, mais fotossinteticamente ativa é a vegetação (SHIMABUKURO, 2009). Em relação ao quão severo foi a ação do fogo: quanto mais próximo de -500, melhor é o comportamento da rebrota e quanto mais próximo de +1300, maior é a severidade causada pelo incêndio. Sendo assim, os resultados diferenciaram-se conforme cada intervalo de tempo.

A quantidade e a qualidade da vegetação interferem no sequestro florestal de carbono (CO₂flux). Então, quanto maior for a alta rebrota, maior é o CO₂flux, no entanto, nem sempre há uma grande correlação entre as variáveis, não sendo necessariamente uma relação inversa como vista nos gráficos.

4.5.1 NBR e CO₂flux pré-fogo - 16/04/2016

A relação no gráfico de linhas foi analisada através do eixo y = NBR e eixo x = CO₂flux. No dia considerado pré-fogo, observado no Gráfico 6, a relação foi de baixo sequestro florestal de carbono em relação a um alto nível de severidade, variando entre valores de CO₂flux de 0.2 à 0.3, enquanto que os resultados de NBR variaram de 200 a 500, o que condiz com uma relação inversamente proporcional, conforme o esperado: quanto maior o NBR menor é o CO₂flux e vice-versa.

Gráfico 6 - Relação entre NBR e CO₂flux pré-fogo - 16/04/2016

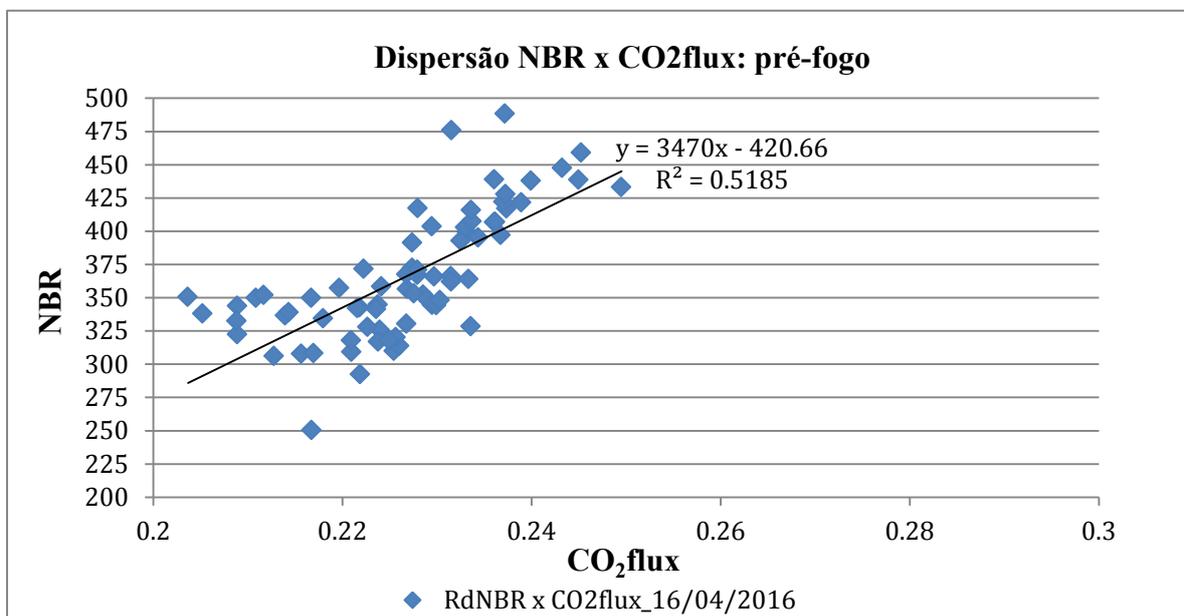


Fonte: Elaborado pelos autores.

No Gráfico 6 foi possível observar a geração de dados apenas positivos. Como o método de estudo foi por meio de imagens de reflectância, algumas espécies não conseguiram ser captadas pelo satélite. Por isso, é normal conter dados não coerentes na aplicação do NBR nesse caso. A severidade oscilou entre baixa à moderada alta, não contendo nenhuma taxa de rebrota no local, mesmo havendo informações mais internas, onde os dados não conseguiram ser captados.

O Gráfico 7, de dispersão, mostrou a correlação existente entre as variáveis no período pré-fogo, cujo coeficiente de determinação ($R^2 = 0.5185$) onde o CO_2 flux (variável independente) explicou 51.85% da severidade de queimada por meio do NBR (variável dependente). Como é mostrado o CO_2 flux da vegetação não queimada, pois foi no período pré-fogo, o gráfico explicou uma variável em relação à outra em 51.85% porque não houve queima, tendo níveis de crescimento de vegetação diferente, sem controle.

Gráfico 7 - Dispersão NBR e CO_2 flux pré-fogo: 16/04/2016

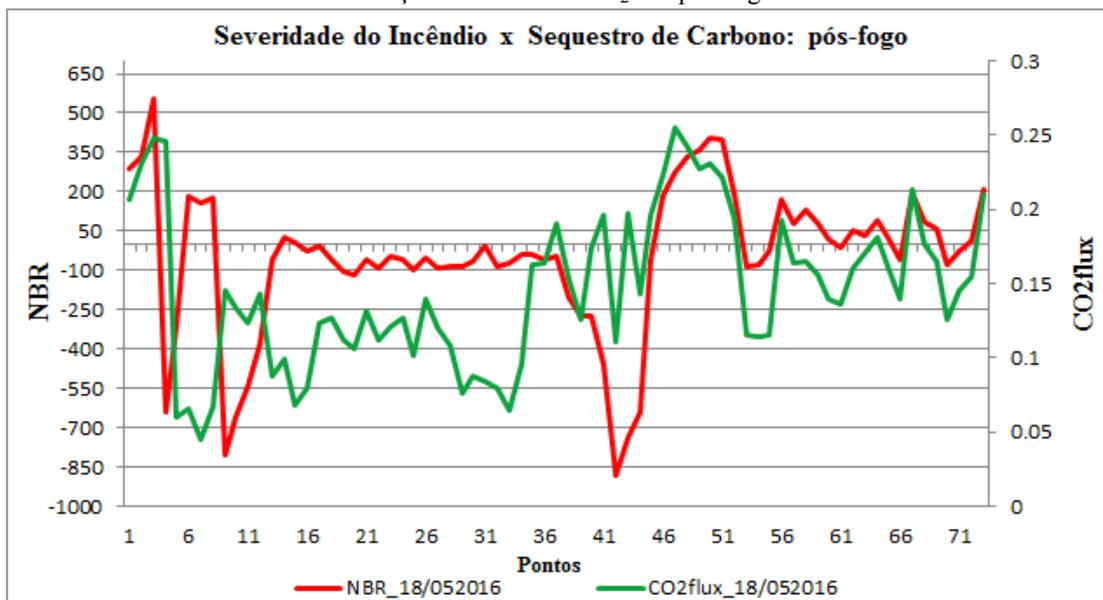


Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5.2 NBR e CO_2 flux pós-fogo - 18/05/2016

No dia 18/05/2016 assumido como pós-fogo também se obtiveram resultados inversamente proporcionais, apesar de aparentar picos diferentes, sendo explicados pela confusão na reflectância dos alvos. Os valores de CO_2 flux variaram entre 0.03 a 0.3 e de NBR entre 600 e -1000 verificado no Gráfico 8.

