

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM SÃO BORJA**  
**CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO AMBIENTAL**

**KARINE MATTE SENGER**

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DO INCÊNDIO FLORESTAL DA REBIO SÃO  
DONATO**

.

**SÃO BORJA, RS**

**2022**

**KARINE MATTE SENGER**

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DO INCÊNDIO FLORESTAL DA REBIO SÃO  
DONATO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à Universidade Estadual do Rio  
Grande do Sul – UERGS como requisito para  
obtenção do título de Bacharelado em Gestão  
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Rodrigo Fernandez  
Caresani.

SÃO BORJA, RS

2022

**KARINE MATTE SENGER**

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DO INCÊNDIO FLORESTAL DA REBIO SÃO  
DONATO**

Monografia apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Bacharel em Gestão  
Ambiental na Universidade Estadual do Rio  
Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. José Rodrigo Fernandez  
Caresani.

Aprovado em: / /

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. José Rodrigo Fernandez Caresani  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

---

Professora Ma. Fabiane Wiederkehr  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS

---

Me. Mauricio de Freitas Scherer  
Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - SEMA

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, principalmente meus pais, que sempre se esforçaram para me proporcionar educação de qualidade, e demonstraram total apoio desde o início da minha caminhada acadêmica.

Aos meus irmãos e amigos pelo companheirismo, cumplicidade e pelo conforto que me proporcionaram nos momentos ruins.

Pela UERGS, uma instituição que sempre ofereceu ensino de qualidade e me proporcionou inúmeras oportunidades e experiências.

Ao meu orientador, José Rodrigo, que conduziu o trabalho com muita dedicação e sempre se mostrou disponível para me ajudar.

E aos meus colegas de curso e professores, pessoas que convivi durante os últimos anos que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional.

*“Aqueles que não aprendem com o passado estão condenados a repeti-lo. ”*

*(Stephen King)*

## RESUMO

O incêndio florestal da Rebio São Donato, ocorrido em meados de janeiro de 2022, em área queimada de forma contínua e íntegra, consiste no maior incêndio florestal do bioma Pampa brasileiro e das unidades de conservação gaúchas, entre suas causas destaca-se a histórica onda de calor e estiagem prolongada que assolou a região, a vegetação rasteira gerou uma biomassa perigosa que contribuiu muito para uma rápida propagação do fogo, a hidrografia, intensidade e direção dos ventos também cooperaram para uma rápida propagação. O trabalho de campo realizado identificou parte dos danos ambientais provocados pela queima deste ecossistema e sua regeneração vegetal natural. Os produtos Landsat foram usados para mapear a área queimada, o uso do solo da região, através de transformações radiométricas das imagens foi possível estimar as temperaturas de superfície da área atingida, a regeneração da vegetação foi monitorada pelo uso de imagens NDVI. A análise de temperaturas de superfície demonstra que a área queimada se tornou uma ilha de calor após o incêndio, a regeneração vegetal acelerou a partir do mês de março, dois meses após o incêndio e se estendeu durante o outono. A estimativa de área queimada obtida neste trabalho consiste em 1.020 ha o que representa aproximadamente 38% do banhado/fitofisionomias associadas. Existem relatos de que mecanismos de captação de água sem licença ambiental estavam contribuindo com o déficit hídrico do banhado em um período que antecede o incêndio. Diversas propostas foram formuladas para prevenir e controlar este tipo de desastre ambiental na região.

**Palavras-chave:** Temperaturas de superfície, NDVI, banhado.

## ABSTRACT

The forest fire of the São Donato environmental reserve, which occurred in mid-January 2022, in a continuous and integrated area, is the largest forest fire in the Brazilian Pampa biome and in the Rio Grande do Sul conservation units, between the historic heat wave and prolonged protection that ensures a region, a very fast vegetation forest generated a biomass that quickly contributes to a fast fire protection, the high intensity hydrography and projected wind direction also cooperated for a direction. The land used to map an area, the soil used to map the region, the images were transformed by radios of the affected areas through the affected area, through the use of rain, the area affected by the metric use of the vegetation was monitored by the images NDVI. The burned area became a heat display after the fire, a surface temperature analysis of the month of March, two after the fire and extended into the fall. There are reports that mechanisms for capturing water without an environmental license were contributing to the swamp's water deficit in the period before the fire. The area estimate made in this work consists of 1.020 ha which approximately 38% of the wetland/associated vegetation types. The proposals were formulated to prevent and control this type of environmental disaster in the region.

**Keywords:** Surface temperatures, NDVI, wetland.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1:</b> Localização da Rebio São Donato e banhado/florestas/savanas.....	5
<b>FIGURA 2:</b> Classificação não supervisionada que resultou em 38 classes espectrais.....	14
<b>FIGURA 3.</b> Composição multiespectral B(banda 4), R(banda 5) e G(banda 7) montada a partir da imagem do dia 16 de janeiro pelo Landsat 8 as 13:37.....	16
<b>FIGURA 4.</b> Fotografia registrada no dia 20 de janeiro de 2022 do local consumido pelas chamas no município de Maçambará.....	17
<b>FIGURA 5.</b> Hidrografia da área de estudo e fotografias de uma das estruturas subterrâneas embaixo da BR 472 e do canal de irrigação.....	18
<b>FIGURA 6.</b> Fotografias retiradas em campo próximas às estruturas abaixo da BR 472 pela qual flui a água acumulada no banhado.....	20
<b>FIGURA 7.</b> Chuva Acumulada Mensal: Estação São Borja (A830).....	21
<b>FIGURA 8.</b> Medida de declividade sendo realizada no ambiente Spring a partir de grades altimétricas SRTM de 30 m.....	21
<b>FIGURA 9.</b> Mapa de uso e ocupação do solo obtido no período em que ocorreu o incêndio.....	23
<b>FIGURA 10.</b> Fotografias das principais culturas identificadas em campo. a) Lavoura de arroz, b) Lavoura de soja, c) Lavoura de milho.....	24
<b>FIGURA 11.</b> Mapa que apresenta o banhado/fitofisionomias associadas e área queimada no incêndio florestal da Rebio São Donato e seu entorno.....	25
<b>FIGURA 12.</b> Estimativas da temperatura de superfície obtidas no período do verão na área queimada.....	27
<b>FIGURA 13.</b> Valores de NDVI médios obtidos da área queimada.....	29
<b>FIGURA 14.</b> Imagens Landsat do momento do incêndio e quatro meses e meio depois. a) Composição multiespectral do dia 16/01/2022, b) Composição multiespectral do dia 01/06/2022.....	30



**FIGURA 15.** Programa elaborado na linguagem Legal para se obter estimativas de temperatura de superfícies.....36

**FIGURA 16.** Programa escrito em linguagem Legal para gerar os NDVI.....36

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.</b> Landsat 8-9 <i>Operational Land Imager</i> (OLI) e <i>Sensor Termal Infravermelho</i> (TIRS). .....	10
<b>TABELA 2.</b> Dados geoestatísticos obtidos da área queimada usando as temperaturas de superfície estimados a partir da banda 10 do Landsat 8 e 9.....	26
<b>TABELA 3.</b> Dados geoestatísticos obtidos a partir de imagens NDVI da área queimada.....	28

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>SUMÁRIO</b> .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. DESENVOLVIMENTO.....	3
2.1 Unidades de conservação no Rio Grande do Sul.....	3
2.2 REBIO São Donato .....	4
2.3 Área de estudo.....	4
2.4 Incêndios Florestais em Unidades de conservação .....	7
2.5 OBJETIVOS.....	7
2.5.1 Objetivo geral.....	7
2.5.2 Objetivos específicos.....	7
2.6 Produtos Landsat (coleção 1 e 2).....	8
2.7 Landsat 8 e 9.....	8
2.8 Montagem do banco de dados geográfico.....	10
2.9 Estimativa das temperaturas de superfície.....	11
2.10 Classificação de imagens.....	12
2.11 Perfis multitemporais de NDVI da área queimada.....	14
3 RESULTADOS.....	16
3.1 Direção e intensidade do vento.....	16
3.2 Hidrografia e vegetação.....	18
3.3 Declividade.....	21

3.4 Uso do solo.....	22
3.5 Estimativa de banhado queimado.....	24
3.6 Temperaturas de superfície.....	25
3.7 Recuperação Vegetal.....	27
3.8 Propostas.....	30
4. CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS .....	33
ANEXOS .....	35

## 1. INTRODUÇÃO

O início do ano de 2022 se caracterizou por um desequilíbrio climático que assolou todo o Rio Grande do Sul, a forte onda de calor e estiagem prolongada que afetou o sul do Brasil, foi sem dúvida, a mais intensa e duradora do início do século XXI. Um fenômeno altamente correlacionado a este desequilíbrio climático ocorreu de forma paralela, os múltiplos incêndios florestais, os quais se espalharam de diversas formas gerando vários focos que desafiaram as autoridades e levaram os bombeiros da Fronteira Oeste a exaustão.

O incêndio florestal analisado através de trabalho de campo, depoimentos, material divulgado em redes sociais, além da ampla análise/processamento de imagens multiespectrais, ocorreu em uma reserva biológica localizada na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, nos municípios de Itaqui e Maçambará.

O incêndio da Reserva Biológica do São Donato se iniciou com pequenos focos inicialmente controlados pelos corpos de bombeiros da região nos dias 13 e 14 de janeiro, nos dias 15 e 16 de janeiro ocorreu a propagação do incêndio em grande escala, a ação dos bombeiros foi fundamental para que o incêndio florestal não se estendesse de forma descontrolada na área que abrange o município de Itaqui, entretanto, a região que corresponde ao município de Maçambara foi fortemente consumida pelas chamas, destruindo praticamente toda a vegetação rasteira que caracteriza esta parte do banhado, os animais que não fugiram, presume-se que morreram devido ao calor intenso gerado pelo clima e incêndio.

As forças de contenção do fogo incluíram corpos de bombeiros de diversos municípios da região, pilotos agrícolas que se tornaram voluntários neste momento crítico, gestores das reservas que auxiliaram a coordenar o combate ao fogo. Enfrentaram temperaturas acima dos 40°C e sensação térmica superior a 50°C, relatos que impressionaram a população nas redes sociais.

Alguns relatos informais indicam que o início do incêndio ocorreu próximo da BR 472, a qual corta a Rebio São Donato e divide os municípios de Itaqui e Maçambara, o trabalho de campo realizado pelos pesquisadores mostra que a BR recebe muito material indevidamente descartado, embalagens, garrafas, latas, os quais representam materiais com potencial de iniciar um incêndio nas condições climáticas extremas que o banhado se encontrava.

Relatos de quem participou da análise de danos ambientais, apontam que existia captação de recursos hídricos sem licenciamento ambiental dentro do banhado, o que provocou fiscalização na região, este tipo de conflito entre a categoria de preservação na qual se enquadra a reserva e produtores, lamentavelmente é uma das características históricas na região.

A atividade da pecuária que se desenvolve do lado de Itaqui na reserva pode ter contribuído com um maior controle das chamas, pois esta atividade diminui a biomassa presente no ecossistema.

