



**ESTIMATIVA DE BIOMASSA E COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES  
FITOFISIONOMIAS DO CERRADO**

**LARISSA MOREIRA ALVES GRANADO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL – EFL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA E COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES  
FITOFISIONOMIAS DO CERRADO**

**LARISSA MOREIRA ALVES GRANADO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO-PPGEFLDM –2019**

**BRASÍLIA-DF, 25 DE FEVEREIRO DE 2019.**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“ESTIMATIVA DE BIOMASSA E COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES  
FITOFISIONOMIAS DO CERRADO”

LARISSA MOREIRA ALVES GRANADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



---

Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Orientador)



---

Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)



---

Prof.ª Dr.ª HELOISA SINATORA MIRANDA (Departamento de Ecologia – UnB);  
(Examinadora Externa)

---

Prof.ª Dr.ª ALBA VALÉRIA REZENDE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 25 de fevereiro de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

ML323e

Moreira Alves Granado , Larissa  
ESTIMATIVA DE BIOMASSA E COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES  
FITOFISIONOMIAS DO CERRADO / Larissa Moreira Alves Granado  
; orientador Reginaldo Sérgio Pereira. -- Brasília, 2019.  
71 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais)  
- Universidade de Brasília, 2019.

1. Índice de vegetação. 2. Cerrado. 3. Variação da  
Vegetação. 4. Mapa de combustível. 5. Mapa de biomassa aérea.  
I. Sérgio Pereira, Reginaldo, orient. II. Título.

À minha mãe e ao meu pai!

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ter me dado a oportunidade de viver essa etapa tão importante na minha vida e por me proporcionar dedicação e comprometimento para chegar até aqui.

A minha família por todo apoio, atenção e entendimento (pai, mãe, Raianny, tia Romilda, tia Doninha, tia Rosilda e todos os outros da família Moreira Alves e da família Granado), sem vocês eu não seria nada.

A Universidade de Brasília por ser essa mãe que me proporcionou a melhor experiência da minha vida, foram sete anos que me fizeram amadurecer de uma forma inexplicável. Obrigada a todos os funcionários dessa instituição, em especial aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal.

Aos meus amados professores, sempre tão prestativos, em especial ao professor Reginaldo por ter aceitado ser meu orientador e ao Eraldo por ter me adotado nessa jornada universitária, não conseguiria ter chegado até aqui se não tivesse um professor tão humano e íntegro como ele. A professora Heloisa Miranda por ter me ouvido, ajudado e acalentado nos meus desesperos, que foram diversos.

A todos os meus amigos que a universidade me proporcionou conhecer, foram muitas pessoas, jamais esquecerei de vocês. Aos amigos de semestre: Gêmula, Deh, Patica, Marica, Lary, Leh, Claudinha, Amandis e Bold; aos meus amigos de mestrado que passaram toda essa barra juntinho comigo: Reh, Bia, Jhones, Maira, Mari, Maitoca, Mandis e todos os outros; A minha amiga de áudios gigantes, Gio; A minha motivadora de mestrado, Vic; A Fabrícia por toda a ajuda com os dados; Ao meu querido irmão de orientação Jonas e as minhas meninas de mestrado que só apareceram no meu segundo ano de mestrado, mas que são muito importantes: Gabi irmã linda e Nati maravilhosa. Espero que eu não tenha esquecido de ninguém, caso alguém não esteja na lista, saiba que está no meu coração.

A Letícia Gomes por todas as correções e sugestões, obrigada de coração!

Ao meu namorado por toda a paciência e cumplicidade durante esses dois anos de dedicação e a todas as pessoas que de forma direta ou indireta interferiram na minha vida durante esse período. Meu muito obrigada a todos!

Por fim, agradeço a CAPES por ter proporcionado essa pesquisa me financiando e a todos os envolvidos no programa de pós-graduação nacional. Só a educação será capaz de mudar o Brasil, obrigada!

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>RESUMO</b> .....	xi
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1. Problema e questões de pesquisa</b> .....	14
<b>1.2. Objetivo geral</b> .....	16
1.2.1. Objetivos Específicos.....	16
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1. Bioma Cerrado</b> .....	16
2.1.1. Descrição das fitofisionomias do Cerrado.....	18
<b>2.2. Uso e cobertura da terra</b> .....	19
<b>2.3. Biomassa vegetal</b> .....	20
<b>2.4. Combustível vegetal</b> .....	21
<b>2.5. Índice de vegetação para estimativa florestais</b> .....	23
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	24
<b>3.1. Área de estudo</b> .....	24
<b>3.2. Fluxograma Metodológico</b> .....	26
<b>3.3. Base de dados</b> .....	27
3.3.1. Imagens.....	27
3.3.2. Dados de biomassa.....	28
3.3.2.1. Estéreo-fotografias para quantificação de biomassa.....	29
3.3.2.2. Estimativa de biomassa a partir de Inventário Florestal.....	30
<b>3.4. Classificação do Uso do Solo</b> .....	31
3.4.1. Métodos de geoprocessamento e classificação.....	31

3.4.2.	Checagem em campo.....	32
3.5.	<b>Quantificação de biomassa e combustível por estéreo-fotografias.....</b>	32
3.6.	<b>Processamento das imagens .....</b>	34
3.7.	<b>Estatística para estimativa de biomassa .....</b>	36
3.8.	<b>Análise de regressão e correlação entre biomassa e combustível.....</b>	37
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	37
4.1.	<b>Uso e Cobertura do solo .....</b>	37
4.2.	<b>Estimativa de biomassa e combustível por estéreo fotografias.....</b>	40
4.3.	<b>Quantificação da biomassa por parcela amostrada.....</b>	43
4.4.	<b>Correlação entre os Índices e as imagens de diferentes satélites .....</b>	45
4.5.	<b>Estimativa de biomassa a partir do satélite Landsat 5 TM .....</b>	46
4.6.	<b>Estimativa de biomassa a partir do satélite RapidEye.....</b>	49
4.7.	<b>Quantificação do combustível.....</b>	52
4.8.	<b>Equação de estimativa de combustível.....</b>	53
5.	<b>CONCLUSÃO .....</b>	57
5.1.	<b>Oportunidade de estudos futuros .....</b>	58
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	59