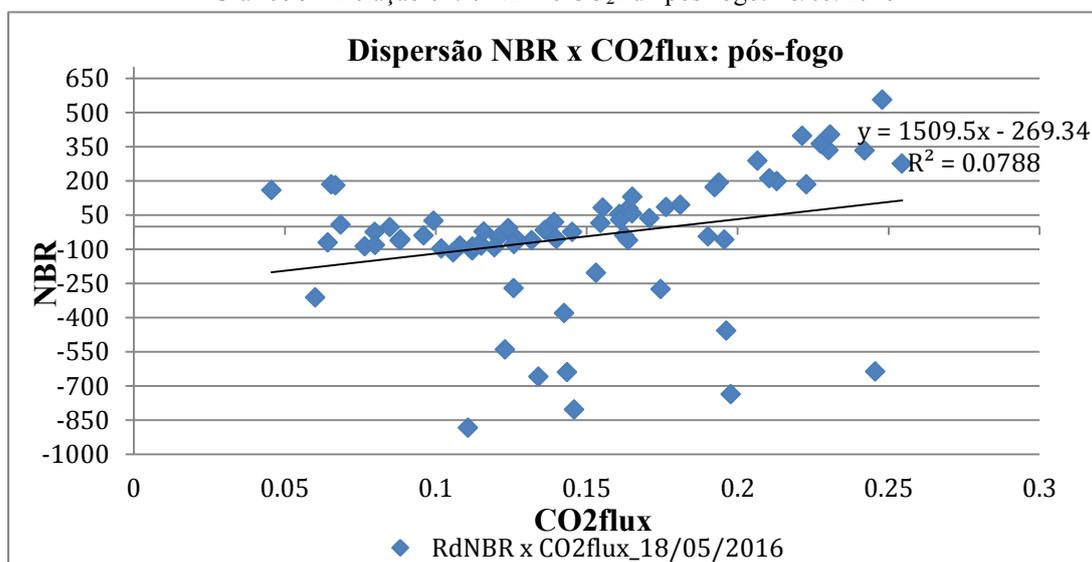
Gráfico 8 - Relação entre NBR e CO₂flux pós-fogo - 18/05/2016



Fonte: Elaborado pelos autores.

No caso do pós-fogo, com o incêndio e a ação da queima há uma “desordem” no comportamento do CO₂flux e NBR, de tal forma que a correlação entre as variáveis diminui, resultando em um coeficiente de determinação ($R^2 = 0.0788$) baixo por conta do resultado negativo do NBR (-100 a -1000 = aparecimento da rebrota), onde o CO₂flux explicou apenas 7.88% da severidade de queimada por meio do NBR (Gráfico 9). A baixa correlação se deu pelo fato da imagem utilizada ter sido justamente na hora do fogo, o que acarretou na falta de certeza na geração dos dados, confundindo com os resultados padrões obtidos como referências nesse estudo.

Gráfico 9 - Relação entre NBR e CO₂flux pós-fogo: 18/05/2016

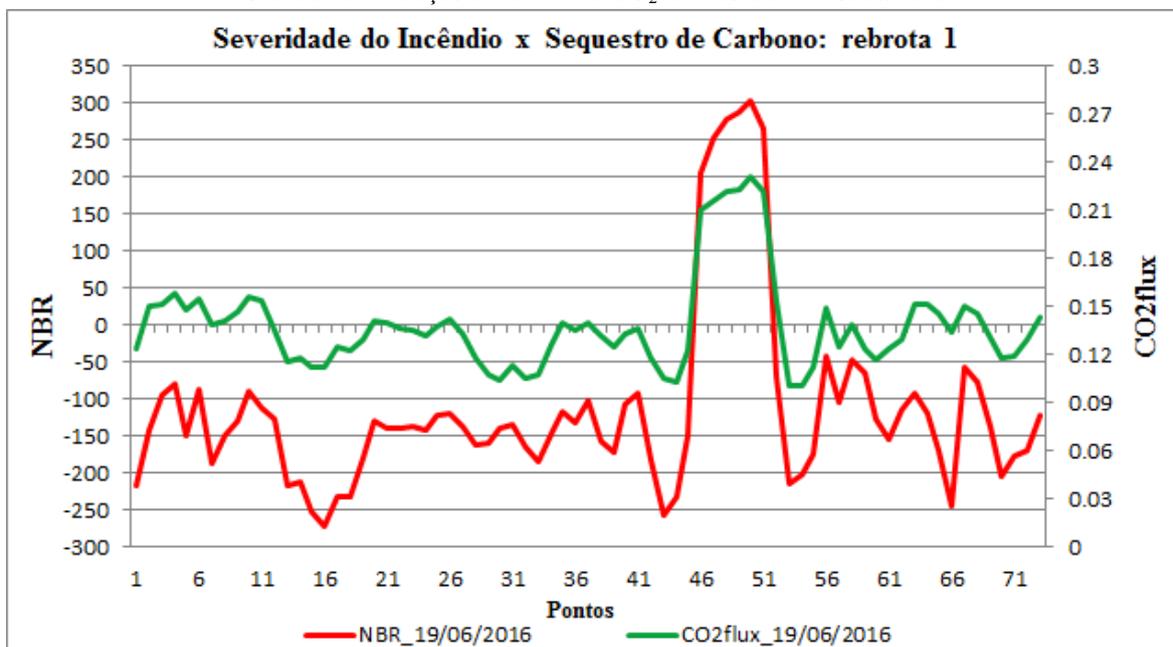


Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5.3 NBR e CO₂flux rebrota 1 - 19/06/2016

No Gráfico 10, referente a rebrota 1 (19/06/2016), é visível a relação existente entre as variáveis, onde quanto maior a área de alta rebrota, maior é o valor do sequestro florestal de carbono, com valores de CO₂flux também variaram entre 0.03 a 0.3 e do índice NBR entre 350 a -300. Porém, há um pico que demonstra que a relação é o contrário, o que pode ser explicado pela existência de diferentes espécies na região do Cerrado que podem rebrotar de maneiras distintas, como mencionado por Sartorelli em 2007 em seus estudos direcionados para a “Rebrota Após Fogo De Espécies Arbóreas de Diferentes Grupos Fenológicos Foliares em Cerrado Stricto Sensu” e assim não sendo captados pelo índice devido à imagem analisada já possuir correção atmosférica.