Diante deste evento peculiar soma-se os produtos do programa Landsat, a existência de dois satélites ativos deste programa de monitoramento desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o Landsat 8 e 9, permitiu o imageamento sem nuvens em várias datas no período avaliado (dezembro de 2021 a junho de 2022), gerando uma série de dados que detalham as causas e consequências do incêndio florestal analisado neste trabalho de conclusão de curso.

As apreciações realizadas consistem em identificar e mapear a área queimada através de saídas de campo e análise multiespectral/multitemporal das imagens de satélites usadas. Mapeamento do uso e ocupação do solo da reserva e seu entorno com registro de lavouras através de coordenadas geográficas obtidas pelo GPS e levantamento fotográfico da região. Transformações radiométricas que permitem estimar as temperaturas de superfície da área afetada foram executadas no programa Spring 5.5.6 (Câmara *et al*, 1996) usando a linguagem de programação legal disponível neste SIG (Sistema de Informações Geográficas), as quais são fundamentais neste tipo de desastre ambiental, pois trata-se de um incêndio de superfície caracterizado pela queima de vegetação de pequeno porte. A regeneração vegetal do banhado está sendo acompanhada por saídas de campo e através de perfis multitemporais de imagens NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Os incêndios florestais no Rio Grande do Sul sempre foi um assunto de pouca divulgação e raras ações de prevenção, entretanto, as mudanças climáticas que estão ocorrendo no século XXI levam a uma inquietação e revisão das políticas públicas e dos planos de manejo das reservas ambientais.

Este trabalho acadêmico já foi parcialmente divulgado em eventos presenciais nas semanas do meio ambiente da região, no qual se destaca o 5º Seminário Municipal de Meio

Ambiente ocorrido em Maçambará no dia 7 de junho de 2022, além disso está associado a um projeto de extensão que visa elaborar um mini-documentário ambiental do incêndio florestal.

Os dados obtidos neste trabalho acadêmico buscam elucidar a magnitude do incêndio florestal ocorrido, o contexto climático que favoreceu este desastre ambiental, outros fatores, como direção e velocidade do vento durante o incêndio, hidrografia do banhado e declividade da área atingida. Os aprendizados gerados e os projetos/publicações relacionados, buscam gerar uma sociedade mais consciente e preparada para estes acontecimentos, os quais provavelmente irão se repetir na região e talvez na própria reserva ao longo do século XXI.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Unidades de conservação no Rio Grande do Sul**

Mesmo sendo considerado um país biodiverso, o Brasil já teve sua natureza extremamente explorada, principalmente para produção de recursos e para agricultura e pecuária. A partir disso, nota-se a importância da criação de Unidades de Conservação no território Nacional, Estadual e Municipal, pois o Brasil abrange 10 e 20% das espécies do mundo (GANEM, 2010).

O estado do Rio Grande do Sul possui um imenso patrimônio cultural relacionado à biodiversidade, onde o Bioma Pampa se destaca. Sua vegetação se destaca pelo predomínio de campos e vegetação ciliar. Segundo MMA (2014), por ser um conjunto de ecossistemas muito antigo, apresenta flora e fauna próprios ainda não completamente descritos pela ciência, possuindo um patrimônio genético, natural e cultural de grande valor. O que torna sua preservação necessária.

Outro fator importante para a conservação do Pampa é a crescente pressão que este tem sofrido em relação ao agronegócio (PICOLLI; SCHNADELBACH, 2007). A extensiva produção agrícola tem prejudicado a paisagem local. Nisso, as unidades de conservação entram como forma de minimizar os danos, criando espaços de relevância ambiental.

## **2.2 REBIO São Donato**

A Reserva Biológica de São Donato foi criada com o Decreto N° 23.798, de 12 de março de 1975 pelo governo do estado do Rio Grande do Sul. Possuindo área de 4.392 ha e está inserida nos limites da Bacia Hidrográfica do baixo curso do Rio Butuí, afluente do Rio Uruguai.

Localizada nos municípios gaúchos de Maçambará e Itaqui, que estão entre os maiores produtores de arroz no Rio Grande do Sul, o local entorno da reserva já foi muito explorada pela agricultura.

## **2.3 Área de estudo**

A Reserva biológica São Donato localizada na Fronteira Oeste, no estado do Rio Grande do Sul cortado pela BR- 472, nos municípios de Maçambará e Itaqui é classificada como Unidade de Conservação Estadual, criada através do Decreto N° 23.798 de 12 de março de 1975. Pertencente ao grupo de Proteção Integral, que tem como objetivo preservar seu ambiente natural das extrações intensas de seus recursos naturais e proteger as espécies biológicas (RIO GRANDE DO SUL,1975).

Em 2021 a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) iniciou o processo de regularização fundiária da Reserva Biológica do São Donato, adquirindo 732 hectares, esta foi a primeira área adquirida pelo Estado nesta Unidade de Conservação (SEMA, 2021). Esta aquisição representa aproximadamente 17 % da reserva que possui 4.392 ha.

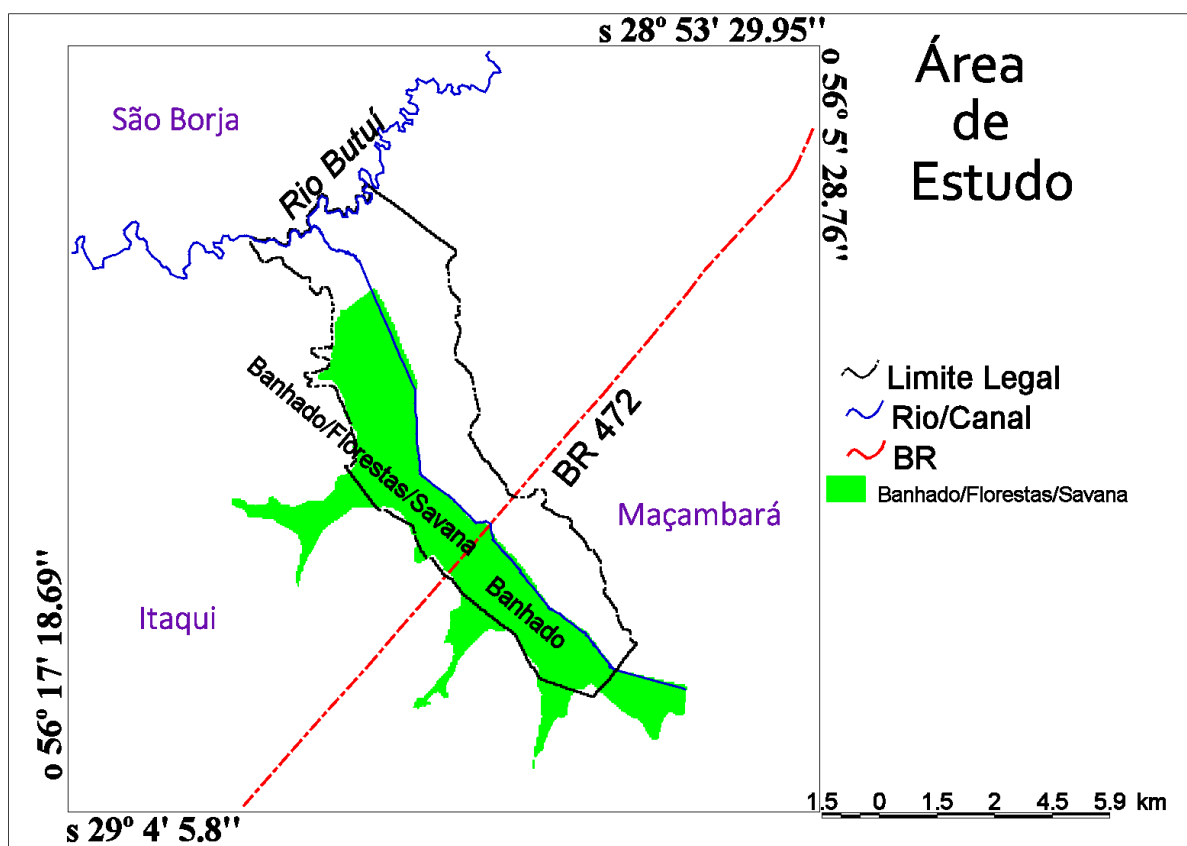
A demora na regularização fundiária da reserva gera discrepâncias entre o uso e ocupação do solo e a categoria na qual o decreto de criação a classifica, os que conhecem a realidade da reserva questionam a eficiência da proteção que a legislação deveria gerar, alguns propõem uma recategorização da reserva.

Existe uma divergência entre o ecossistema que configura o banhado e suas fitofisionomias associadas (florestas e savanas), ou seja, a estrutura biofísica que pode ser enquadrada como vegetação natural predominante e os limites legais da reserva. Isso demanda cuidado ao nos referirmos a esta área de estudo, pois em alguns momentos a narrativa está associada aos limites legais da reserva e em outros casos a estrutura biofísica no qual de fato se constitui a paisagem natural que se pretende conservar através da criação da referida reserva.



O mapeamento e trabalho de campo realizado, sobre uso e ocupação do solo e da hidrografia da REBIO São Donato permite concluir que o canal de irrigação que atravessa a reserva representa uma divisão bem clara nas fitofisionomias presentes em sua superfície, os quais somados a outros elementos da paisagem e jurídicos, demandam uma definição original e inédita da área de estudo, a qual foi elaborada a partir da Figura 1, a qual usou dados de BETTIM, 2021.

**Figura 1.** Localização da Rebio São Donato e banhado/florestas/savanas.



Fonte: Adaptado de BETTIM (2021).

A área de estudo deste trabalho acadêmico pode ser definida usando um critério geográfico, consiste em um retângulo determinado pelo par de coordenadas geográficas visível na Figura 1, portanto foi analisada a reserva e seu entorno.

A REBIO São Donato é uma unidade de conservação localizada ao SE da Rio Butuí, este curso da água consiste em um dos limites da reserva e dos municípios de São Borja e Itaqui, parte de sua área está constituída pelo denominado “banhado São Donato”, o qual fica localizado ao sudoeste de um extenso canal de irrigação que atravessa a reserva e se torna o

limite entre o banhado/florestas/savanas e as áreas com outro tipo de vegetação (lavouras, pecuária, etc.).

A pesar da paisagem natural presente nesta região ser conhecida popularmente como “banhado São Donato”, estudos demonstram que se trata de um ecossistema com fitofisionomias diferenciadas, onde é possível localizar florestas, savanas, pastagens de diversos níveis de conservação.

Tanto a REBIO São Donato como o banhado são cortados pela BR 472, a qual além de dividir a reserva e o ecossistema que se alaga com frequência (características dos banhados), consiste no limite entre os municípios de Maçambará (localizado ao sudeste da mencionada BR) e Itaqui (localizado ao noroeste da BR).