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da área de estudo no Distrito Federal e Brasil. ....	25
<b>Figura 2.</b> Fluxograma metodológico para classificação de uso do solo e estimativa de biomassa e combustível. ....	27
<b>Figura 3.</b> Localização dos pontos amostrais em relação a APA Gama e Cabeça de Veado. ....	29
<b>Figura 4.</b> Registro fotográfico da checagem em campo (à esquerda) e imagens estéreo-fotográficas (à direita) de diferentes fisionomias na área de estudo. ....	33
<b>Figura 5.</b> Tabela de valores de biomassa encontrada no livro Séries de Estéreo-Fotografias para Quantificar a Biomassa da Vegetação do Cerrado do Brasil Central. .	34
<b>Figura 6.</b> Uso e cobertura da terra na Fazenda Água Limpa. ....	38
<b>Figura 7.</b> Biomassa e de combustível quantificado pelo método de Estéreo-Fotografias na Fazenda Água Limpa. ....	42
<b>Figura 8.</b> Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM. ....	47
<b>Figura 9.</b> Distribuição da biomassa total na Fazenda Água Limpa e no Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado a partir do índice de vegetação melhorado (Enhanced Vegetation Index) derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM. ....	48
<b>Figura 10.</b> Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM. ....	50
<b>Figura 11.</b> Distribuição da biomassa total na Fazenda Água Limpa e no Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado pelo índice de diferença normaliza red-edge (normalized difference red edge index) derivado da imagem do satélite RapidEye. ....	51
<b>Figura 12.</b> (a) Gráfico de correlação entre a biomassa e o combustível real e (b) gráfico de resíduos da carga de combustível estimada. ....	53
<b>Figura 13.</b> Avaliações e classificação do a) mapa de uso do solo, b) mapa de biomassa aérea e c) mapa de combustível de uma área no Cerrado. ....	55
<b>Figura 14.</b> (A) Mapa de biomassa aérea e (B) mapa de combustível de uma área no Cerrado. ....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Pontos em que foram coletados e quantificados a biomassa da vegetação do Cerrado no Brasil Central. ....	30
<b>Tabela 2.</b> Equações dos índices de vegetação utilizados no trabalho. ....	36
<b>Tabela 3.</b> Área total do uso e cobertura da terra na Fazenda Água Limpa (UnB). ....	39
<b>Tabela 4.</b> Quantificação da biomassa aérea e do combustível pelo método de estéreo-fotografias para fitofisionomias do Cerrado na área da Fazenda Água Limpa. ....	41
<b>Tabela 5.</b> Biomassa total estimada por parcela em $Mg.ha^{-1}$ para a vegetação da área da Fazenda Água Limpa e do IBGE com base em dados do inventário de campo e dados do livro de estéreo-fotografia. ....	44
<b>Tabela 6.</b> Correlação entre os índices de vegetação e a biomassa da vegetação total da área da Fazenda Água Limpa e do IBGE. Acima da diagonal encontram-se as correlações entre os índices derivados da imagem do RapidEye e abaixo da diagonal entre os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM. ....	46
<b>Tabela 7.</b> Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx (%)) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM. *Significativos a 5% de significância. ....	47
<b>Tabela 8.</b> Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, erro absoluto (Syx), erro relativo (Syx (%)) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices derivados da imagem do satélite RapidEye. *Significativos a 5% de significância. ....	49
<b>Tabela 9.</b> Valores médios de combustível e biomassa coletados em campo. ....	52

## RESUMO

Apesar de toda importância ecológica do Cerrado, o bioma tem sido degradado devido ao desmatamento e as atividades antrópicas que têm alterado significativamente o regime do fogo, sejam elas por meio de prática direta de uso do solo ou indireta a partir de mudanças climáticas. Por conta dessas transformações, o Cerrado é um dos biomas vegetais mais ameaçados da América do Sul e necessita de melhorias na criação de políticas de manejo e conservação. O conhecimento das formações vegetais, juntamente com a quantificação de biomassa e carga de combustível, pode auxiliar no controle e na preservação, pois proporciona insumo para o manejo de áreas no Cerrado. Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar a biomassa área da vegetação e a biomassa de combustível, utilizando dados derivados de sensoriamento remoto em diferentes fitofisionomias do Cerrado, a fim de gerar uma equação que capte a variação dessas variáveis dentro das fisionomias do Cerrado. Para isso, foi gerado uma regressão entre a biomassa e os índices de vegetação, em que a biomassa foi estimada a partir de equações alométricas e os índices de vegetação foram estimados a partir dos satélites *RapidEye* e *Landsat 5 TM*. A precisão das equações foi avaliada pela correlação entre os valores estimados e os observados ( $R^2$ ), pelo erro-padrão da média (E) e pela distribuição dos gráficos de resíduos. Após essa análise, foi realizada uma nova regressão correlacionando a biomassa com o combustível. A partir das equações geradas, foi possível obter o mapa de cobertura da biomassa aérea e do combustível. Os resultados mostraram que as equações de regressão para a quantificação da biomassa aérea e do combustível apresentaram significativos valores estatísticos. O índice de vegetação melhorado (EVI), com  $R^2 = 0,77$  e  $E = 51,1\%$ , foi o melhor índice para estimativa de biomassa a partir do satélite *Landsat 5 TM* e o índice de diferença normalizada red-edge (NDRE), com  $R^2 = 0,87$  e  $E = 30,39\%$ , foi o melhor índice para estimativa de biomassa a partir de imagens do *RapidEye*. Baseado nos valores de biomassa foi gerado uma equação para estimativa da variação de combustível dentro das fitofisionomias. A equação apresentou  $R^2 = 0,78$  e erro padrão de 18%, portanto os índices de vegetação foram eficazes na estimativa de biomassa e combustível para diferentes fitofisionomias do Cerrado. Com esses dados, foram gerados mapas de distribuição de biomassa aérea e combustível. Tais informações são fundamentais para definição de política de manejo, controle e prevenção de incêndios e até mesmo na mitigação da emissão de gases do efeito estufa.