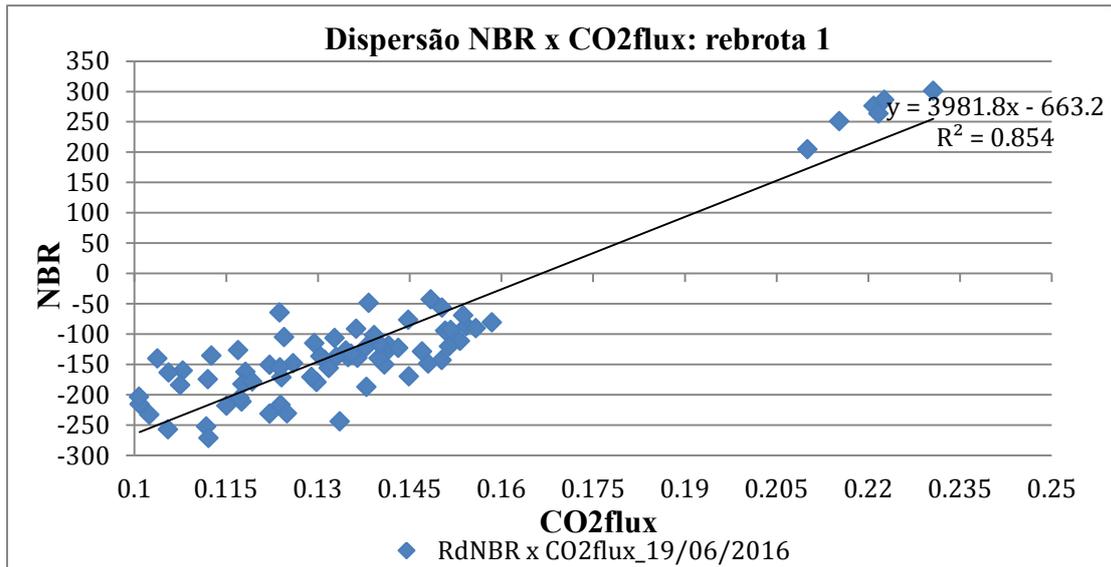
Gráfico 10 - Relação entre NBR e CO₂flux rebrota 1 - 19/06/2016



Fonte: Elaborado pelos autores.

No período da rebrota 1, a regressão linear mostrou um alto coeficiente de determinação ($R^2=0.854$), o que denota forte correlação (85.40%) entre os índices espectrais, mostrando a existência CO₂flux com o aparecimento da rebrota e que os valores são baixos devido ao processo ocorrer no início de um período seco, o que interfere na ação fotossintética da vegetação, além do sensor conseguir ler apenas a parte superficial da planta, gerando valores de sequestro florestal de carbono entre 0.10 a 0.16, conforme visto no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Relação entre NBR e CO₂flux rebrota 1: 19/06/2016

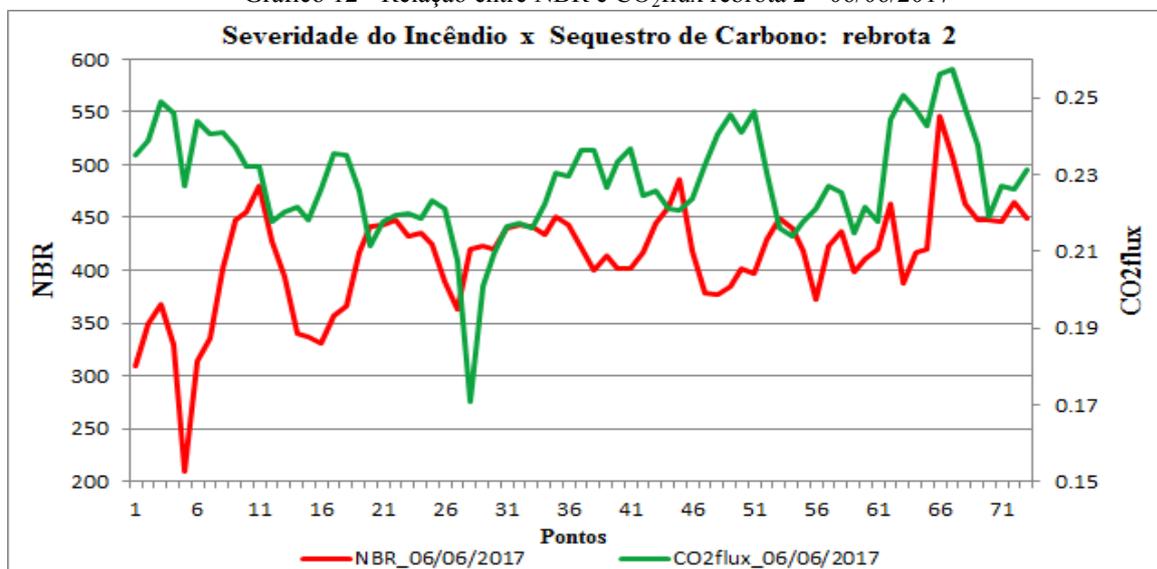


Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5.4 NBR e CO₂flux rebrota 2 - 06/06/2017

Na rebrota 2 (dia 06/06/2017), os valores de CO₂flux variaram entre 0.10 até 0.25 e de NBR entre 200 e 600. A leitura desses valores deveria ser de inversamente proporcional: quanto maior o índice do sequestro florestal de carbono, menor o NBR. Mas, ao analisar o gráfico, observou-se que contém picos variados, de modo a lembrar que nem sempre a relação de inversamente proporcional pode ser considerada para todos os casos, e que há espécies que nem sempre estão ativas, fazendo com que existam valores diferenciados, mas não fora do previsto (Gráfico 12).