Além disso, é possível identificar claramente uma diferença entre a vegetação que está localizada nos municípios de Maçambará e Itaqui, a pesar de apresentarem elementos em comum, a área situada ao sudeste da BR 472 (Maçambará) possui uma vegetação mais homogênea e caracterizada pela baixa estatura, a qual distingue banhados, razão pela qual foi identificada na Figura 1 como apenas banhado. A área situada ao noroeste da referida BR (“outro lado da estrada” localizado em Itaqui) possui uma vegetação mais heterogênea, a qual inclui florestas, savanas e pastagens, portanto possui uma mistura mais abastada de portes de vegetação diferenciados. Outra diferença consiste na atividade de pecuária, visível do lado de Itaqui e inexistente na fração de Maçambará para quem observa a partir da BR.

Trata-se de uma região que faz parte da microbacia do rio Butui, a água flui através de um canal de irrigação em direção a este rio, além disso, a água que se acumula no banhado flui através de estruturas subterrâneas localizadas abaixo da BR 472 no sentido que vai de Maçambará para Itaqui.

Dados da fauna e flora da REBIO São Donato podem ser obtidos através dos levantamentos realizados pelo Laboratório de Gestão Ambiental Aplicada (LAGEAA, 2022).

## **2.4 Incêndios Florestais em Unidades de conservação**

Incêndios são fatores preocupantes em ecossistemas florestais, pois eles apresentam um alto impacto sobre as condições bióticas e abióticas. Quando acontece de forma muito recorrente pode levar a fragmentação da paisagem e sua degradação (ADÁMEK *et al.* 2015).

No Brasil, as ocorrências de incêndio são ameaças contínuas aos objetivos das unidades de conservação (KOPROSKI *et al.* 2011), demonstrando a necessidade de um maior investimento em políticas que visem a diminuição dos impactos causados pelo fogo.

Desde 1980, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) mantém um programa denominado Queimadas, cujo objetivo é recolher e armazenar dados e informações obtidos a partir do monitoramento dos focos de incêndio em todo o País.

Entretanto, apesar do monitoramento existir há décadas, no Rio Grande do Sul, poucos são os trabalhos acadêmicos que incluem a divulgação dos dados obtidos por mapeamento, exposição na região em que o incêndio ocorreu, interação com a sociedade e com os produtores agrícolas, além das autoridades associadas à prevenção e combate aos incêndios.

## **2.5 OBJETIVOS**

### **2.5.1 Objetivo geral**

Usar técnicas de sensoriamento remoto para identificar as causas, danos e aprendizados do incêndio florestal da Rebio São Donato ocorrido em meados de janeiro de 2022.

### **2.5.2 Objetivos específicos**

- Mapear a área queimada;
- Identificar as causas do incêndio e os fatores de propagação;
- Realizar saídas de campo com a finalidade de identificar os danos ambientais provocados pelo incêndio e identificar lavouras através do uso do GPS de navegação;
- Elaborar um mapa de uso do solo do período analisado (verão 2022);
- Estimar as temperaturas de superfície usando a banda 10 (infravermelho térmico);

- Monitorar a regeneração vegetal através de imagens NDVI;
- Elaborar propostas que visem prevenir acontecimentos semelhantes na reserva e região.

## **2.6 Produtos Landsat (coleção 1 e 2)**

O Programa Landsat constitui-se em uma série de satélites desenvolvidos e lançados pela NASA. Sua missão foi viabilizar a obtenção de dados multiespectrais calibrados, capaz de fornecer imagens de alta resolução espacial, para permitir comparações do estado da superfície terrestre ao longo do tempo (NOVO, 2008).

Em 2016, o USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) reorganizou o arquivo Landsat em uma estrutura de gerenciamento de coleção em camadas intitulada “*Landsat Collection 1*”. Essa estrutura garante que todos os produtos “*Landsat Level-1*” forneçam um arquivo consistente de qualidade de dados conhecida, enquanto controla a melhoria contínua do arquivo e o acesso a todos os dados à medida que são adquiridos. A implementação de coleções representa uma mudança substancial na gestão do arquivo Landsat, garantindo qualidade consistente ao longo do tempo e em todos os instrumentos. A Coleção 1 contém todos os dados de Nível 1 adquiridos desde 1972 até o presente do Landsat 1-8. O Landsat 9 está disponível apenas na Coleção 2.

O “*Landsat Collection 2*” marca o segundo grande evento de reprocessamento do arquivo USGS “*Landsat Level-1*”, resultando em várias melhorias de produto que aproveitam os avanços recentes no processamento de dados, desenvolvimento de algoritmos e recursos de acesso e distribuição de dados. Uma característica primária da Coleção 2 é a melhoria substancial na precisão absoluta de geolocalização do conjunto de dados de referência terrestre global usado no fluxo de processamento do “*Landsat Level-1*”. Além disso, a Coleção 2 inclui fontes de modelagem de elevação digital global atualizadas, atualizações de calibração e validação, bem como refletância de superfície de nível 2 global e produtos baseados em cena de temperatura de superfície de 1982 até o presente. A coleção 2 contém todos os sensores Landsat Landsat 1-9 (USGS, 2022).

## 2.7 Landsat 8 e 9

O USGS fornece Landsat 8-9 *Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor* (OLI/TIRS) *Collection 2 Level-2 Science Products* (L2SP) através do EarthExplorer ou LandsatLook. O L2SP inclui produtos baseados em cenas de Reflexão de Superfície e Temperatura de Superfície.

A refletância da superfície fornece uma estimativa da refletância espectral da superfície da Terra, uma vez que seria medida ao nível do solo na ausência de dispersão ou absorção atmosférica. Os produtos *Landsat Surface Reflectance* são gerados no *Earth Resources Observation and Science* (EROS) *Center* em uma resolução espacial de 30 metros. Os dados *Landsat 8 Surface Reflectance* são gerados a partir do *Land Surface Reflectance Code* (LaSRC). O LaSRC faz uso da faixa de aerossóis costeiros para realizar testes de inversão de aerossóis, usa dados climáticos auxiliares do MODIS e usa um modelo exclusivo de transferência radiativa. Além disso, o LaSRC codifica o ângulo de zênite de visão para “0”, e os ângulos de zênite solar e zênite de visão são usados para cálculos como parte da correção atmosférica. Detalhes sobre os produtos de dados LaSRC e *Landsat 8 Surface Reflectance* podem ser encontrados no *Landsat 8 Surface Reflectance Code Product Guide*. A Temperatura da Superfície mede a temperatura da superfície da Terra em Kelvin (K). Os produtos de Temperatura da Superfície são gerados no Centro de Observação e Ciência dos Recursos Terrestres (EROS) com uma resolução espacial de 30 metros. O produto *Landsat Surface Temperature* é gerado a partir de bandas infravermelhas térmicas *Landsat Collection 2 Level-1, Top of Atmosphere* (TOA) *Reflectance, TOA Brightness temperature, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global Emissivity Database* (GED) *data*, *ASTER Normalized* Dados do Índice de Vegetação Diferencial (NDVI) e perfis atmosféricos de altura geopotencial, umidade específica e temperatura do ar extraídos de dados de reanálise (USGS, 2022b).

As imagens Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) consistem em nove bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 7 e 9. A nova banda 1 (ultra-azul) é útil para imagens costeiras e estudos de aerossóis. A nova banda 9 é útil para detecção de nuvens cirrus. A resolução da Banda 8 (pancromática) é de 15 metros. As bandas térmicas 10 e 11 são úteis para fornecer temperaturas de superfície mais precisas e são coletadas a 100 metros. O tamanho aproximado da cena é de 170 km norte-

sul por 183 km leste-oeste. Os instrumentos do Landsat 9 são cópias melhoradas dos do Landsat 8.

Neste trabalho de conclusão de curso foram usadas as bandas 4, 5, 6, 7 e 10 do Landsat 8 e Landsat 9, todas as imagens associadas a coleção 2. A Tabela 1 apresenta os dados básicos do sensor OLI e TIRS.

**Tabela 1.** Landsat 8-9 *Operational Land Imager* (OLI) e *Sensor Termal Infravermelho* (TIRS). Fonte: USGS (2022 c).

<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de onda (micrômetros)</b>	<b>Resolução (metros)</b>
Banda 1 - Aerossol costeiro	0,43-0,45	30
Banda 2 – Azul	0,45-0,51	30
Banda 3 – Verde	0,53-0,59	30
Banda 4 – Vermelho	0,64-0,67	30
Banda 5 - Infravermelho Próximo (NIR)	0,85-0,88	30
Banda 6 - SWIR 1	1,57-1,65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0,50-0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36-1,38	30
Banda 10 - Infravermelho Térmico (TIRS) 1	10.6-11.19	100
Banda 11 - Infravermelho Térmico (TIRS) 2	11.50-12.51	100

## 2.8 Montagem do banco de dados geográfico

Para a realização deste trabalho acadêmico foi criado um banco de dados geográficos utilizando o software Spring 5.5.6 desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), com o qual foi elaborado um banco de dados contendo imagens multiespectrais de 12 datas diferentes dos satélites Landsat 8 e 9, o limite legal da reserva, modelos altimétricos SRTM de 30 metros, além disso foram adicionadas informações coletadas em campo.

As imagens multiespectrais incorporadas consistem nas bandas 4, 5, 6 e 7 do sensor OLI e banda 10 do sensor TIRS, estas imagens e os modelos de elevação foram obtidos do site <https://earthexplorer.usgs.gov/> o qual consiste em um repositório contendo muitos dados processados pela USGS, gerados pela NASA.

As imagens multiespectrais do satélite Landsat 8 e 9 incorporadas ao banco de dados consistem na cena identificada com órbita 224 e cena 80, imagens obtidas nas seguintes datas:

13/11/2021, 31/12/2021, 16/1/2022, 24/1/2022, 1/2/2022, 9/2/2022, 5/3/2022, 21/3/2022, 14/4/2022, 16/5/2022, 24/5/2022 e 1/6/2022. Portanto existem imagens incorporadas do antes, durante e pós incêndio.

Uma das características do estudo do incêndio florestal da Rebio São Donato foi a grande quantidade de imagens de satélites usadas para analisar as condições que caracterizaram este desastre ambiental, a existência de dois satélites Landsat permite uma passagem a cada 8 dias (resolução temporal combinada de ambos os satélites), o que somado a um período de baixa nebulosidade tornou possível uma análise multiespectral e multitemporal muito detalhada da região no período que precede o incêndio e o período que o sucede. Isto permitiu avaliar as temperaturas de superfície antes, durante e após o incêndio, além de permitir o monitoramento multiespectral da regeneração natural do banhado através de imagens NDVI.

## 2.9 Estimativa das temperaturas de superfície

O procedimento usado para calcular as temperaturas de superfície é o recomendado pela USGS, consiste em duas etapas usando a banda 10 dos satélites Landsat 8 ou 9, na primeira ocorre a conversão dos ND (Números Digitais) em Radiância de Topo da Atmosfera ( $L_\lambda$ ), para isso utiliza-se a equação 1:

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$L_\lambda$  = Radiância de Topo da Atmosfera (Watts/ (m<sup>2</sup>\*srad\*µm))

$M_L$  = fator de reescalonamento multiplicativo específico de banda dos metadados (RADIANCE\_MULT\_BAND\_X, onde x é o número da banda)

$A_L$  = fator de reescalonamento aditivo específico da banda dos metadatos (RADIANCE\_ADD\_BAND\_X, onde x é o número de banda).