**Palavras chave:** Índice de vegetação, Cerrado, Variação da Vegetação, Mapa de combustível, Mapa de biomassa aérea.

## ABSTRACT

Despite all of the ecological importance of Cerrado, the biome has been suffering drastically with deforestation and anthropical activities that have been significantly altering the fire regime, may they be by the direct practice of soil usage or indirectly, caused by climate changes. Because of these transformations, the Cerrado is one of the most threatened vegetal biomes of South America and demands improvement in the creation of management and conservation policies. The knowledge of the vegetal formations, alongside the quantification of biomass and the fuel load, can help in the control and preservation, because it provides input for the management in Cerrado areas. Therefore, the objective of this research is to evaluate the relation between the vegetation indexes, the aerial biomass and the fuel in order to generate an equation that can capture the variation of the variables inside the different Cerrado physiognomies. To do that, a regression between the biomass and the vegetation indexes was generated, in which the biomass was estimated from allometric equations and the vegetation indexes were estimated based on the satellites RapidEye and LandSat 5 TM. The precision of the equations was evaluated by the correlation between the estimated and the observed values ( $r^2$ ), by the standard error from the mean (E) and by the distribution of the residue graphics. After this analysis, a new regression was made, correlating the biomass with the fuel. It was possible to obtain the map of covering of the aerial biomass and the fuel from the equations generated. The results show that the regression equations for the aerial biomass quantification and the fuel presented significant statistical values. The Enhanced Vegetation Index (EVI), with  $R^2= 0,77$  and  $E =51,1\%$ , was the best index for biomass estimation from the satellite LandSat 5 TM and the Normalized Difference Red-Edge Index (NDRE), with  $R^2 = 0,87$  and  $E= 30,39\%$ , was the best index for biomass estimation from the satellite rapideye. Based on the biomass values, an equation for an estimate variation of fuel in the phytophysiognomies was generated. The equation presented  $R^2 = 0,78$  and standard error from the mean of 18%, therefore, the vegetation indexes were effective on the biomass and fuel estimates for different Cerrado phytophysiognomies. Using this data, maps of aerial biomass and fuel were generated. Such information is fundamental for the definition of management, control and prevention of wildfires policies and even to the mitigation of the greenhouse effect gas emissions.

**Keywords:** Vegetation Index, Cerrado, Vegetation Variation, Fuel Map, Aerial biomass map.

## 1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando aproximadamente 25% do território brasileiro (IBGE, 2004; BATLLE-BAYER et al., 2010). Considerado a Savana mais rica do mundo, apresenta alto grau de endemismo de plantas e animais (KENNEDY et al., 2016; SILVEIRA et al., 2016; DANTAS et al., 2018), com mais de 13.127 espécies registradas (OVERBECK et al., 2015), e possui nascentes das três maiores bacias hidrográficas sul americanas (MMA, 2013; NEHRING, 2016).

Este bioma também é caracterizado por apresentar um mosaico com três tipos de formações vegetais, as campestres, as savânicas e as florestais com alto grau de heterogeneidade (RIBEIRO; WALTER, 1998; COUTO JUNIOR et al., 2011). Sendo que, sua estrutura e diversidade são determinadas pela interação entre umidade, fertilidade do solo, temperatura, equilíbrio de proporção entre gramíneas e biomassa lenhosa e regime do fogo (LEHMANN et al., 2014). Apesar de toda sua importância ecológica, o bioma tem sido degradado devido ao desmatamento, restando menos de 50% de sua cobertura nativa (KLINK; MACHADO, 2005; FRANÇOSO et al., 2015), sendo que menos de 10% dessa cobertura conta com proteção legal (BATLLE-BAYER et al., 2010; SOARES FILHO et al., 2014).

Além do desmatamento, outro problema que afeta o Cerrado é a ocorrência do fogo. Apesar de aceito como um evento natural para muitas comunidades, o fogo deve ser compreendido como um evento com efeitos ecológicos extremamente complexos, onde as atividades antrópicas têm alterado significativamente o regime do fogo, sejam elas por meio de prática direta de uso do solo ou indireta a partir de mudanças climáticas (WALTER; RIBEIRO, 2010; ARCHIBALD, 2016; ALVARADO et al., 2017). Em decorrência dessas transformações, o Cerrado é um dos biomas vegetais mais ameaçados da América do Sul (BATLLE-BAYER et al., 2010; SOARES FILHO et al., 2014) e necessita de melhorias na criação de políticas de manejo e conservação.

O conhecimento das formações vegetais, juntamente com a quantificação de biomassa e carga de combustível, possui importância fundamental para o controle e a preservação de áreas savânicas, pois gera informações de manejo que proporcionam melhor acurácia. A técnica mais disseminada para a identificação de fisionomias em larga escala é a classificação de imagens aéreas (SEABRA; CRUZ, 2013; KATERJI et al., 2016; SHISHIR; TSUYUZAKI, 2018), na qual é gerado um processo de

diferenciação de objetos a fim de distinguir classes distintas que necessitam de diferente tipo de manejo.

Além da classificação, são necessárias informações sobre a variação estrutural da floresta, sendo de grande importância a quantificação da biomassa aérea. Essa quantificação é um desafio devido à sua grande variabilidade ambiental e estrutural, além da variação entre os muitos tipos de fitofisionomias (OLIVEIRA FILHO; RATTER, 2002; RIBEIRO; WALTER, 2008). Pesquisas para quantificação de biomassa têm sido geradas para uma melhor caracterização da estrutura florestal (WATZLAWICK et al., 2009b; GROOT et al., 2015; WHITE et al., 2016; SANTOS et al., 2017b).