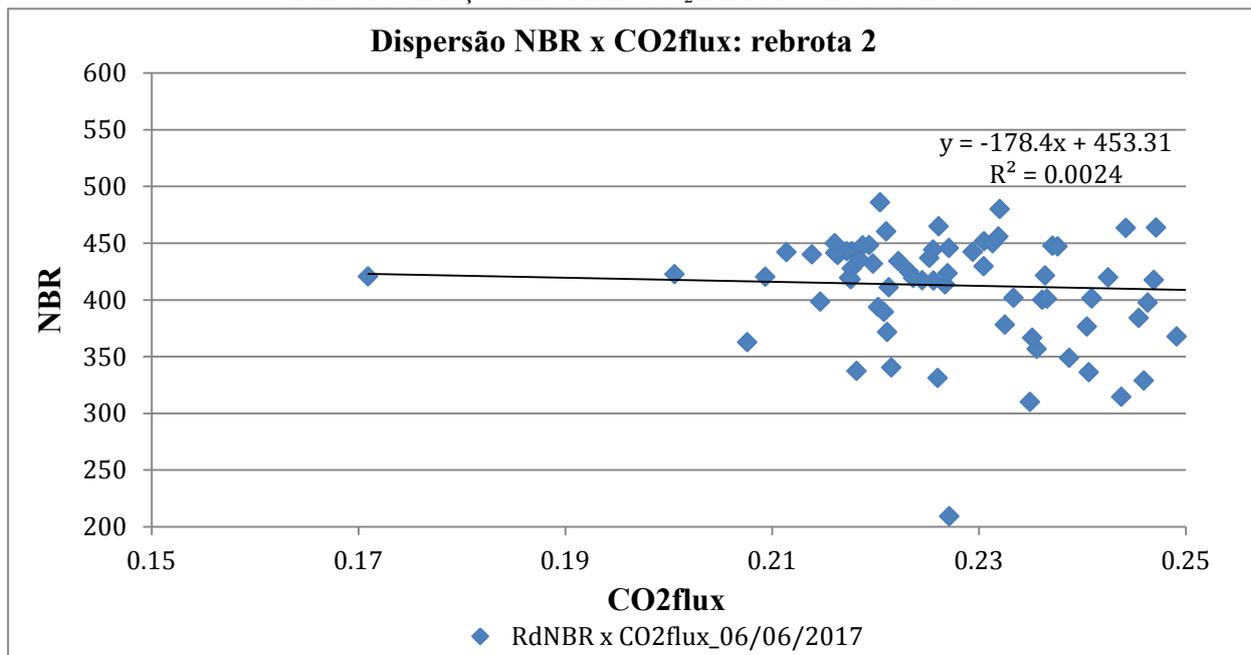
Gráfico 12 - Relação entre NBR e CO₂flux rebrota 2 - 06/06/2017



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na rebrota 2 a regressão linear identificou um baixo coeficiente de determinação ($R^2=0.0024$), com baixa correlação entre as variáveis de 0.24%, devido ao comportamento descontrolado da vegetação; período seco com menor precipitação gerando uma vegetação mais seca; sensor com capacidade de captação apenas superficial da rebrota de forma a desconsiderar a rebrota mais profunda, sabendo-se que existem três tipos diferentes de rebrota conforme estudos de Sartorelli em 2007, e assim tendo apenas resposta de “fogo” com valores de NBR entre 200 a 600 (baixa severidade a severidade moderada alta) (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Relação entre NBR e CO₂flux rebrota 2: 06/06/2017



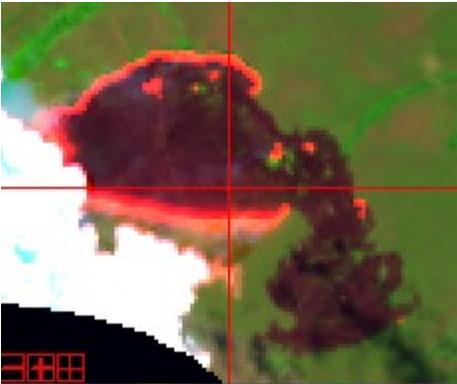
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.6 Análise do Fatiamento da Severidade do Incêndio (RdNBR) por Density Slice

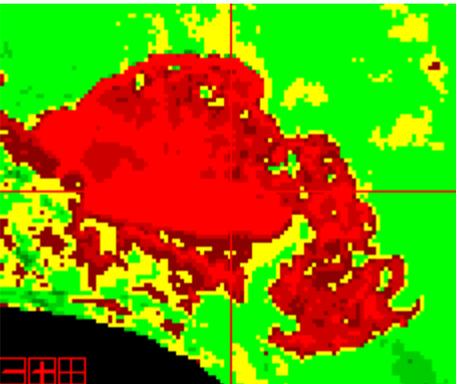
Baseando-se na tabela acima, o RdNBR foi usado apenas para o fatiamento dos valores de brilho de uma imagem por density slice em overlay, verificando os pixels que estão no mesmo intervalo e os transformando na mesma cor para que sejam vistos de forma mais detalhada no mapa, e assim diagnosticar os níveis de severidade em cada parte da região de estudo, diferenciando os períodos que ocorreram as transformações da biomassa com a ação da queima. A Figura 9 apresenta as variações e o comportamento da vegetação no dia do incêndio (18/05/2016) e entre os períodos anterior ao fogo e após a rebrota.

Figura 9 - Registro das imagens Zoom de R7G5B4 e RdNBR de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3

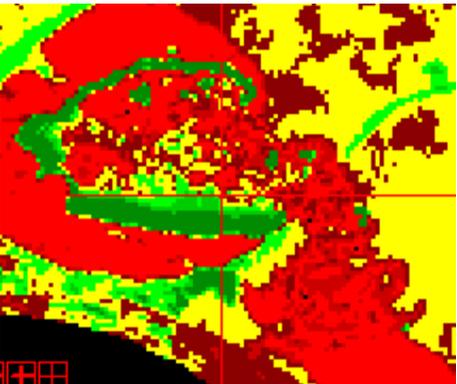
R7G5B4_18/05/2016



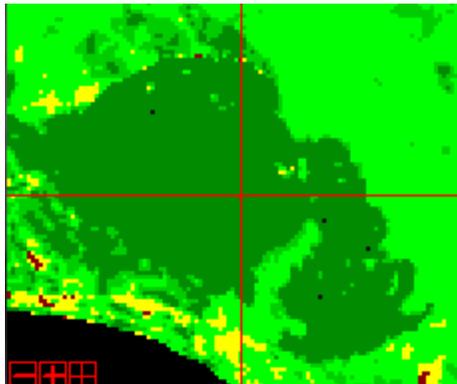
RdNBR_16/04/2016 - 18/05/2016



RdNBR_18/05/2016 - 19/06/2016



RdNBR_18/05/2016 - 06/06/2017



Fonte: Elaborado pelos autores.

Desta forma, os resultados do fatiamento da severidade do incêndio foram investigados para três períodos distintos, cujos valores obtidos são vistos nas Tabelas 10, 11 e 12 e suas respectivas Figuras 10, 11 e 12, respectivamente.

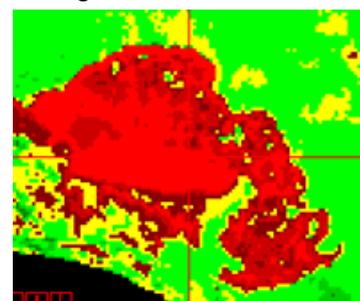
Conforme observação feita na imagem do período 1, percebeu-se que a grande variação dos níveis de severidade, com o destaque para alta severidade moderada baixa a alta severidade, sem nenhuma presença de rebrota entre o mês pré-fogo e o pós-fogo, porém com uma baixa rebrota e a presença de poucas áreas não queimadas.