$Q_{cal}$  = valores de pixel de produto padronizados quantizados e calibrados (ND).

A próxima etapa consiste em transformar os valores de radiância de topo da atmosfera ( $L_\lambda$ ) em temperaturas de superfície terrestre (TS). Para isso utiliza-se a equação 2:

$$TS = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{Equação 2}$$

TS = Estimativa de temperatura terrestre (K).

$L_\lambda$  = Radiância de Topo da Atmosfera (Watts/ (m<sup>2</sup>\*srad\*μm).

$K_1$  = Constante de conversão térmica específica de banda dos metadatos (K1\_CONSTANT\_BAND\_X, onde x é o número da banda térmica).

$K_2$  = Constante de conversão térmica específica de banda dos metadatos (K2\_CONSTANT\_BAND\_X, onde x é o número da banda térmica).

Para executar este procedimento no Spring 5.5.6 foi necessário elaborar uma pequena linguagem de programação usando as ferramentas internas do programa denominadas linguagem Legal, o anexo A apresenta o programa usado, o qual realiza as duas etapas em uma única equação. Após se obter uma estimativa em graus Kelvin, usava-se mais uma transformação para gerar dados na escala Celsius.

## 2.10 Classificação de imagens

Para a elaboração do uso do solo foi usado um classificador não supervisionado no qual foram utilizadas imagens NDVI de três datas estratégicas para o mapeamento das lavouras de verão, período em que ocorreu o incêndio florestal. As imagens NDVI foram elaboradas a partir das bandas 4 e 5 do sensor OLI das datas de 13/11/2021, 23/12/2021 e 9/2/2022. As imagens NDVI foram calculadas para 8 bits, sem números negativos, o que representa uma faixa que vai de 0 a 255 no computador. Foi usada a equação 3 para elaborar estas imagens, consiste no índice de vegetação normalizado proposto por Rouse *et al.* 1974:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_v}{\rho_{IV} + \rho_v} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:



$\rho_{IV}$  = é a banda associada ao infravermelho próximo (banda 5).

$\rho_V$  = é a banda associada ao vermelho próximo (banda 4).

As imagens NDVI usadas na classificação foram elaboradas a partir dos números digitais das imagens da coleção 2 e nível 2 do programa Landsat, ou seja, não foram convertidas em radiância, como o processo de classificação é uma análise de cunho qualitativo que visa identificar feições e alvos na superfície terrestre, esta transformação radiométrica não é obrigatória. Entretanto, para elaborar os perfis multitemporais a transformação sim é necessária, o que foi realizado em outra etapa do trabalho de conclusão de curso.

O processo de classificação não supervisionado no Spring 5.5.6 foi realizado em duas etapas, primeiro ocorreu a segmentação da imagem usando o algoritmo denominado Crescimento de Regiões, com índice de similaridade 12 e área de pixels 10. A segunda etapa consistiu no uso do classificador Ioseg com limiar de aceitação de 95%. O que gerou 38 classes espectrais que demandaram associação a classes de campo. As classes espectrais foram interpretadas e algumas associadas aos dados de campo, em especial o uso de GPS para identificar coordenadas das lavouras identificadas em campo. A Figura 2 apresenta o resultado.

**Figura 2.** Classificação não supervisionada que resultou em 38 classes espectrais.



Fonte: Autor (2022).

### **2.11 Perfis multitemporais de NDVI da área queimada**

Os índices de vegetação são poderosas ferramentas para acompanhar o ciclo fenológico das lavouras e a regeneração vegetal de áreas consumidas pelas chamas em incêndios florestais, para que os valores obtidos destes índices sejam compatíveis entre satélites diferentes, é recomendado que as imagens NDVI geradas para confeccionar perfis multitemporais sejam previamente transformadas em valores de radiância, os quais representam valores de natureza física, para posterior aplicação da equação NDVI que explora o contraste entre o infravermelho e vermelho existente no comportamento espectral da vegetação. Portanto as bandas 4 e 5 usadas nos perfis multitemporais gerados neste trabalho acadêmico foram transformadas usando a Equação 1 para posterior uso na Equação 3.

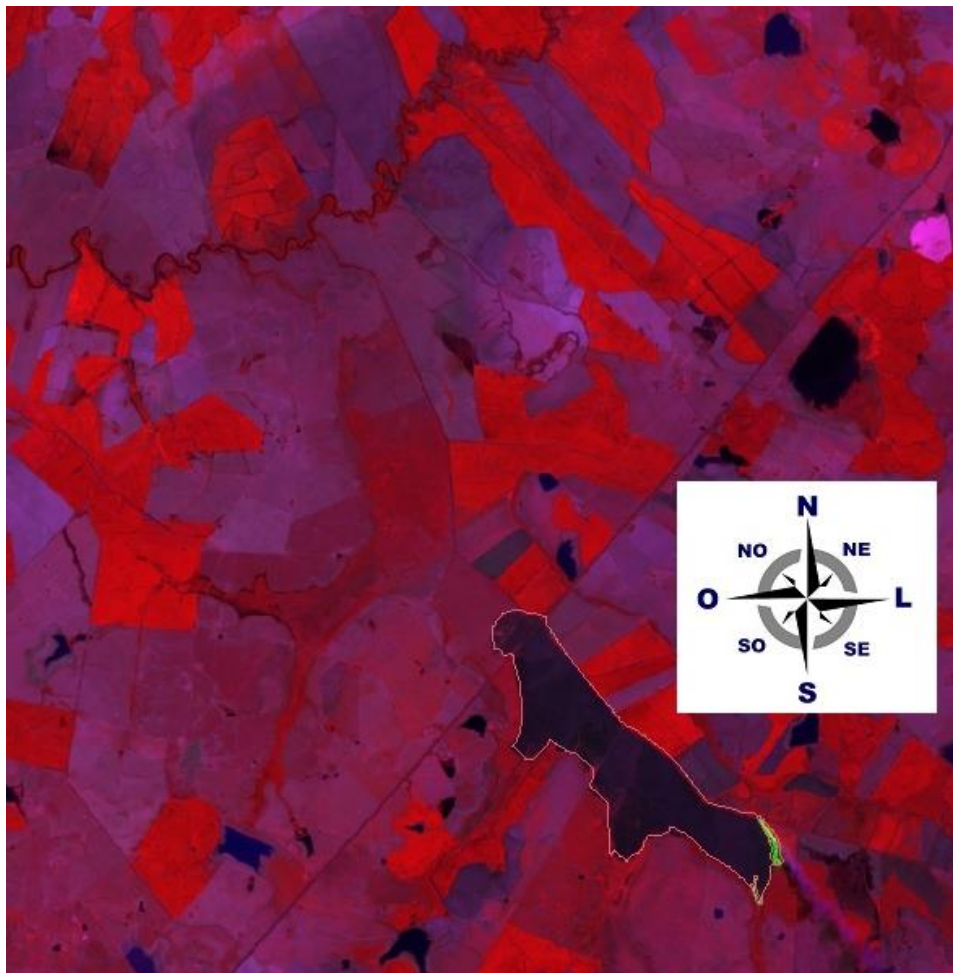
Para esta aplicação, optou-se pela elaboração de um programa em linguagem Legal que processe as bandas usadas nos índices de vegetação, gerando dados para a confecção de um perfil multitemporal apresentado nos resultados deste TCC, o qual permite registrar a regeneração vegetal que ocorre naturalmente após a queima do banhado. O anexo B consiste neste programa elaborado em linguagem Legal.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Direção e intensidade do vento

A primeira imagem multiespectral a ser apresentada como resultado é a imagem do Landsat 8 de 16 de janeiro, este imageamento ocorreu as 13:37, momento em que o incêndio estava ativo ainda, portanto, fornece diversas informações visuais que demandam atenção. A Figura 3 apresenta a mencionada composição.

**Figura 3.** Composição multiespectral B(banda 4), R(banda 5) e G(banda 7) montada a partir da imagem do dia 16 de janeiro pelo Landsat 8 as 13:37.



Fonte: Autor (2022).

Na composição espectral utilizada na Figura 3 é possível identificar a área queimada nesse momento, consiste na região com cinza escuro, o foco ativo do incêndio apresenta cores verde fosforescente. Percebe-se que neste momento a “cabeceira do incêndio” havia se dividido



em duas partes, também é possível identificar a direção do vento devido à grande quantidade da fumaça gerada pelo incêndio, o vento predominante está na direção sudeste (SE). Também é possível ter uma noção da velocidade do vento, o qual era alta nos dias em que ocorreu o incêndio.

Usando os dados históricos da estação meteorológica de São Borja do INMET (2022), a média da velocidade do vento nos dias 15 e 16 de janeiro, que são os dias em que o incêndio se desenvolveu em grande escala, é de 3,64 m/s.

Conjeturando que a suspeita de que o fogo se iniciou próximo da BR 472, estrada identificável como uma linha na Figura 3, fica evidente que a direção e intensidade do vento favoreceu a propagação rápida das chamas em direção à área que corresponde o município de Maçambará, pois a BR 472 neste trecho é o limite entre os municípios de Itaqui e Maçambará.

Na beira da BR foram identificados diversos resíduos descartados indevidamente, o que reforça a teoria de que o incêndio se iniciou próximo da estrada, como afirmam alguns relatos. Na Figura 4 é exibida uma fotografia tirada em campo após o incêndio ter sido declarado controlado.

**Figura 4.** Fotografia registrada no dia 20 de janeiro de 2022 do local consumido pelas chamas no município de Maçambará.



Fonte: Autor (2022).

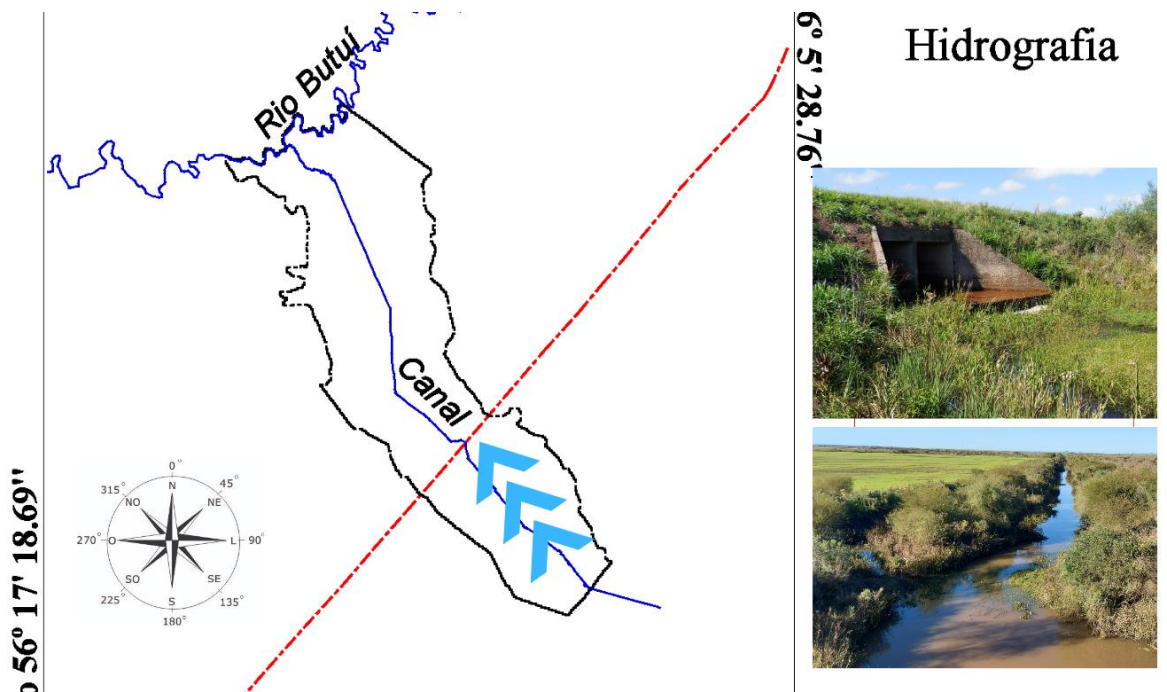
### 3.2 Hidrografia e vegetação

Lamentavelmente a análise de campo realizada pelas autoridades ambientais da SEMA, realizada logo após o incêndio, os quais elaboraram um relatório interno não divulgado publicamente, demonstrou que ocorreu captação hídrica sem licenciamento ambiental na reserva, o que provocou algumas ações de fiscalização.