Diversas pesquisas apresentam resultados satisfatórios para a estimativa de biomassa. Entretanto, as estimativas são realizadas para fisionomias específicas, não existindo um estudo que quantifique a biomassa do Cerrado como um todo (FERRAZ et al., 2014; MIGUEL et al., 2015; ENE et al., 2017; NANDY et al., 2017; PHUA et al., 2017; REDDY et al., 2017; DALPONTE et al., 2018). Por conta dessa carência, é de suma importância desenvolver métodos mais práticos, rápidos e de baixo custo para estimar a biomassa e a carga de material combustível no Cerrado. Tais métodos podem evitar levantamentos de campo exaustivos e onerosos e colaborar na tomada de decisões para a prevenção, combate e uso do fogo controlado nas diferentes formações vegetais do cerrado.

### **1.1. Problema e questões de pesquisa**

A estimativa da quantidade e distribuição da biomassa é fundamental para diversas áreas do conhecimento, como na elaboração de planos de manejo florestal, explorações florestais eficientes e atividades comerciais e educacionais, visto que esta é uma variável que se modifica de acordo com fatores pedológicos, climáticos e antrópicos, podendo assim explicar condições estruturais da vegetação.

Existem duas formas para a quantificação da biomassa: a destrutiva e a não destrutiva, que são classificadas de acordo com a preservação ou não do material biológico. No método destrutivo o material é quantificado a partir de sua mensuração, sendo necessário a retirada do material biológico de seu ambiente natural, o que conseqüentemente gera sua destruição. No método não destrutivo, a quantificação é realizada a partir da relação dos dados de campo com outras variáveis, sem que seja necessária a destruição do material biológico. Assim, o método destrutivo tem alto grau

de precisão, entretanto, em diversos casos, não é viável por ser trabalhoso, oneroso e demorado, além de destruir o material biológico. Já os métodos não destrutivos podem ser boas alternativas, pois implicam em menor mão de obra, menor custo e menor dano ambiental.

No Brasil, o Cerrado é frequentemente exposto ao fogo causado em sua maioria por ações antrópicas. A magnitude do comportamento do fogo pode variar em função das características da vegetação e das condições ambientais. Um dos fatores mais importantes para determinar o comportamento do fogo é a carga de combustível disponível para queima, medida em megagrama por hectare ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), variável essa que pode ser estimada mediante relações quantitativas com a biomassa. O conhecimento da carga de combustível disponível para a queima, juntamente com a biomassa aérea total dos diferentes tipos de formações vegetais, possui importância fundamental para o controle e preservação de áreas savânicas, visto que técnicas de manejo irão variar de acordo com a carga desses materiais.

Portanto, é de suma importância desenvolver métodos mais práticos, rápidos e de baixo custo para estimar a biomassa e a carga de combustível no Cerrado. Tais métodos podem evitar levantamentos de campo exaustivos e onerosos e colaborar na tomada de decisões para a prevenção, combate e uso do fogo controlado nas diferentes formações vegetais do Cerrado.

Estimativas de biomassa aérea estão sendo contabilizadas a partir de imagens de satélite por apresentarem forte relação com a quantificação da vegetação oriunda de índices de vegetação. Esses índices são indicadores sensíveis à densidade de vegetação na superfície (FRANCISCO et al., 2012), o que facilita a correlação entre diferentes estruturas ambientais. Alternativas como o uso de imagem de satélite na estimativa da biomassa se apresentam, portanto, com grande potencial dentro dos métodos não destrutivos para estimar combustíveis e biomassa na vegetação do Cerrado. No entanto, não existem estimativas gerais para o Cerrado, pois as pesquisas realizadas foram sempre feitas com apenas uma fitofisionomia. Assim, faz-se necessária a geração de um método aplicável para todo o Cerrado, a fim de proporcionar quantificações gerais para o bioma.

Diante do exposto, as questões norteadoras deste estudo foram: Quais os melhores índices de vegetação para quantificar a biomassa aérea e o combustível de vegetação do Cerrado? Qual a precisão destas estimativas comparadas com levantamentos de campo? Quais são as fitofisionomias que apresentam os maiores valores de biomassa e combustível no Cerrado?

## **1.2. Objetivo geral**

Estimar a biomassa área da vegetação e a biomassa de combustível, utilizando dados derivados de sensoriamento remoto em diferentes fitofisionomias do Cerrado.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Mapear detalhadamente o uso e cobertura na área da Fazenda Água Limpa;
- Estimar dados de biomassa aérea da vegetação e combustível para diferentes fitofisionomias do Cerrado;
- Analisar as relações entre dados de sensoriamento remoto e biomassa da vegetação obtidas por levantamento de campo;
- Analisar a relação entre dados de sensoriamento e carga de combustível mensurada em campo;

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Bioma Cerrado**

O bioma Cerrado é um complexo vegetacional com relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas (RIBEIRO; WALTER, 1998, 2008). Ele cobre uma área de aproximadamente 2 milhões de km<sup>2</sup> (IBGE, 2004; DURIGAN; RATTER, 2016), correspondendo a mais de 20% do território brasileiro (IBGE, 2004; HUNKE et al., 2015; VIEIRA et al., 2018). Entretanto, menos de 50% da cobertura do Cerrado permanece como vegetação nativa (KLINK; MACHADO, 2005; SOARES FILHO et al., 2014).

Entre os anos de 2002 a 2009 ocorreu uma perda de 92.712 km<sup>2</sup> de áreas naturais de Cerrado para uso agrícola, (OVERBECK et al., 2015), mostrando que as taxas atuais de desmatamento ainda são altíssimas (KLINK; MACHADO, 2005; FRANÇOSO et al., 2015). Com isso, o Cerrado é um dos biomas vegetais mais ameaçados da América do Sul, possuindo menos de 10% de sua área como proteção legal (BATLLE-BAYER et al., 2010; SOARES FILHO et al., 2014).

Este bioma é considerado importante não só pela sua extensão, mas também pela sua grande biodiversidade com mais de 13.137 espécies registradas (OVERBECK et al., 2015). Além de ser a savana mais rica do mundo, ele também apresenta um alto grau de endemismo para as plantas e animais (MEDEIROS, 2011; DANTAS et al., 2018).