Tabela 10 - RdNBR - 16/04/2016 a 18/05/2016 - período 1

| Níveis de Severidade | Density Slice | Resultados Obtidos |
|---------------------------|---------------|--------------------|
| Alta rebrota | | - |
| Baixa rebrota | | -215.06 |
| Não queimada | | +18.72. a +66.96 |
| Baixa severidade | | +108.13 a +251.10 |
| Severidade moderada baixa | | +271.07 a +419.92 |
| Severidade moderada alta | | +449.55 a +643.84 |
| Alta severidade | | +663.95 a +2027.45 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10 - DS Período 1



Para o período 2, verificou-se que houve o aumento na presença da vegetação conforme os níveis de severidade, apresentando resultados de baixa rebrota à alta rebrota em um período relativamente rápido justamente na região da borda do fogo, onde continha as imagens da chama (Figura a).

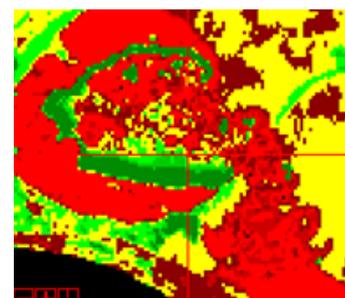
Conforme estudos realizados por Sartorelli et al (2007) com algumas espécies (*P. rotundifolia* e *M. ligustroides*) do Cerrado, o fogo alterou a velocidade de crescimento das espécies que emitiram novos ramos em um tempo reduzido, justamente em regiões onde a presença do fogo é frequente. Portanto, é possível que o comportamento das espécies presentes na área de estudo atual sejam similares ao das espécies estudadas por SARTORELLI.

Tabela 11 - RdNBR - 18/05/2016 a 19/06/2016 - período 2

| Níveis de Severidade | Density Slice | Resultados Obtidos |
|---------------------------|---------------|--------------------|
| Alta rebrota | | -753.11 a -293.15 |
| Baixa rebrota | | -192.05 a -105.95 |
| Não queimada | | -43.94 a +97.81 |
| Baixa severidade | | +125.58 a +267.75 |
| Severidade moderada baixa | | +285.69 a +424.30 |
| Severidade moderada alta | | +444.46 a +654.41 |
| Alta severidade | | +672.58 a +3039.87 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11 - DS Período 2



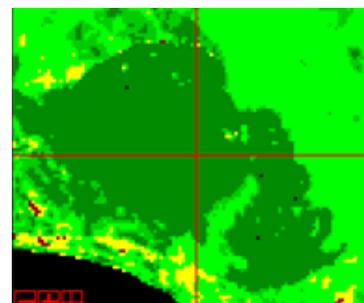
O 3º período analisado entre 18/05/2016 e 06/06/2017 mostrou a rapidez que as espécies se desenvolveram em aproximadamente 1 mês, o que pode ter sido ocasionado pela presença do fogo. Visto que no Cerrado, para Vieira et al. (1996), grande parte das espécies é adaptada ao fogo e cresce de forma rápida após a passagem do incêndio, por causa dos meristemas bem protegidos na árvores (apud SARTORELLI et al, 2007, p. 3).

Tabela 12 - RdNBR - 18/05/2016 a 06/06/2017 - período 3

| Níveis de Severidade | Density Slice | Resultados Obtidos |
|---------------------------|---------------|--------------------|
| Alta rebrota | | -6975.13 a -302.78 |
| Baixa rebrota | | -194.72 |
| Não queimada | | -75.38 a +2.46 |
| Baixa severidade | | +252.41 |
| Severidade moderada baixa | | - |
| Severidade moderada alta | | - |
| Alta severidade | | - |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 - DS Período 3



6 CONCLUSÃO

Nas áreas com altas temperaturas, como observado no ponto 42 (Gráfico 1) , a quantidade de CO₂flux foi menor, comprovando o alto prejuízo causado à vegetação de tal forma que desfavorece à absorção natural do carbono e, conseqüentemente, a diminuição no sequestro de carbono.

A faixa do termal do Landsat 8 utilizada para a medição da temperatura não foi ideal, tendo em vista que não mediu o foco do incêndio em alvos com elevadas temperaturas por conta de a faixa estar entre 11 e 12 µm que são para alvos normais. O ideal seria um sensor com faixa entre 3 a 5 µm (infravermelho médio) porque com o aumento da temperatura o comprimento de onda diminui, e a temperatura de 800 kelvins (em torno de 300° C) se reduz para o infravermelho médio. Apesar do sensor não ter calculado a temperatura real (seria na faixa dos 800° C), o procedimento foi feito para verificar a variação das frentes do incêndio, mostrando a oscilação nos diversos pontos do transecto, como no caso do ponto 42 (Gráfico 1).

O uso do Índice de Queimada Normalizada (NBR) em imagens que já contém a correção atmosférica pode explicar os resultados que foram discrepantes em relação ao encontrado nas referências. A informação, também, dos três tipos existentes de rebrota explica o porquê da metodologia do uso de imagens de reflectância não serem tão eficientes para a captação de dados de todos os tipos de espécies, ocasionando resultados

equivocados. Sendo assim, o NBR não é adequado para as análises de severidade do incêndio utilizando imagens de reflectância.

O índice relativo RdNBR - Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada, proposto por Miller e Thode (2007) foi útil para a verificação da biomassa atingida pelo fogo em diferentes níveis de severidade na área de estudo, identificando com mais clareza as áreas com alta severidade, severidade moderada alta em áreas com comportamento da rebrota alta. Ressalta-se que ocorreram alvos espectrais em que o índice RdNBR confundiu como sendo regiões de queimadas, como foi o caso de nuvens localizadas na parte superior central do Parque Nacional de Brasília (APÊNDICE A).

O índice espectral CO₂flux que mede a eficiência do sequestro de carbono do fluxo de CO₂ em cada pixel da imagem apresentou resultados de acordo com o exposto pela literatura (valores de -1 a +1), o qual identificou com clareza os ambientes com menor ou maior sequestro florestal de carbono, conforme o comportamento da vegetação em cada ponto. Portanto, é um índice favorável e válido para análises de imagens que apresentam correção atmosférica.

A ação da queimada gera consequências negativas, no entanto é possível que dependendo do tipo das espécies, onde é preciso um estudo com mais detalhe, o fogo possa ter ocasionado ações positivas sobre o comportamento da vegetação presente na área estudada, ocasionando uma rebrota mais acelerada e contribuindo para a restauração de áreas degradadas.