Outro fator que explica a queima da área de Maçambará é a hidrografia do local. O banhado faz parte da microbacia do Rio Butuí, portanto o fluxo das águas superficiais migra na direção Noroeste (NO) através de um canal de irrigação e fluindo por estruturas subterrâneas localizadas abaixo da BR 472, as quais comunicam ambos os lados da BR que corta o banhado.

Na reserva existe um canal de irrigação que atravessa toda a REBIO, parte da extensão deste canal foi construído com recursos do Programa Nacional para Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis (Pró-Várzea), criado em 1981 (ZANETTI, 2017). A Figura 5 apresenta a hidrografia da área de estudo e duas fotos associadas ao fluxo superficial de água.

**Figura 5.** Hidrografia da área de estudo e fotografias de uma das estruturas subterrâneas embaixo da BR 472 e do canal de irrigação.



Fonte: Autor (2022).

Analisando a Figura 5 fica evidente que em um período de estiagem, como foi o caso da histórica onda de calor que atingiu o Rio Grande do Sul em janeiro de 2022, a região sinalizada com setas, vai sofrer um processo de secagem mais rápido e intenso, pois trata-se de uma área mais alta, a esse fato soma-se a predominância de vegetação rasteira, inferior a 1,80 m.

Soares e Batista (2007) denominam incêndios superficiais como os que ocorrem na superfície do piso florestal, consumindo as plantas e demais componentes da serapilheira em diferentes estágios de decomposição, tais como folhas, galhos, estruturas de reprodução, enfim, todo o material combustível até cerca de 1,80 m de altura. Os materiais combustíveis podem, de acordo com suas dimensões e grau de inflamabilidade, serem classificados em combustíveis perigosos, semiperigosos e combustíveis verdes.

Segundo Schumacher (2018) os combustíveis perigosos são representados por materiais que, em condições naturais, apresentam fácil e rápida combustão. Nessa categoria incluem-se cascas, ramos, galhos finos ( $\varnothing \leq 1$  cm), folhas, gramíneas, musgos, líquens, etc, quando secos.

O trabalho de campo consistiu em 7 saídas realizadas pelos autores deste trabalho acadêmico, o que permitiu verificar claramente que o incêndio ocorrido na REBIO São Donato pode ser classificado como um incêndio de superfície com consumo de biomassa vegetal classificada como combustíveis perigosos, a vegetação rasteira que caracteriza a área queimada se enquadra claramente nestes conceitos. A Figura 6 compara os olhos d'água gerados no escoamento abaixo da BR em diferentes datas.

**Figura 6.** Fotografias retiradas em campo próximas às estruturas abaixo da BR 472 pela qual flui a água acumulada no banhado. a) Fotografia retirada em 17/02/2022, b) Fotografia retirada em 17/02/2022, c) Fotografia retirada em 16/03/2022, d) Fotografia retirada em 16/03/2022, e) Fotografia retirada em 17/04/2022 e f) Fotografia retirada em 17/05/2022.





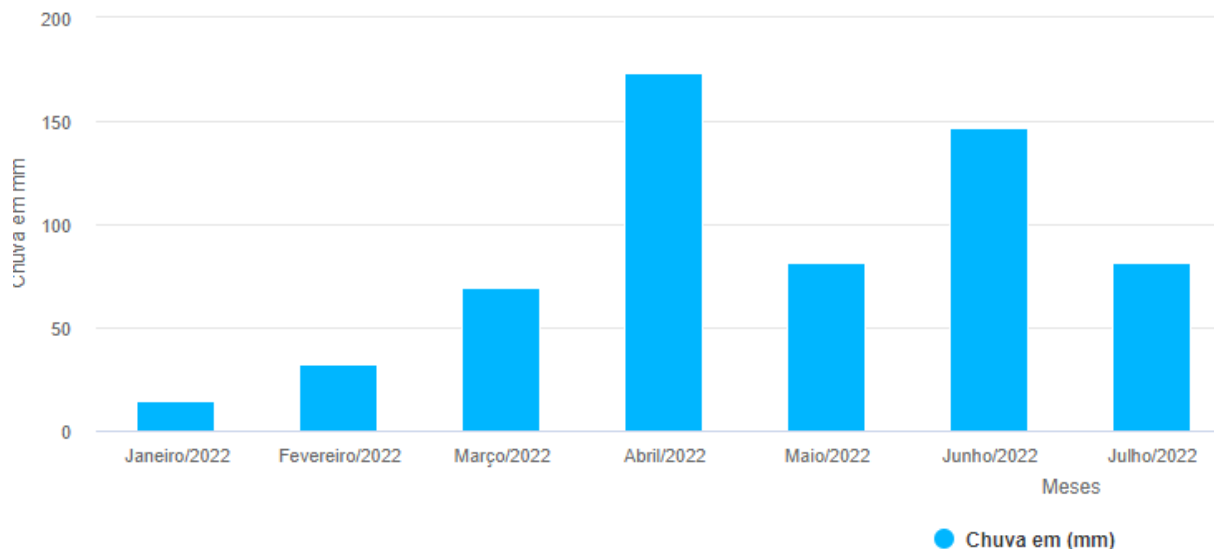
Fonte: Autor (2022).

As fotografias exibidas na Figura 6 demonstram que houve uma recuperação hídrica do banhado nos meses que sucederam o acontecimento analisado. Estes registros fotográficos são coerentes com os dados de precipitação obtidos do INMET (2022).

Uma consulta aos dados da chuva acumulada mensal dos meses de janeiro à julho de 2022 foi realizada na estação meteorológica em São Borja disponíveis no INMET. A Figura 7 apresenta as precipitações acumuladas no referido período.



**Figura 7.** Chuva Acumulada Mensal: Estação São Borja (A830).

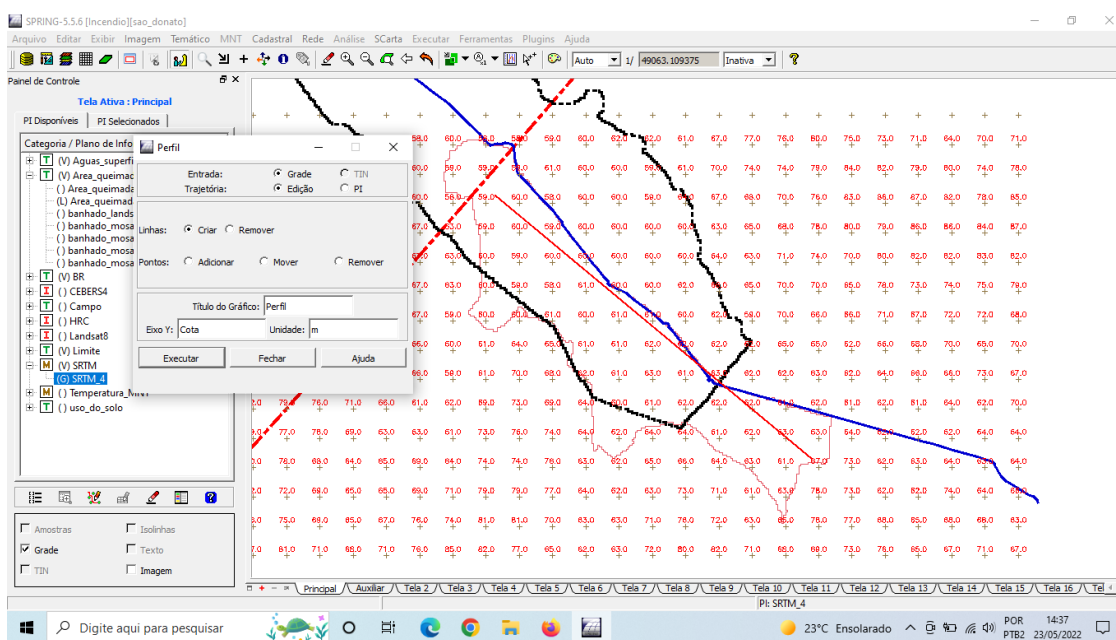


Fonte: INMET, 2022.

### 3.3 Declividade

Outro fator que foi analisado foi a declividade da área atingida, para isso foram usados os modelos de elevação SRTM de 30 m, a Figura 8 apresenta uma medida representativa obtida na área queimada.

**Figura 8.** Medida de declividade sendo realizada no ambiente Spring a partir de grades altimétricas SRTM de 30 m.



Fonte: Autor (2022).

A medida exibida na Figura 8 permitiu estimar a declividade da área queimada em 0,11 %, ou seja, trata-se de uma região com pouca declividade, portanto trata-se de um fator que não contribui para a propagação do incêndio estudado.