O Cerrado apresenta clima tropical, caracterizado por um período seco de abril a setembro e um período úmido entre outubro e março, com pluviosidade média de 1400 mm por ano, variando entre 400 mm e 2400 mm, de acordo com a região (SILVA et al., 2008). O solo é predominantemente distrófico, com alto teor de alumínio, sendo composto por mais de 50% de seu território por latossolos (REATTO et al., 2010).

No Brasil, o fogo molda a estrutura e a composição da vegetação do cerrado (ALVARADO et al., 2017). Mas é importante compreender que existem outros fatores influenciando essa mudança. Fatores como clima (sazonalidades), solo (aspectos físicos e químicos), hidrologia (disponibilidade de água e profundidade dos lençóis) e nutrientes são determinantes para moldar as diferentes fisionomias vegetais (RIBEIRO; WALTER, 2008; MIRANDA et al., 2010).

Os primeiros registros fósseis da presença do fogo no bioma datam aproximadamente 36.000 anos antes do presente (SALGADO-LABORIOU, 2005). Adaptações como sistemas radiculares bem desenvolvidos, rebrotas, troncos suberosos e dormência são algumas das características desenvolvidas pelas espécies nativas vegetais para atribuir maior resistência de sobrevivência a passagem do fogo (MIRANDA et al., 2010). Porém, devido ao amplo uso indevido de fogo para o desmatamento ou manejo de pastagem no Brasil, criou-se uma visão de que o uso do fogo é sempre prejudicial à vegetação, e essa visão levou a políticas atuais de supressão do fogo (DURIGAN; RATTER, 2016).

Muitos estudos afirmam que a incidência do fogo é um mantenedor da estrutura vegetal do Cerrado. Abreu *et al.* (2017) observaram em um estudo temporal no Cerrado que houve perda de biodiversidade quando o fogo foi eliminado da vegetação, gerando redução da diversidade de arbustos e plantas herbáceas. Pinheiro *et al.* (2016), também observaram que a vegetação da savana mantém sua abertura e sua composição vegetal diversificada devido a frequentes incêndios. Logo, sua supressão pode causar impactos na vegetação.

No entanto, para a utilização do fogo é necessário que haja conhecimento sobre o tipo de vegetação e seu comportamento para a realização de um manejo. Estudos de quantificação de biomassa, modelagem do comportamento do fogo e classificação de uso e cobertura do solo são fundamentais para geração de plano de manejo em áreas de preservação (RIBEIRO et al., 2011; MIRANDA et al., 2014; SANTOS et al., 2017a; ROITMAN et al., 2018).

### 2.1.1. Descrição das fitofisionomias do Cerrado

O Cerrado é dividido em 11 fitofisionomias (RIBEIRO; WALTER, 2008) enquadradas em três categorias: formação florestal - que inclui a Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão, as quais são predominantemente compostas por espécies arbóreas, com formação de dossel contínuo; formações savânicas - que incluem o Cerrado Sentido Restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda, as quais são fisionomias compostas por estrato arbóreo e arbustivo-herbáceo, sem um dossel contínuo; e as formações campestres, que são compostas por Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre e caracterizam-se pela presença de arbustos e subarbustos entre o estrato arbustivo-herbáceo (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A Mata Ciliar e a Mata de galeria são fisionomias que possuem como característica principal o margeamento contínuo de corpos d'água. Onde, a Mata Ciliar margeia rios de médio e grande porte e a Mata de galeria acompanha os rios de pequeno porte e córregos, formando corredores fechados (RIBEIRO; WALTER, 2008; AQUINO et al., 2016). A altura média do estrato arbóreo varia entre 20 e 30 metros com dossel fechado e apresentam umidade relativa alta mesmo na época mais seca do ano. A preservação dessas formações são de extrema importância para a proteção de rios e nascentes, pois evitam assoreamento e lixiviação (SANO et al., 2008; MATOS et al., 2017).

O Cerradão se caracteriza por apresentar dossel praticamente fechado com árvores medindo de 8m até 15 m de altura com aspecto xeromórfico, ou seja, resistente a seca (RIBEIRO; WALTER, 2008). Essa variação de altura do estrato arbóreo proporciona condições de luminosidade que favorece a formação de estratos herbáceos e arbustivos. A preservação dessa formação é de suma importância por apresentar um dos maiores potenciais de estoque de biomassa em relação às formações savânicas do Cerrado (MIGUEL et al., 2017a). Apesar de toda sua importância, o Cerradão foi muito impactado pela agropecuária, restando pequenas áreas dessa fitofisionomia no bioma (GOMES et al., 2004).

A formação com maior representatividade no Cerrado é o Cerrado sentido restrito caracterizado pela presença de arbóreas tortuosas, arbustos e herbáceas distribuídas aleatoriamente com adaptações para sobrevivência a seca e ao fogo (RIBEIRO; WALTER, 2008; MIRANDA, 2013). Trata-se de comunidade vegetal com alta diversidade, onde poucas espécies constituem grandes populações com distribuição

distinta de espécie ao longo das áreas (FELFILI et al., 2004). Essa fitofisionomia é a que melhor caracteriza as formações savânicas no bioma Cerrado (MIRANDA, 2013).

O campo de murundus é caracterizado por apresentar palmeiras do Buriti emergente em meio as espécies herbáceas-arbustivas. Geralmente são áreas planas e suscetíveis a inundações sazonais ou permanentes (PINTO et al., 2014). Essas áreas são encontradas em solos hidromórficos que deve ser observada pelo potencial de armazenamento de recursos hídricos que possui e pela crescente demanda hídrica (LIMA; SILVA, 2008).