A utilização da imagem na hora do incêndio corroborou para resultados fora do padrão (até então internacionalmente único) usado na literatura, em conjunto com as ferramentas usadas ao longo da metodologia, o que ocasionou a confusão de dados na comparação à outros estudos. Como por exemplo, o estudo feito no Parque Nacional de Brasília, mas em outra área de estudo, por TEOBALDO (2010), foram utilizadas imagens pré-fogo e pós-fogo, ou seja, nenhuma imagem exatamente do dia do incêndio, o que provavelmente contribuiu para a obtenção de resultados mais favoráveis, onde o método realizado gerou dados mais coerentes com a literatura.

Sendo assim, é importante destacar a necessidade de estudar mais detalhadamente as imagens de áreas queimadas quando obtidas exatamente do dia do incêndio, no momento da ação do fogo e verificar metodologias que possam analisar com mais precisão esses tipos de imagens, de modo a minimizar resultados que possam ser confusos, errôneos ou incoerentes.

REFERÊNCIAS

- ARMANDO, M.S. **O impacto do fogo na rebrota de algumas espécies de árvores do cerrado**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 1994.
- BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 1990. 115 p.
- BAPTISTA, G.M.M. **Validação da modelagem de seqüestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados aviris e hyperion**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, p. 1037-1044. 2003.
- BAPTISTA, G.M. **Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domo Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral**. Geografia, Rio Claro, v. 29, n. 2, p. 189-202, mai./ago. 2004.
- BEUTLING, A. **CARACTERIZAÇÃO PARA MODELAGEM DE MATERIAL COMBUSTÍVEL SUPERFICIAL EM REFLORESTAMENTOS DE Araucariaangustifolia (Bert.) O. Ktze**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. 2005.
- CANAVESI, V.; PONZONI, F.J.; VALERIANO, M.M. **Estimativa de Volume de madeira em plantios de Eucalyptus spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.34, n.3, p.539-549. 2010.
- CASTELLANI, T.T. & STUBBLEBINE, W.H. 1993. **Sucessão secundária em mata tropical mesófila após perturbação por fogo**. Revista Brasileira de Botânica 16:181-203.
- CASTILLO S., M.; SAAVEDRA S., J.; BRULL B., JORDI. (2018). **Severidad del fuego en los mega incendios forestales ocurridos en Chile, en 2017. Acciones para mejorar el sistema de protección**. Revista Territorium, nº 26 (I), 2019, 5-18, Riscos, ISSN: 0872-8941.
- CASTRO-NEVES, B.M. **Efeito de queimadas em áreas de cerrado stricto sensu e na biomassa de raízes finas**. Dissertação de Doutorado. Universidade de Brasília. 2007.
- CHUVIECO, E. (Ed), 1997, **Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin** (Berlin: Springer-Verlag).
- CIRNE, P.; SCARANO, F.R. **Rebrotamento após o fogo de andira legalis (leguminosae) em restinga fluminense**. In: MIRANDA, H.S.; SAITO, C.H.; DIAS, B.F.S. Anais do Simpósio Impacto das Queimadas sobre os Ecossistemas e Mudanças Globais. - 3º Congresso de Ecologia do Brasil. Universidade de Brasília. 1996.
- EMBRAPA/CNPM - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. 2019. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html. Acesso em: 18 nov. 2019.

ENGESAT - SOLUÇÕES EM IMAGENS DE SATÉLITE E GEOPROCESSAMENTO. 2019. **NDVI: CRIANDO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NO GLOBAL MAPPER**. Disponível em: http://www.engesat.com.br/software/global-mapper/calculo-do-indice-de-vegetacao-ndvi-no-global-mapper/?gclid=CjwKCAiAzuPuBRAIEiwAkkmOSENrX0XCA8QLDv1glPwxNUSehMuf6OfO9vUotROQTn_nPoUk9SK3RoCc8QQAvD_BwE. Acesso em: 23 nov. 2019.

EVA, H.; FRITZ, S. 2003. **Examining the potential of using remotely sensed fire data to predict areas of rapid forest change in South America**. Applied Geography, 23: 189-204.

FERNANDES, P. **TABELAS DE AVALIAÇÃO DA COMBUSTIBILIDADE E SEVERIDADE DO FOGO EM POVOAMENTOS FLORESTAIS**. Departamento Florestal. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro - UTAD. Vila Real, Portugal. 2004.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S. **The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels**. Oecologia, vol. 112, pp. 492- 501, 1997.

GLOBO. **Incêndio de grandes proporções atinge Parque Nacional de Brasília**. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2016/06/incendio-de-grandes-proporcoes-atinge-parque-nacional-de-brasilia.html>. Acesso em: 20 nov. 2019.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS. **ÍNDICE GERAL DO PLANO DE MANEJO DO PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA**. In: Plano de Manejo - Parque Nacional de Brasília. Convênio IBAMA - FUNATURA. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/PARNA%20Brasilia.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

IBRAM - INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. Bioma Cerrado. 2018. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/bioma-cerrado/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Parna de Brasília**. 2019. Disponível: <http://www.icmbio.gov.br/portal/parna-de-brasilia>. Acesso: 20 nov. 2019.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Parque Nacional de Brasília**. 2019. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/visitacao1/unidades-abertas-a-visitacao/213-parque-nacional-de-brasilia.html>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Floresta Nacional de Brasília**. 2019. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/visitacao1/unidades-abertas-a-visitacao/9398-floresta-nacional-de-brasilia>. Acesso em: 29 nov. 2019.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2019. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera_serie_txt.php?&mRelEstacao=83377&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=16/04/2015&mRelDtFim=07/05/2017&mAtributos=.,1,1,,,,,1,,,,, Acesso em: 26 nov. 2019.

IPCC, Climate Change 2001: Synthesis report. contribution of working group I, II, and III to the third assessment report of the IPCC [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001.

KENNARD, D.K., GOULD, K., PUTZ, F.E., FREDERICKSEN, T.S. & MORALES, F. 2002. **Effects of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest.** *Forest Ecology and Management* 162:197-208.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. **The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity.** US Dept. Interior, Northern Rocky Mountain Sci. Center, Bozeman, MT. 1999.

KEY, CH E NC BENSON, (2006). **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 Inventory System.* USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD: LA1-51.

KRUGER, F.J. 1984b. **Fire in forest.** In *Ecological effects of fire in South African ecosystems* (P.V. Booysen & N.M. Tainton, eds.). Springer-Verlag, Berlin, p.177-197.

KUSHLA, J., RIPPLE, W. (1997). **The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest.** *Forest Ecology and Forest Management.* Volume 95, Edição 2, 97-107. IssN 0378-1127.