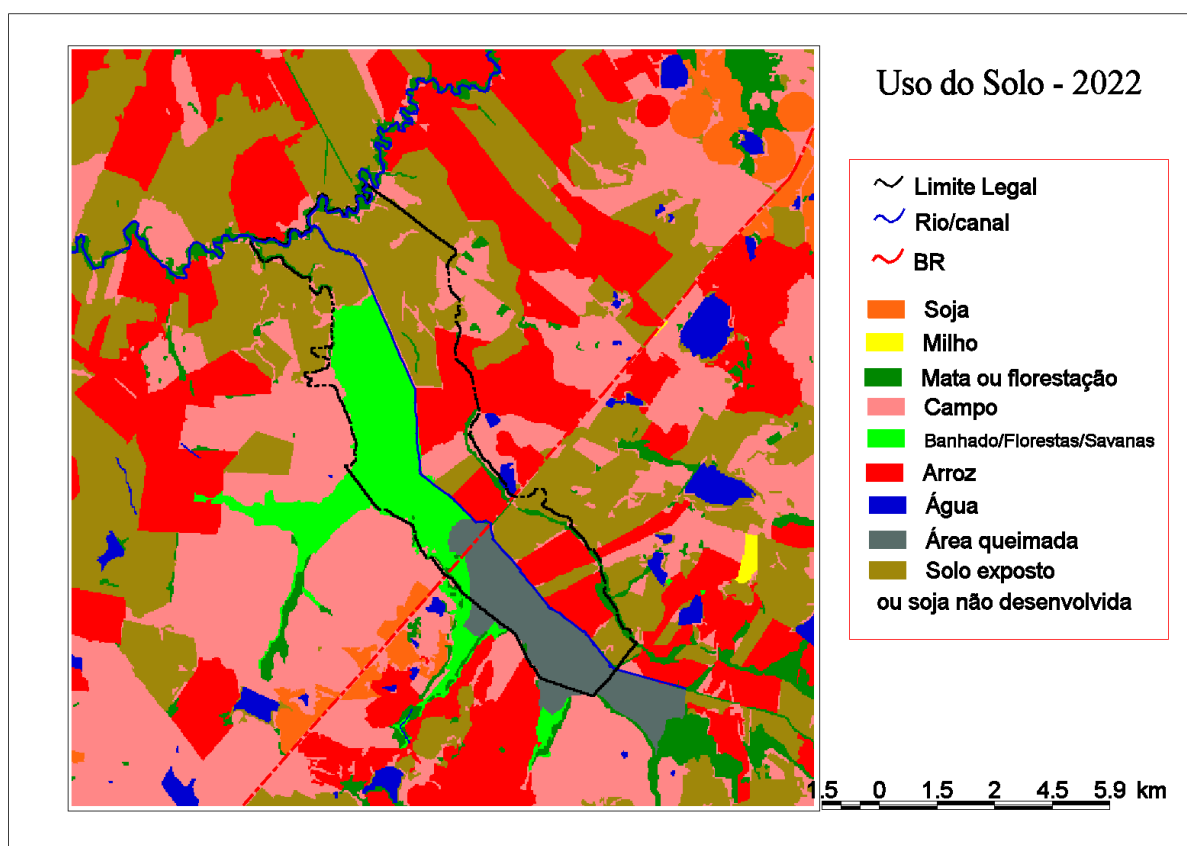
### **3.4 Uso do solo**

O mapeamento do uso do solo demonstra que se trata de uma região com muitas lavouras, o que é uma característica do local estudado desde que se criou a reserva, atritos entre produtores e defensores do ecossistema que se pretende conservar são notórios para quem reside na região.

O trabalho de campo (realizado durante o verão e outono) dentro e no entorno da reserva permitiu identificar as lavouras que representam a matriz produtiva da região, nas saídas de campo foram identificadas lavouras de arroz, soja e milho. Os dados de campo foram usados para interpretar as imagens multiespectrais e elaborar os mapas de uso do solo. A Figura 9 apresenta o mapa de uso do solo obtido.

Esta dificuldade em mapear as lavouras nesse período não prejudica o objetivo principal do trabalho o qual pretende retratar a área queimada e seus danos, um mapeamento mais eficiente das lavouras pode ser visualizado no trabalho de BETTIM (2021) o qual realizou uma análise multitemporal das lavouras dentro e no entorno da reserva.

**Figura 9.** Mapa de uso e ocupação do solo obtido no período em que ocorreu o incêndio.



Fonte: Autor (2022).

A análise do mapeamento do uso e ocupação da terra exibido na Figura 9 demonstra claramente que se trata de uma região com forte atividade agrícola, o que certamente gera muitas demandas hídricas que podem comprometer o equilíbrio do ecossistema no qual consiste o banhado São Donato. A Figura 10 exibe fotografias retiradas de lavouras na área de estudo.

**Figura 10.** Fotografias das principais culturas identificadas em campo. a) Lavoura de arroz, b) Lavoura de soja, c) Lavoura de milho.



**a) 20/01/22**



**b) 20/01/22**



**c) 17/02/22**

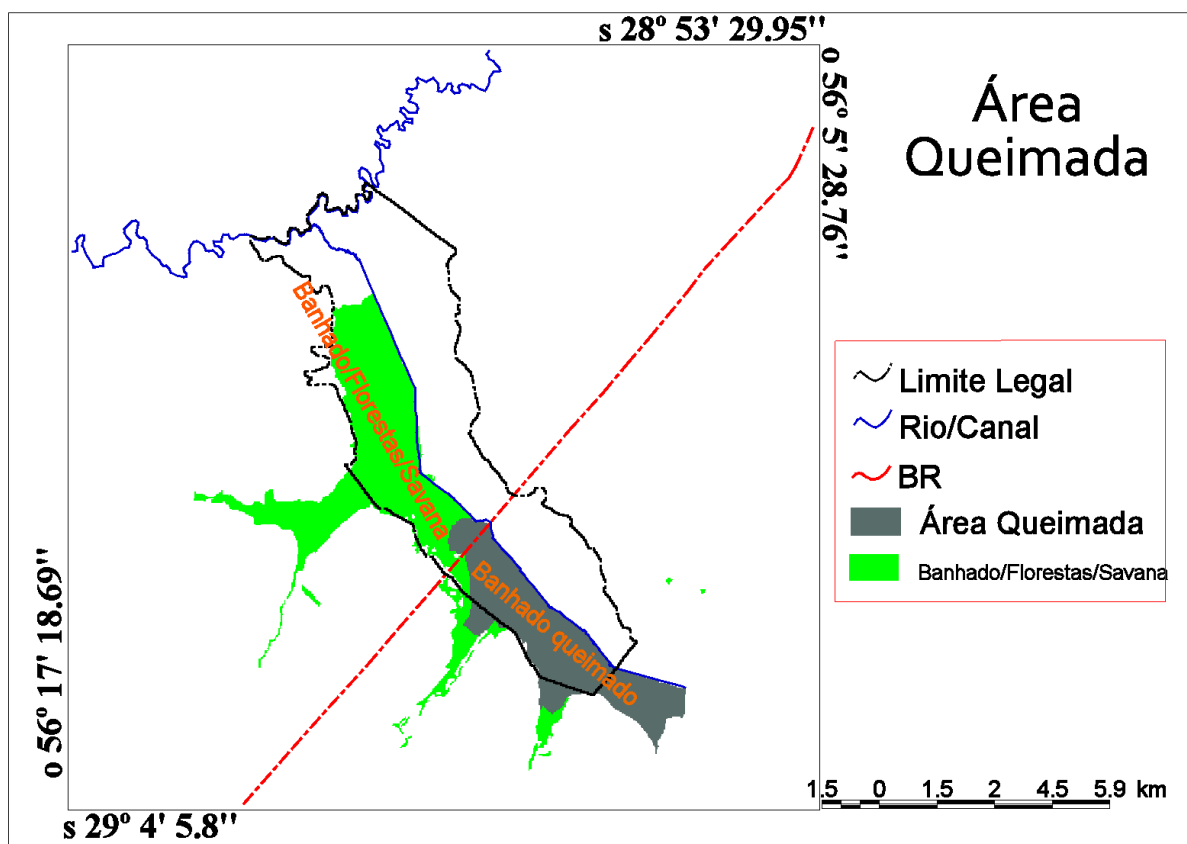
Fonte: Autor (2022).

O mapeamento das lavouras de soja foi comprometido devido à estiagem, o ciclo fenológico alterado das lavouras de soja não irrigadas, resultou em uma planta que não se desenvolveu por completo, por consequência a resposta espectral que este tipo de lavoura gera não ocorreu, portanto, seu mapeamento ficou comprometido e a distinção entre solo exposto e “soja não desenvolvida” se tornou difícil.

### **3.5 Estimativa de banhado queimado**

A Figura 11 apresenta o banhado e área queimada de forma discriminada.

**Figura 11.** Mapa que apresenta o banhado/fitofisionomias associadas e área queimada no incêndio florestal da Rebio São Donato e seu entorno.



Fonte: Autor (2022).

A estimativa de área queimada consiste em 1020 ha o que representa aproximadamente 38% do banhado/fitofisionomias associadas. Nota-se na Figura 11 que o canal de irrigação se tornou uma barreira para o fogo e ajudou a controlar a situação.

A fração adquirida pelo estado em 2021, a qual consiste em 732 ha foi parcialmente afetada. Trata-se de uma área à beira da BR que corta a reserva.

### 3.6 Temperaturas de superfície

A análise das temperaturas de superfície representa uma das melhores formas de caracterizar as causas e consequências de um incêndio florestal, permite avaliar o nível de calor que a área atingida sofria antes, durante e depois do incêndio. Para realizar esta análise foram escolhidas as imagens disponíveis no banco de dados geográficos do período do verão, pois

trata-se de um parâmetro que varia de acordo com a época e horário do imageamento. A Tabela 2 apresenta os dados estatísticos de temperaturas de superfície da área atingida.

**Tabela 2.** Dados geoestatísticos obtidos da área queimada usando as temperaturas de superfície estimados a partir da banda 10 do Landsat 8 e 9.

<b>Data</b>	<b>Temperaturas médias (°C)</b>	<b>Mínimo (°C)</b>	<b>Máximo (°C)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
23/12/2021	72,4	70,8	77,0	0,85
31/12/2021	65,0	63,6	70,0	0,81
16/1/2022	72,8	66,4	94,1	1,60
24/1/2022	84,6	76,2	88,1	2,16
1/2/2022	75,3	66,4	79,4	2,48
9/2/2022	81,5	74,1	85,5	2,29
5/3/2022	69,6	64,1	72,8	1,92
21/3/2022	62,3	58,6	65,5	1,43

Em meados de dezembro de 2021 houve uma primeira onda de calor que atingiu o Rio Grande do Sul, não foi tão intensa nem tão duradora como a onda de calor de janeiro, isso explica porque as temperaturas de superfície estavam maiores em 23 de dezembro quando comparadas a 31 de dezembro (momento em que a primeira onda de calor já tinha enfraquecido). Portanto a temperatura média de superfície mais representativa que antecede o incêndio provavelmente são os 72,4°C estimados em 23 de dezembro.