Formações campestres são formadas em suma maioria por estrato herbáceo-arbustivo. O campo sujo é composto por espécies herbáceo-arbustivas com arbustos e subarbustos espalhados entre si (GIÁCOMO et al., 2013). Já o campo limpo é composto em sua grande maioria por espécies herbáceas, onde praticamente não há presença de arbustos e árvores (RIBEIRO; WALTER, 2008; GOMES et al., 2018a). Essas áreas são extremamente sensíveis a incêndios e, por isso, requerem maior cuidado de controle e prevenção do fogo (PINHEIRO; DURIGAN, 2009; MASSI et al., 2017).

Assim, formações vegetais mais abertas e com presença de gramíneas, tendem a aumentar a frequência e a intensidade dos incêndios. A distribuição espacial de combustíveis na camada superficial, constituído principalmente por gramíneas e herbáceas, é um dos principais fatores que podem determinar a ocorrência e o comportamento do fogo (FRANKE et al., 2018) e, por isso, requerem atenção especial.

## **2.2. Uso e cobertura da terra**

Estudos da cobertura e do uso da terra têm crescido muito nas últimas décadas devido aos trabalhos com enfoque nas mudanças climáticas, ambientais, expansão de áreas agrícolas e aumento dos aglomerados urbanos (GRIFFITHS et al., 2010; SANTOS et al., 2017a). Transformações do espaço natural ocorrem desde o início da ocupação humana, embora recentes avanços tecnológicos venham acelerando esse processo (BHATTI; TRIPATHI, 2014; COSTA et al., 2016). A intensificação da retirada de vegetação natural tem trazido diversos danos para o meio ambiente, como erosão dos solos, degradação ambiental, desaparecimento de espécies, causando impactos na fauna e na flora em diversas regiões (DUARTE; MARX, 2009; MMA, 2015).

O mapeamento do uso e da cobertura do solo a partir da utilização de técnicas de geoprocessamento apresenta-se como um forte instrumento para análise, planejamento e administração do meio físico (CLEVE et al., 2008; MULDER et al., 2011; BHATTI;

TRIPATHI, 2014; COSTA et al., 2016), além de gerar disponibilidade de arquivos históricos, os quais ajudam no mapeamento e compreensão da expansão de território ao longo do tempo (XU, 2008; GRIFFITHS et al., 2010; BHATTI; TRIPATHI, 2014). Com isso, é essencial conhecer os elementos que compõem uma paisagem para geração de estratégias de manejo (COHEN, 2006; SEABRA; CRUZ, 2013).

Várias técnicas foram formuladas para mapeamento e caracterização de áreas ambientais que podem ser agrupadas em duas técnicas distintas: a primeira é baseada na classificação de imagens por pixel e objeto (GUINDON et al., 2004; CLEVE et al., 2008; GAO, 2008), enquanto que a segunda envolve uma segmentação das imagens a partir de índices (ZHA et al., 2003; GUINDON et al., 2004). Cada método possui suas vantagens e limitações. Os índices são ótimos para diferenciar características específicas, como vegetação e neve. Já a classificação por pixel é fundamental para distinguir diversos usos do solo em uma mesma área (GUINDON et al., 2004; GRIFFITHS et al., 2010; BHATTI; TRIPATHI, 2014). Assim, a classificação de uso do solo é uma técnica fundamental para geração de políticas de manejo.

### **2.3. Biomassa vegetal**

A biomassa é estabelecida como toda a matéria orgânica encontrada acima e abaixo do solo, viva ou morta (BROWN; LUGO, 1984). Ela pode ser definida como biomassa área ou subterrânea, biomassa área refere-se a plantas lenhosas e herbáceas acima do solo e a subterrânea é a biomassa das raízes, sendo 50% composta por carbono (CHAVE et al., 2005; LACERDA et al., 2009). Portanto, entendendo a distribuição da biomassa no Cerrado, é necessário compreender sua função dentro do ciclo do carbono e seu papel na mitigação do aquecimento global (SANQUETTA, 2002; FAO, 2012).

As estimativas de biomassa podem ser obtidas de forma direta ou indireta. A medida direta tem alto grau de precisão, mas sua quantificação exige amostragem destrutiva (HIGUCHI et al., 1994), além de, por abater árvores na floresta, não ser viável em áreas de difícil acesso ou protegidas por lei. No caso de medições indiretas, os valores são gerados a partir de equações alométricas em que se correlaciona esse parâmetro com variáveis facilmente mensuráveis, como diâmetro e altura (SILVEIRA et al., 2008; ROITMAN et al., 2018).

Dessa forma, entender a dinâmica da vegetação do Cerrado é um pré-requisito importante para o estabelecimento de ações de manejo devido a sua forte exploração nos últimos anos (KLINK; MACHADO, 2005). O controle do bioma está associado à

manutenção da biodiversidade, dos ciclos hidrológicos e do armazenamento de carbono (FEARNSIDE, 2005; MIRANDA et al., 2014), que, por sua extensão, pode influenciar no balanço de energia, água e carbono em escala global (GRACE et al., 2006). Nessa perspectiva, o conhecimento da distribuição da biomassa no Cerrado é fundamental para entender o funcionamento das relações ecológicas do bioma.

Entretanto, estimativas gerais para biomassa no Cerrado são dados escassos, pois a obtenção de valores dendrométricos é limitada devido à heterogeneidade de espécies, à grande variedade de formas e dimensões de fuste e à alta variabilidade de fitofisionomias (REZENDE et al., 2006; LACERDA et al., 2017; MIGUEL et al., 2017a). Diversos estudos foram realizados para a quantificação de biomassa em fitofisionomias específicas do Cerrado, mas existe uma carência de dados gerais desse bioma em que possam ser contemplados todos os tipos de fitofisionomias em apenas uma equação (DELITTI; BURGER, 2000; MIRANDA et al., 2014; MIGUEL et al., 2015). Gomes *et al.* (2018) compilaram dados de comportamento do fogo e verificaram que uma das lacunas de conhecimento a ser preenchida é o aumento da escala de estudos no Cerrado, mudando o foco de escala local para regional, englobando todo o bioma.