LEITE, L.L. **Densidade global e infiltração de água no solo em área de cerrado submetida à queimada controlada no Distrito Federal, Brasil.** In: MIRANDA, H.S.; SAITO, C.H.; DIAS, B.F.S. *Anais do Simpósio Impacto das Queimadas sobre os Ecossistemas e Mudanças Globais. - 3º Congresso de Ecologia do Brasil.* Universidade de Brasília. 1996.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto,** 2007.

MAROD, D., KUTINTARA, U., TANAKA, H. & NAKASHIKUZA, T. 2002. **The effects of drought and fire on seed and seedling dynamics in a tropical seasonal forest in Thailand.** *Plant Ecology* 161:41-57.

MENESES, et al. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Brasília, 2012.

MILLER, J.D.; THODE, A.E. **Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR).** *Remote Sensing of Environment.* 2007.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Fauna e Flora.** 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomas/cerrado/fauna-e-flora.html>. Acesso em: 20 nov. 2019.

MURAKAMI, E.A. e KLINK, C.A. **Efeito do fogo na dinâmica de crescimento e reprodução e echinolaenainflexa(poiret) chase(poaceae)**. In: MIRANDA, H.S.; SAITO,C.H.; DIAS, B.F.S. Anais do Simpósio Impacto das Queimadas sobre os Ecossistemas e Mudanças Globais. - 3º Congresso de Ecologia do Brasil.Universidade de Brasília.1996.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION.**Landsat 8**. 2019. Disponível em:<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>. Acessoem: 18 nov. 2019.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS 61 imagery**. In: AVIRIS Workshop. Proceedings.Anais... JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

RAZAFIMPANILO, H.; FROUIN, R.; IACOBELLIS, S. F.; SOMERVILLE, R. C. J. 1995.**Methodology for estimating burned area from AVHRR reflectance data**. Remote Sens. Environ. 54:273-289.

REMMEL, T. K.; PERERA, A. H. 2001.**Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection**. Forest Ecologyand Management 152:119-129.

REZENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. **Sequestro de carbono uma experiência concreta**. 2ª ediçãorevisada e ampliada.Instituto ecológica.2001.

ROUSE, J. W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., “**Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains withERTS**”. In: Proceeding of ERTS- 1 Symposium. Anais... NASA, United States, n. 3. p. 309- 317, 1973.

ROUWN, A. 1993.**Regeneration by sprouting in slash and burn rice cultivation, Tai rain forest, Côte d’Ivoire**. Journal of Tropical Ecology 9:387-408.

ROY, D.P., BOSCHETTI L., TRIGG, S.N., 2006. **Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the Performance of the Normalized Burn Ratio**. IEEE Geoscienceand Remote Sensing Letters 3, 112-116.

SARTORELLI, P. A. R.; SILVA, J. M. S.; GORENSTEIN, M. R.; GOMES, J. E.; ÁVILA, E. Q. **REBROTA APÓS FOGO DE ESPÉCIES ARBÓREAS DE DIFERENTES GRUPOS FENOLÓGICOS FOLIARES EM CERRADO STRICTO SENSU**. In: Revista Científica Eletrônica De Engenharia Florestal - ISSN 1678-3867. Publicação Científica da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal de Garça/FAEF. Ano VI, número, 10, agosto de 2007.

SEIFFERT, M.E.B. **Mercado de carbono e protocolo de quioto oportunidades de negócio na busca da sustentabilidades**. Editora Atlas. São Paulo. 2009.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. **Variações na Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono por meio de Dados Hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará**. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Brasil. 2013.

SOARES, R. V. **Prevenção e controle de incêndios florestais**. ABEAS, 120 p. 1984.
SOARES, R. V. Incêndios florestais: controle e uso do fogo. Curitiba: FUPEF. 1985. 213p.

TEOBALDO, D.; **Quantificação do Grau de Severidade de Queimada em Unidades de Conservação no Distrito Federal por meio dos Índices Espectrais dNBR e RdNBR**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

UFRRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO. **ÍNDICES ESPECTRAIS**. 2019. Disponível em: [www.ufrj.br > deng > varella > Downloads > Apresenta > Indices espectrais](http://www.ufrj.br/deng/varella/Downloads/Apresenta/Indices%20espectrais). Acesso em: 25 nov. 2019.

UGARTE, M. F.; ZEQUEIRA, R. I.; LÓPEZ, F. 2001. **An approach for the compensation of the background variability in fire detection systems**. Infrared Physics & Technology, 42:23-30.

UHL, C., CLARK, K., CLARK, K. & MURPHY, P. 1981. **Early plant succession after cutting and burning in the upper Rio Negro region of the Amazonian basin**. Journal of Ecology 69:631-649.

USGS - SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. **Landsat 8 OLI and TIRS and their uses**. 2019. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-oli-and-tirs-and-their-uses>. Acesso em: 19 nov. 2019.

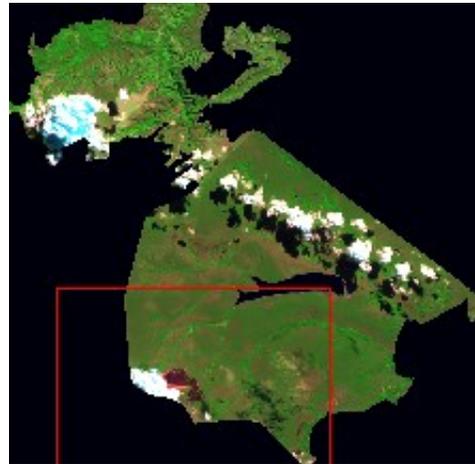
USGS - SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. **Explorer - Home**. 2019. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

YU, M. C. **SEQÜESTRO FLORESTAL DE CARBONO NO BRASIL - DIMENSÕES POLÍTICAS, SOCIOECONÔMICAS E ECOLÓGICAS**. Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento, pelo Curso de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná. 2004.

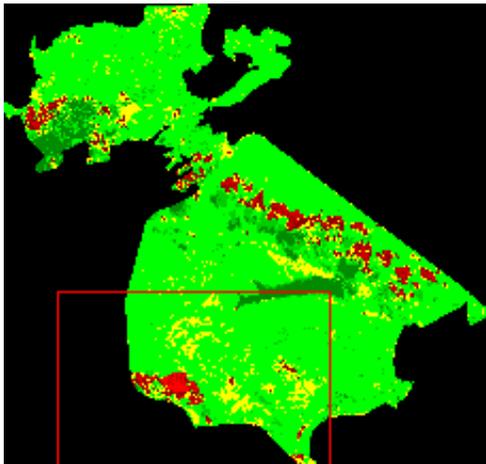
WHITE, J., RYAN, K., KEY, C., RUNNING, S. (1996). **Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery**. International Journal of Wildland Fire 6, 125–136.