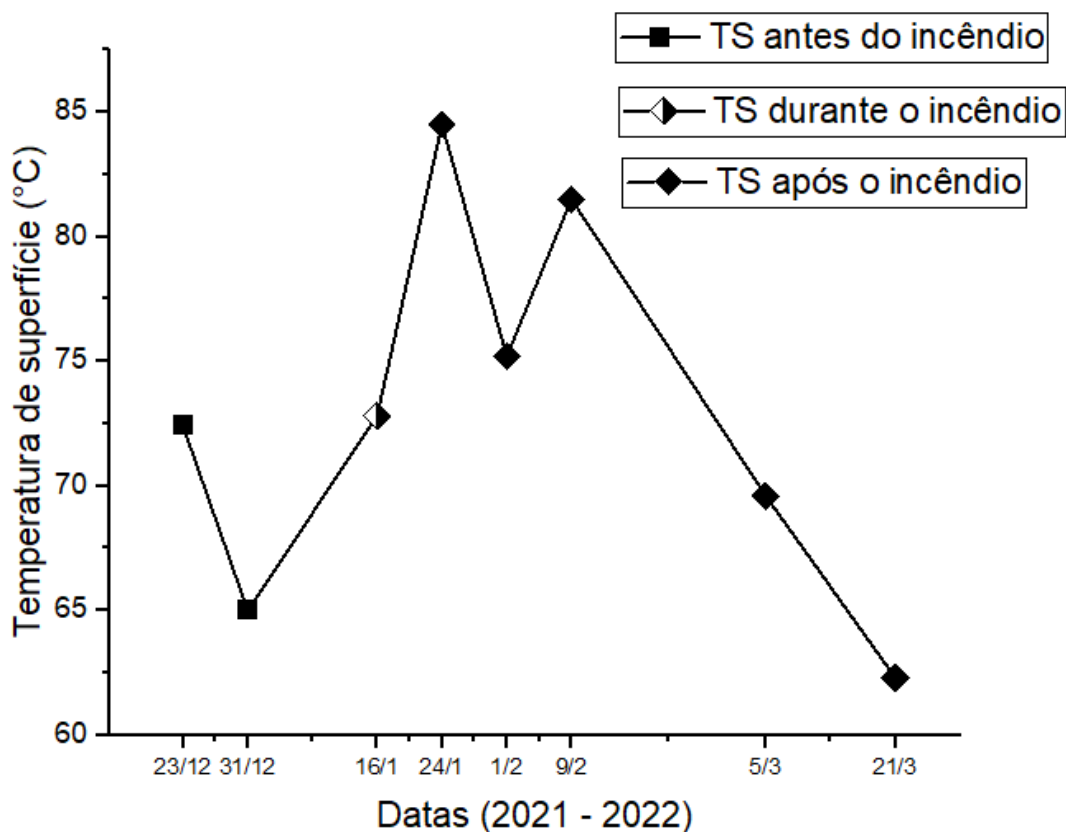
A temperatura máxima mais alta registrada consiste nos 94,1°C estimados no dia 16 de janeiro, momento em que o incêndio estava em andamento, a análise dos dados espaciais mostra que os locais próximos do foco ativo (“cabecreira”) apresentam os maiores valores.

A temperatura média de 16 de janeiro (72,8°C) não representa a estimativa de maior valor obtida, acredita-se que isso se deva ao vento intenso que caracterizou os dias do incêndio, o que provoca alta dispersão de calor por convecção.

As maiores temperaturas médias foram estimadas após o incêndio, nos dias 24 de janeiro, primeiro e nove de fevereiro, o que demonstra que a área queimada do banhado se tornou uma ilha de calor, comportamento totalmente inverso ao que se espera de um banhado, o qual costuma ser um lugar mais fresco e equilibrado. As datas posteriores ao incêndio foram os que apresentaram maior desvio padrão também.

A partir de março houve uma queda na temperatura de superfície, isto se deve ao retorno das chuvas na região, um clima mais ameno e a recuperação vegetal que a partir de março se tornou mais intensa. A Figura 12 apresenta de uma forma gráfica os dados das temperaturas médias da área queimada.

**Figura 12.** Estimativas da temperatura de superfície obtidas no período do verão na área queimada.



Fonte: Autor (2022).

### 3.7 Recuperação Vegetal

O rebrote da vegetação natural da região atingida pelas chamas foi monitorado com saídas de campo e através da geração de imagens NDVI, as quais permitem avaliar o retorno da vegetação fotosinteticamente ativa. Para esta finalidade, foram escolhidas as datas associadas ao durante e pós o incêndio. A Tabela 3 apresenta os dados geoestatísticos obtidos.

**Tabela 3.** Dados geoestatísticos obtidos a partir de imagens NDVI da área queimada.

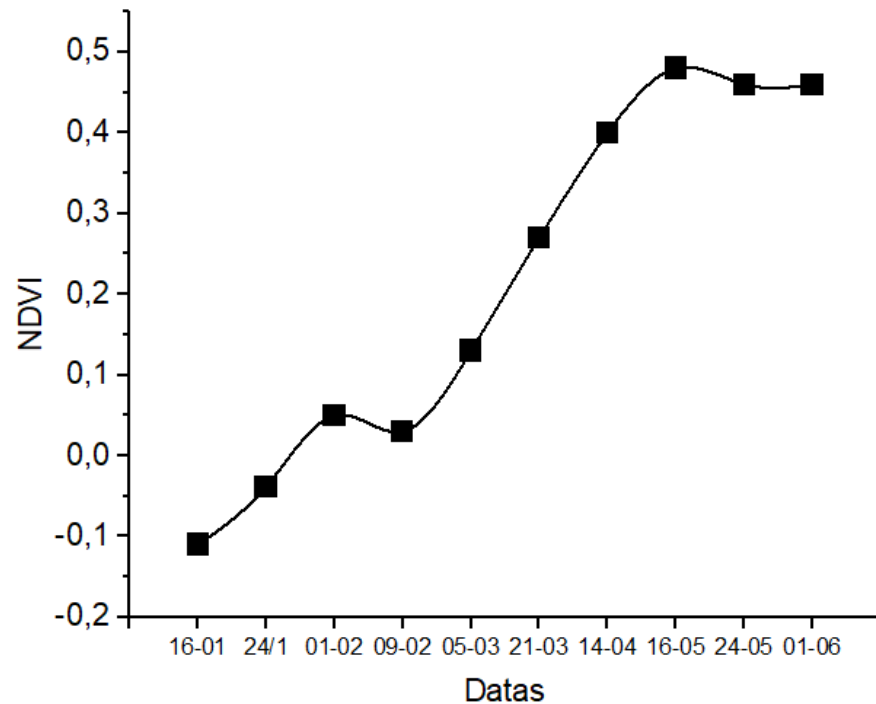
<b>Data</b>	<b>NDVI médio</b>	<b>NDVI Mínimo</b>	<b>NDVI Máximo</b>	<b>Desvio Padrão</b>
16/1/2022	-0,11	-0,19	0,42	0,090
24/1/2022	-0,037	-0,11	0,38	0,068
1/2/2022	0,053	-0,56	0,29	0,120
9/2/2022	0,033	-0,12	0,40	0,082
5/3/2022	0,13	-0,18	0,29	0,063
21/3/2022	0,27	-0,05	0,55	0,091
14/4/2022	0,40	-0,01	0,59	0,080
16/5/2022	0,48	0,11	0,61	0,005
24/5/2022	0,46	0,096	0,58	0,072
1/6/2022	0,46	0,059	0,57	0,071

De acordo com a Tabela 3 as datas mais próximas do incêndio apresentaram valor de NDVI médios negativos, o que caracteriza área sem vegetação, as fortes diferenças entre mínimo e máximo indicam uma divergência no grau de combustão do material vegetal queimado. Através de saídas de campo a existência de pequenos focos de incêndio após o grande incêndio foi constatada, período em que a onda de calor permanecia forte, o que demonstra que houve um processo de combustão diferenciado da área estudada.

A análise dos valores médios de NDVI demonstra que nos meses de janeiro e fevereiro os valores permaneceram próximos de zero, só a partir de março, aproximadamente dois meses após o incêndio, os valores de NDVI começaram a se incrementar, mostrando uma recuperação vegetal relevante no banhado consumido pelas chamas. A Figura 13 apresenta um perfil multitemporal confeccionado a partir das médias obtidas das imagens NDVI.



**Figura 13.** Valores de NDVI médios obtidos da área queimada.

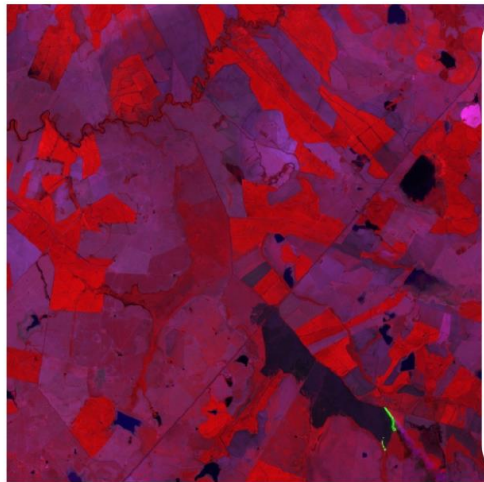


Fonte: Autor (2022).

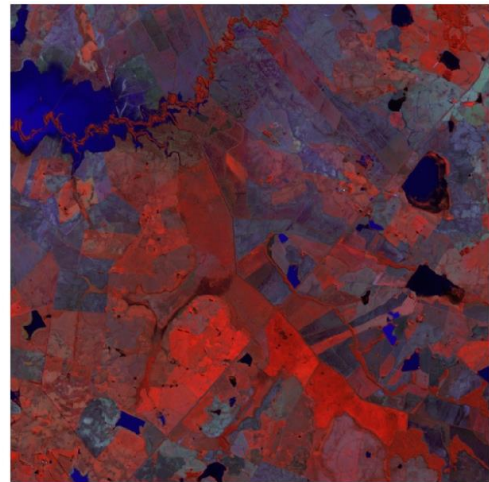
A recuperação vegetal parece ter se estabilizado no mês de maio, entretanto, as precipitações que se tornaram frequentes a partir do mês de março, associada ao início de enchentes na região, em especial o Rio Butuí, pode ter provocado um acúmulo grande de água no banhado, o qual contribui para a estagnação dos índices de vegetação.

A comparação das imagens de 16 de janeiro e 1º de junho demonstra que a região pode oscilar entre dois extremos climáticos em apenas quatro meses e meio, de uma estiagem histórica a um período de enchentes, ambos com potencial de provocar perdas na produção agrícola. A Figura 14 consiste em um par comparativo de imagens multiespectrais.

**Figura 14.** Imagens Landsat do momento do incêndio e quatro meses e meio depois. a) Composição multiespectral do dia 16/01/2022, b) Composição multiespectral do dia 01/06/2022.



**a) 16/01/2022**



**b) 01/06/2022**

Fonte: Autor (2022).

As imagens comparadas na Figura 14 mostram a área sob ação do fogo (item a) e a região sob o efeito de inundação do rio Butuí (item b) na área de estudo, o que demonstra o forte contraste climático e hídrico que a região tem sofrido no período analisado.

### **3.8 Propostas**

Algumas sugestões foram elaboradas com a finalidade de prevenir e preparar melhor a reserva e a sociedade que a rodeia, com o objetivo de evitar este desastre ambiental no futuro.

Entre as propostas consta a necessidade de sinalização sobre risco de incêndio florestal na reserva e no seu entorno, nenhuma sinalização com esta finalidade foi visualizada nas saídas a campo realizadas durante este trabalho acadêmico.

Outra sugestão consiste na limpeza periódica da reserva, em especial o entorno da BR 472, onde muitos materiais indevidamente descartados foram localizados, os quais incluem embalagens, garrafas, aquários, pneus, entre outros, representam uma fonte de combustão que nas condições climáticas extremas podem representar o início de um incêndio.