Trabalhos realizados para quantificação da biomassa total no Cerrado encontraram vasta amplitude de valores em distintas fitofisionomias. Nas formações savânicas, os valores de biomassa aérea variaram de 2,03 Mg.ha<sup>-1</sup> (KAUFFMAN et al., 1994) a 58,87 Mg.ha<sup>-1</sup> (OTTMAR et al., 2001). Nas formações campestres, variaram de 1,09 Mg.ha<sup>-1</sup> (KAUFFMAN et al., 1994) a 15,6 Mg.ha<sup>-1</sup> (OTTMAR et al., 2001). Para formações florestais, o único estudo encontrado foi realizado em mata de galeria, onde o valor de biomassa aérea total foi 133,4 Mg.ha<sup>-1</sup> (DELITTI; BURGER, 2000). Vários outros estudos mencionaram apenas dados de biomassa aérea para vegetação lenhosa. Mas mesmo com pesquisas já existentes, a biomassa ainda é uma variável de difícil quantificação e, portanto, requer métodos mais práticos de quantificação.

#### **2.4. Combustível vegetal**

Outra variável importante para definir a dinâmica do Cerrado é o combustível. Material combustível florestal é definido como todo material orgânico capaz de entrar em ignição e queimar, sendo ele vivo ou morto (SOARES; BATISTA, 2007), e é essencial para entender o comportamento do fogo e seus efeitos (BEUTLING et al., 2012; TAVARES, 2017). No Cerrado, é considerado como carga disponível para a queima todo

material lenhoso, vivo ou morto, com diâmetro menor que 6 mm, sendo ele as folhas e os ramos mais finos, até a altura de dois metros (LUKE; MCARTHUR, 1978; MIRANDA et al., 2010), o estrato herbáceo e cinco por cento das árvores, considerados como a porcentagem de folhas nas árvores (SILVA, 1990).

Assim como em outras savanas, os incêndios no Cerrado tendem a ser superficiais com chamas atingindo até 2,9 metros de altura (CASTRO; KAUFFMAN, 1998). Dessa forma, o principal material a ser queimado é o combustível do estrato rasteiro, as folhas e os ramos mais baixos do estrato arbóreo (MIRANDA et al., 2010). Dependendo da fisionomia a ser considerada, a carga de combustível podem ser altamente alteradas pelo espaço e pelo tempo, sendo o acúmulo de combustível o resultado de interações complexas entre fatores bióticos e abióticos (HARMON et al., 2004; KEANE, 2013; FRANKE et al., 2018).

Os métodos de quantificação de combustível, quando avaliados, podem ser divididos em dois: os destrutivos e os não destrutivos. Os métodos destrutivos são aqueles em que se coleta o material do solo para ser classificado. Já os métodos não destrutivos são baseados em relações quantitativas ou matemáticas (TAVARES, 2017). Esses métodos estão sendo desenvolvidos para minimizar o tempo e o custo dessa quantificação.

Ottmar et al. (2001) desenvolveram uma metodologia para quantificação de biomassa e combustível a partir da relação entre a cena do campo com fotografias estereoscópicas. (Baillie *et al.* (1999) desenvolveram um método de amostragem por linha interceptora, onde uma linha de amostragem é alocada e são registrados os diâmetros dos indivíduos que cruzam essa linha de acordo com os critérios pré-estabelecidos. Outro método utilizado é a aplicação da relação entre dados de imagens de satélites e dados de campo. Nele é possível estimar dados florestais a partir de índices de vegetação, classificação de uso e reflectância (TAVARES, 2017; FRANKE et al., 2018).

Dentre as pesquisas realizadas no Cerrado, o total de combustível pode variar de 6 a 12 Mg.ha<sup>-1</sup>, a depender da fisionomias avaliada e do período de proteção contra o fogo (CASTRO; KAUFFMAN, 1998). Essa variação se deve à diversidade de fisionomias encontradas na savana brasileira. Pereira Júnior (2002) afirma que a quantidade de combustível pode ser determinada utilizando o método direto em áreas com pequena extensão, mas em áreas de grande dimensão se torna inviável. Dessa forma, têm-se buscado métodos menos onerosos para quantificação do combustível no Cerrado.

## 2.5. Índice de vegetação para estimativa florestais

A observação terrestre a partir de imagens de satélite é a técnica que mais cresce em análises espaciais de extensão de terra, por ser econômica e efetiva com capacidade de coleta em escala global e temporal (ZHU; LIU, 2015; GALIDAKI et al., 2016; SANTOS et al., 2017b; DEO et al., 2018). Essa técnica se deve aos avanços tecnológicos do sensoriamento remoto, que é a ciência que, através do registro da interação da radiação eletromagnética com alvos terrestre, possibilita obtenção de imagens da superfície (MENESES; NETTO, 2001). Essa interação ao longo de suas faixas espectrais é conhecida como reflectância espectral (PONZONI et al., 2012).

O comportamento da reflectância espectral na vegetação é dependente de sua estrutura, onde sua variação depende da interação da luz com o dossel florestal (PONZONI et al., 2012). Portanto, a utilização de bandas espectrais que refletem as atividades fotossintéticas se apresenta como uma variável preditora para entender a diferenciação de fisionomias de uma região (FERRAZ et al., 2014). As áreas do espectro eletromagnético que melhor capta a variação vegetacional são as áreas do visível (0,4 a 0,72  $\mu\text{m}$ ) (AQEEL et al., 2011), e a região do infravermelho próximo, a qual reflete o estado físico da vegetação (PONZONI et al., 2012). Sendo assim, a utilização de bandas espectrais que se relacionam com atividades fotossintéticas se apresenta como uma variável de interesse para estudos vegetacionais.

Diversos índices de vegetação (IVs) foram desenvolvidos por ser ferramentas promissoras para estimativas de inúmeras variáveis ambientais (FERRAZ et al., 2014; SANTOS et al., 2017b). Os índices mais utilizados para avaliar a vegetação são, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e o SAVI (*Soil-adjusted vegetation Index*) (ROUSE et al., 1974; HUETE, 1988; JIANG et al., 2008). Além deles, existem índices criados para inclusão de bandas não usuais, como o NDRE (*Normalized Difference Red-Edge Index*),  $CI_{\text{green}}$  (*Green Chlorophyll Index*) e o  $CI_{\text{red-edge}}$  (*Red-edge Chlorophyll Index*) (GITELSON; MERZLYAK, 1994; GITELSON et al., 2003).