APÊNDICE A - Registro das Imagens Scroll de R7G5B4 e RdNBR de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3

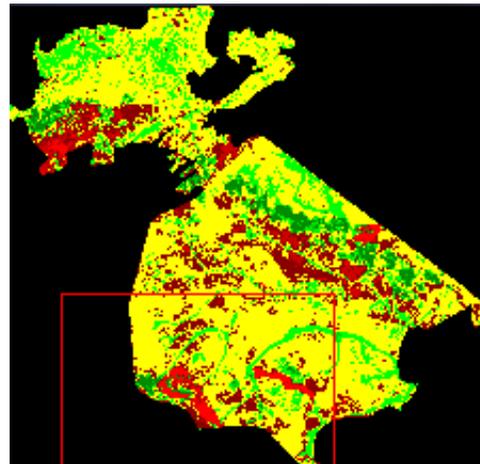
R7G5B4_18/05/2016



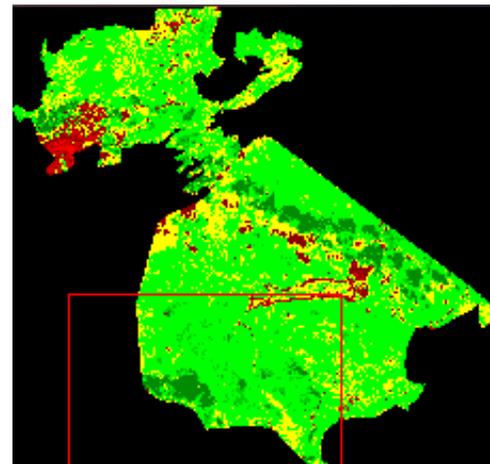
RdNBR_16/04/2016



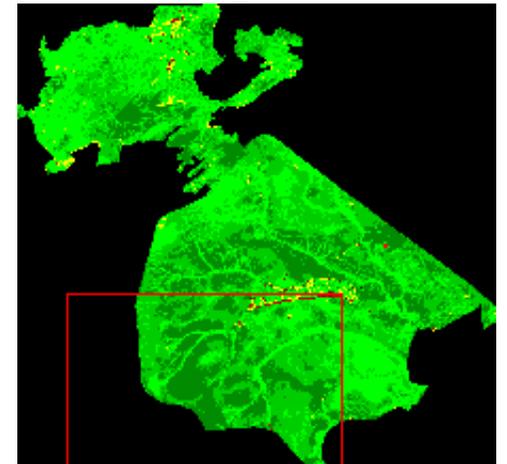
RdNBR_18/05/2016



RdNBR_19/06/2016

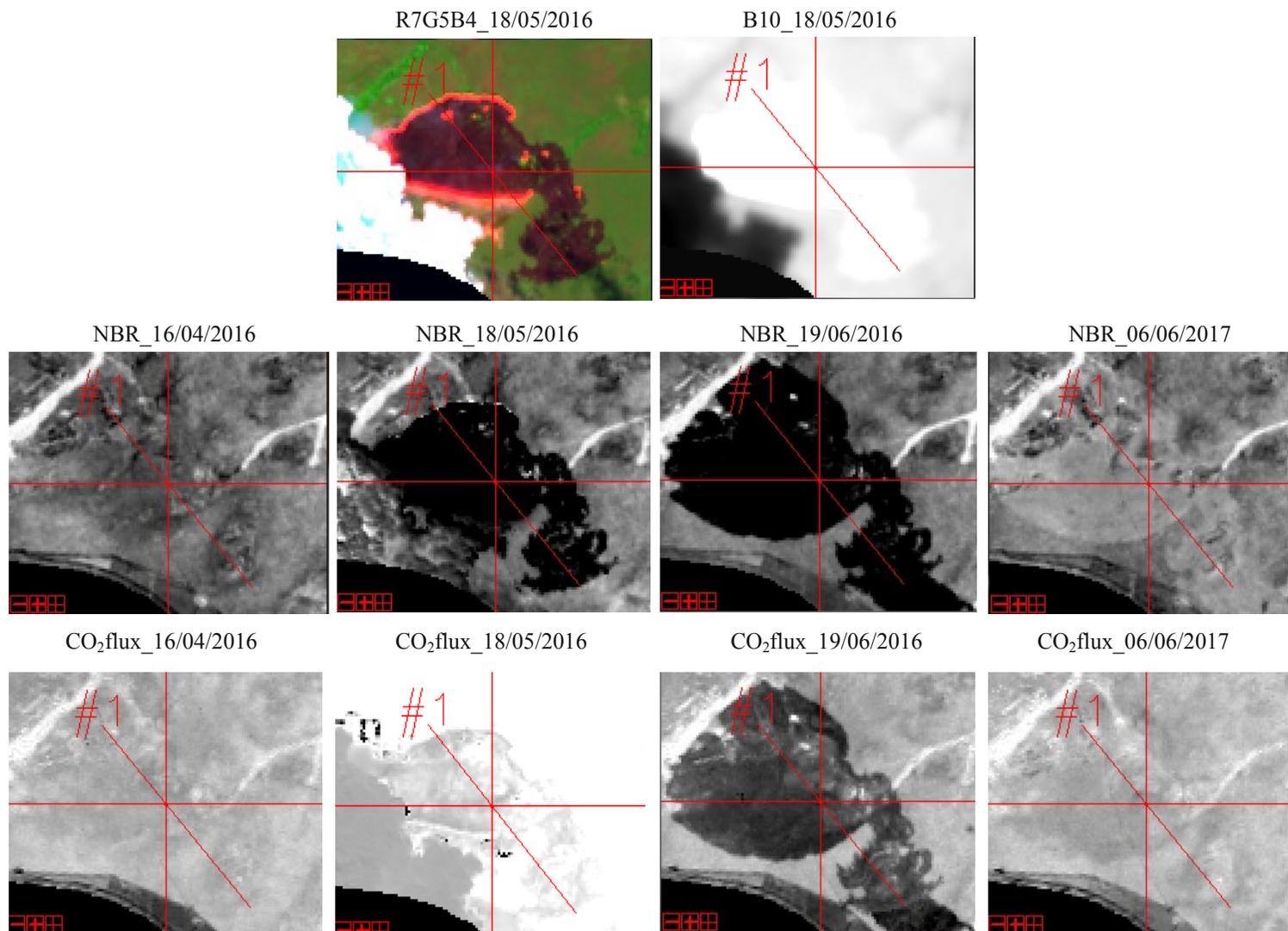


RdNBR_06/06/2017



Fonte: Elaborado pelos autores.

APÊNDICE B - Registro das Imagens Zoom de R7G5B4, Banda Termal B10 de 18/05/2016, NBR e CO₂flux de 16/04/2016 a 06/06/2017 do ENVI 5.3



Fonte: Elaborado pelos autores.