Projetos de educação ambiental que incluam moradores da região seriam estratégicos, para diminuição do descarte indevido de resíduos dentro e no entorno da reserva. A criação de uma rede de voluntários na região, treinados previamente por autoridades competentes, que possam ser acionados ligeiramente, seria uma medida de ação rápida caso um evento semelhante ocorra novamente. Dentro deste grupo podemos incluir os pilotos agrícolas, os quais auxiliaram no combate às chamas em janeiro 2022.

O investimento nos corpos de bombeiros da região é necessário também, os equipamentos disponíveis pelos corpos de bombeiros da região se destinam ao combate de fogo urbano, não são os indicados para ingressar em um local de difícil acesso e com chamas mais fortes e amplas.

#### **4.0 CONCLUSÕES**

O maior incêndio florestal mapeado no Bioma Pampa brasileiro, e nas unidades de conservação gaúchas, o incêndio da REBIO São Donato ocorrido em meados de janeiro de 2022, foi causado por uma combinação de condições climáticas, hidrográficas e pela vegetação rasteira que tornou o banhado seco em um material combustível ideal para um rápido alastramento das chamas. A direção e intensidade de vento favoreceram a propagação da “cabeceira” do incêndio em direção ao município de Maçambará, ao sudeste da BR 472, acredita-se que os focos iniciais surgiram próximos desta estrada.

A área queimada foi estimada em 1020 ha, o que representa aproximadamente 38 % do banhado/florestas/savana existentes, o canal de irrigação que atravessa a reserva e outros obstáculos ajudaram a controlar o incêndio, além da ação dos bombeiros que impediram o alastramento do fogo na área do banhado localizada no município de Itaqui, é provável que a atividade de pecuária que ocorre nesta margem da BR tenha contribuído para diminuir a biomassa seca disponível.

As estimativas de temperatura de superfície obtidas a partir de produtos Landsat permite concluir que após o incêndio, a área queimada se tornou uma ilha de calor, um comportamento térmico atípico para este tipo de ecossistema, só retornando à normalidade térmica em março, dois meses após o incêndio sob influência de precipitações.

A análise do rebrote vegetal, realizado através de registro fotográfico em campo e com imagens NDVI, permite concluir que a regeneração vegetal natural da área queimada se acelerou a partir do mês de março e prosseguiu durante o outono.

As imagens Landsat que abrangem o período de janeiro a junho de 2022 apresentam a impressionante mudança de cenário que vai de uma estiagem histórica a um quadro de inundações no rio Butui, no qual as águas do banhado desaguam, o que demonstra o grande grau de imprevisibilidade climática e hídrica que a região está sujeita.

A falta de sinalização sobre risco de incêndio florestal, a ausência de uma sede na reserva atingida, a grande quantidade de lixo encontrada na beira da BR 472 com potencial de combustão, a ausência de um grupo de voluntários treinados para combater fogo florestal, a ausência de equipamentos adequados para combate de incêndio florestal nos corpos de bombeiros da região, a falta de uma logística que permita um rápido acesso ao banhado e combate ao fogo, levam a concluir que a região está despreparada para combater este tipo de evento, o qual provavelmente vai se repetir ao longo do século XXI.

## REFERÊNCIAS

ADÁMEK M, BOBEK P, HADINCOVÁ V, WILD J, KOPECKÝ M. Forest fires within a temperate landscape: a decadal and millennial perspective from a sandstone region in Central Europe. *Forest Ecology and Management*; 2015 (336), 81-90.

BETTIM, INGRID DOS SANTOS. **Uso do sensoriamento remoto e geoprocessamento na análise multitemporal da Rebio São Donato (RS)**. Monografia de Conclusão de Curso em Bacharelado em Gestão Ambiental. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2021.

CÂMARA, G.; FREITAS, U.M.; SOUZA, R.C.M.; GARRIDO, J. SPRING: *Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling*. *Computers and Graphics*, vol. 15, n.6, July 1996.

GANEM, R. S. (Org.). *Conservação da biodiversidade: legislação e políticas públicas*. Brasília, Câmara dos Deputados Editora, 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/Graficos/A001>>. Acesso em 05 de agosto de 2022.

KOPROSKI, LETÍCIA & FERREIRA, MATHEUS & GOLDAMMER, JOHANN & BATISTA, ANTONIO. (2011). Modelo de zoneamento de risco de incêndios para unidades de conservação brasileiras. O caso do Parque Estadual do Cerrado (PR). 2011.

LAGEAA. Laboratório de Gestão Ambiental Aplicada. Disponível em: <https://www.lageaa.com.br/laboratorio/index.html> Acesso em: junho de 2022.

Ministério do Meio Ambiente, Áreas Protegidas, Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areasprotegidas/cadastro-nacional-de-ucs>. Acesso em: junho de 2022.

NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.

PICOLLI, L. R., SCHNADELBACH, C. V. [coord.] . *O Pampa em Disputa: A biodiversidade ameaçada pela expansão das monoculturas de árvores*. Porto Alegre, 2007.

RIO GRANDE DO SUL, **Decreto Estadual nº 23.798, DE 12 DE MARÇO DE 1975**. Cria Parques Estaduais e Reservas Biológicas, e dá outras providências. Disponível em:

[https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/1975/dec\\_23798\\_1975\\_criaparquesestaduais\\_reservasbiologicas\\_rs.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/1975/dec_23798_1975_criaparquesestaduais_reservasbiologicas_rs.pdf). Acesso em: 02 nov. 2020.

ROUSE *et al.* **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS: Earth Resources Technology Satellite**. 1. ed. Washington: Proceedings, 1974. p. 48-62.

SEMA (Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura), 2021. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/sema-adquire-primeira-area-da-reserva-biologica-do-sao-donato> Acesso em: 9/6/2021.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: [s.n.] 2007. 250 p.

SCHUMACHER, MAURO VALDIR. **Incêndios florestais**. 3 ed. Rev. – santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Ciências Florestais, 2018.

USGS. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collections> Acesso em: 6 junh. 2022.

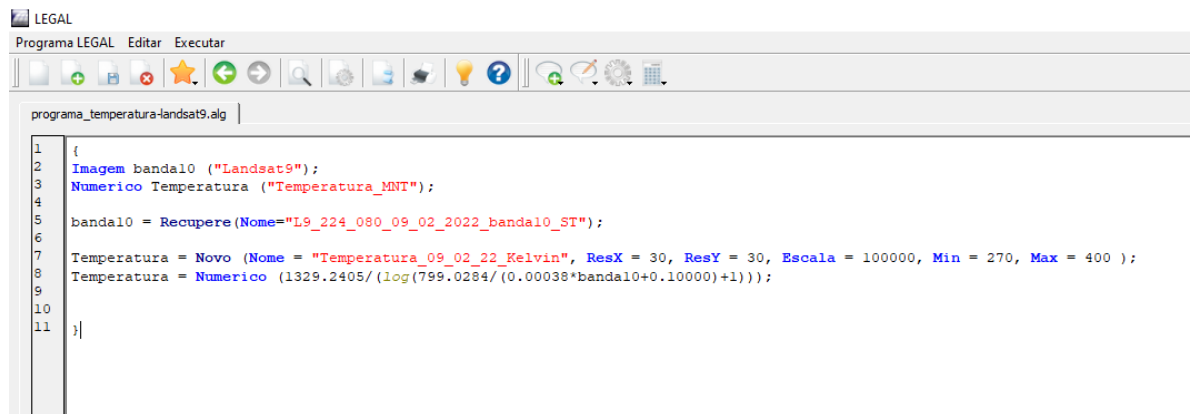
USGS. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-2> Acesso em: 5 junh. 2022.

USGS. Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites> Acesso em: 4 junh. 2022.

ZANETTI B., DANIELA. **DINÂMICA E ANÁLISE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL, BANHADO DA RESERVA BIOLÓGICA DE SÃO DONATO – RS**. 2017. P. 114. Dissertação Mestrado em Geografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

## ANEXOS

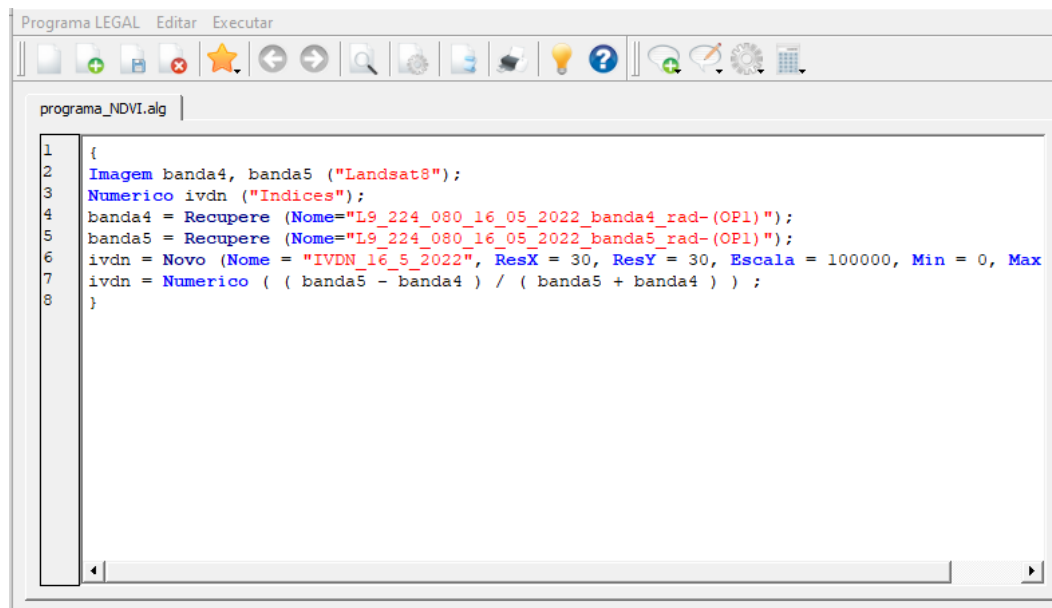
### Anexo A



```
1 {
2   Imagem banda10 ("Landsat9");
3   Numerico Temperatura ("Temperatura_MNT");
4
5   banda10 = Recupere(Nome="L9_224_080_09_02_2022_banda10_ST");
6
7   Temperatura = Novo (Nome = "Temperatura_09_02_22_Kelvin", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 100000, Min = 270, Max = 400 );
8   Temperatura = Numerico (1329.2405/(log(799.0284/(0.00038*banda10+0.10000)+1)));
9
10
11 }|
```

**Figura 15.** Programa elaborado na linguagem Legal para se obter estimativas de temperatura de superfícies. Fonte: Autor (2022).

### Anexo B



```
1 {
2   Imagem banda4, banda5 ("Landsat8");
3   Numerico ivdn ("Indices");
4   banda4 = Recupere (Nome="L9_224_080_16_05_2022_banda4_rad-(OP1)");
5   banda5 = Recupere (Nome="L9_224_080_16_05_2022_banda5_rad-(OP1)");
6   ivdn = Novo (Nome = "IVDN_16_5_2022", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 100000, Min = 0, Max
7   ivdn = Numerico ( ( banda5 - banda4 ) / ( banda5 + banda4 ) ) ;
8 }
```

**Figura 16.** Programa escrito em linguagem Legal para gerar os NDVI. Fonte: Autor (2022).