O índice NDVI foi desenvolvido por Rouse *et al.* (1974) e é o índice mais disseminado na literatura. Este índice é sensível a presença de clorofila detectada pela banda vermelha, além de refletir o estado da vegetação em função da utilização do infravermelho próximo em sua fórmula (MENESES; NETTO, 2001). O EVI foi criado por Huete et al. (2002), aprimorado para ser uma variação melhora do NDVI, ele reduz a

influência da atmosfera e do solo e é mais sensível a variação estrutural do dossel (HUETE et al., 2002; ALVARADO et al., 2017). O SAVI foi desenvolvido por Huete (1988), o índice de vegetação ajustado ao solo é utilizado para corrigir a influência do solo exporto na diferenciação da vegetação.

O índice NDRE é uma variação do NDVI com a inclusão da banda *red-edge*, essa banda propicia aperfeiçoar a diferenciação de objetos (COSTA et al., 2016). Antunes e Siqueira (2013) observaram que a banda na borda da região do vermelho representa melhor a variação, tanto no conteúdo da clorofila como na estrutura, contribuindo assim na diferenciação de classes de vegetação. Outro índice que apresenta a banda *red-edge* é o  $CI_{red-edge}$ , o índice apresenta alta correlação com o conteúdo de clorofila e, no geral, apresenta forte correlação com a vegetação devido a banda *red-edge*. Por fim, o índice  $CI_{green}$ , variação do  $CI_{red-edge}$  para inclusão da banda *green*, desenvolvido por Gitelson et al. (2003), índice que, também, possui alta correlação com o conteúdo de clorofila. Índices de vegetação juntamente com imagens de alta resolução tem se apresentado como uma técnica eficiente e menos onerosa para estimativas de variáveis ambientais (MIGUEL et al., 2015; ZHU; LIU, 2015; MIRELES et al., 2017; PHUA et al., 2017).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Área de estudo**

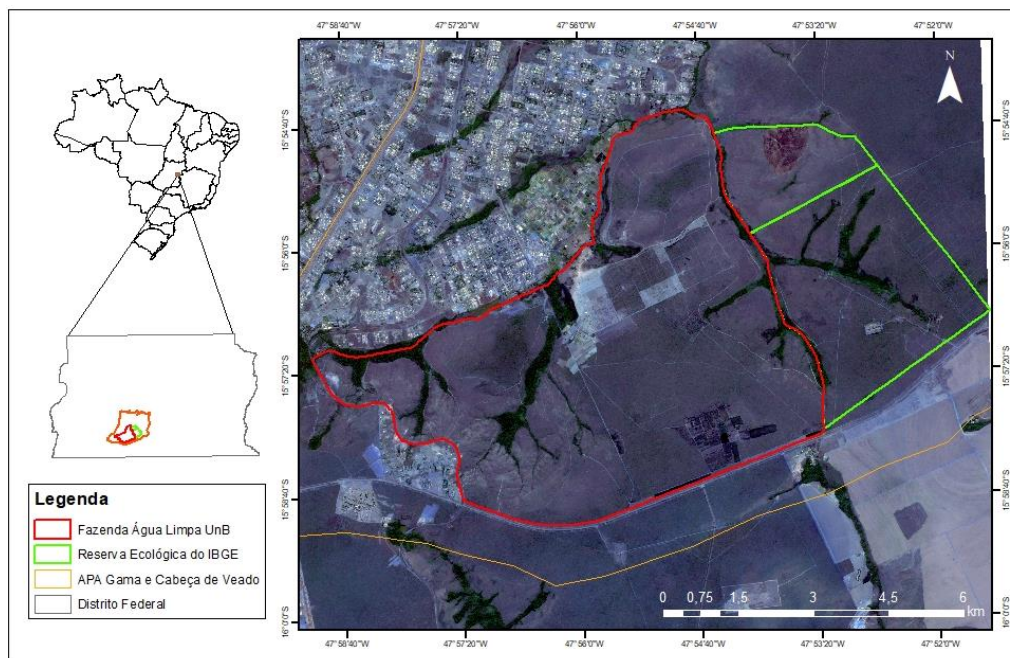
O estudo foi realizado em uma porção da Área de Proteção Ambiental (APA) Gama Cabeça de Veado, criada pelo Decreto nº 9.417, de 21 de abril de 1986, visando à proteção de mananciais, à conservação da biodiversidade do Cerrado e à manutenção das pesquisas de longa duração conduzidas na área (IBRAM, 2004).

Estão inseridas dentro da APA oito unidades de conservação: Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Capetinga-Taquara, que compõe o terreno da fazenda de experimentação científica da UnB (Fazenda Água Limpa), a Estação Ecológica do Jardim Botânico, a Reserva Ecológica do IBGE, o Santuário da Vida Silvestre do Riacho Fundo, o Parque Ecológico do Córrego da Onça, o Parque Ecológico Garça Branca e a ARIE do Cerradão. Tendo em vista a importância dessa Área de Proteção, é fundamental a criação e a manutenção de estratégias de preservação e proteção ambiental.

A pesquisa foi realizada na Fazenda Água Limpa (FAL) e na Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que se localizam entre as coordenadas 15°56' – 15°59' S e 47°52' – 47°58' W, padrão WGS 84 (Figura 1). Estão



a uma altitude entre 1.048 m e 1.150 m e apresentam clima sazonal, classificado como Aw, conforme Koppen, tendo como característica duas estações bem definidas, uma quente e chuvosa, que ocorre de outubro a abril, e outra fria e seca, que ocorre de maio a setembro (NIMER, 1989).



**Figura 1.** Localização da área de estudo no Distrito Federal e Brasil.

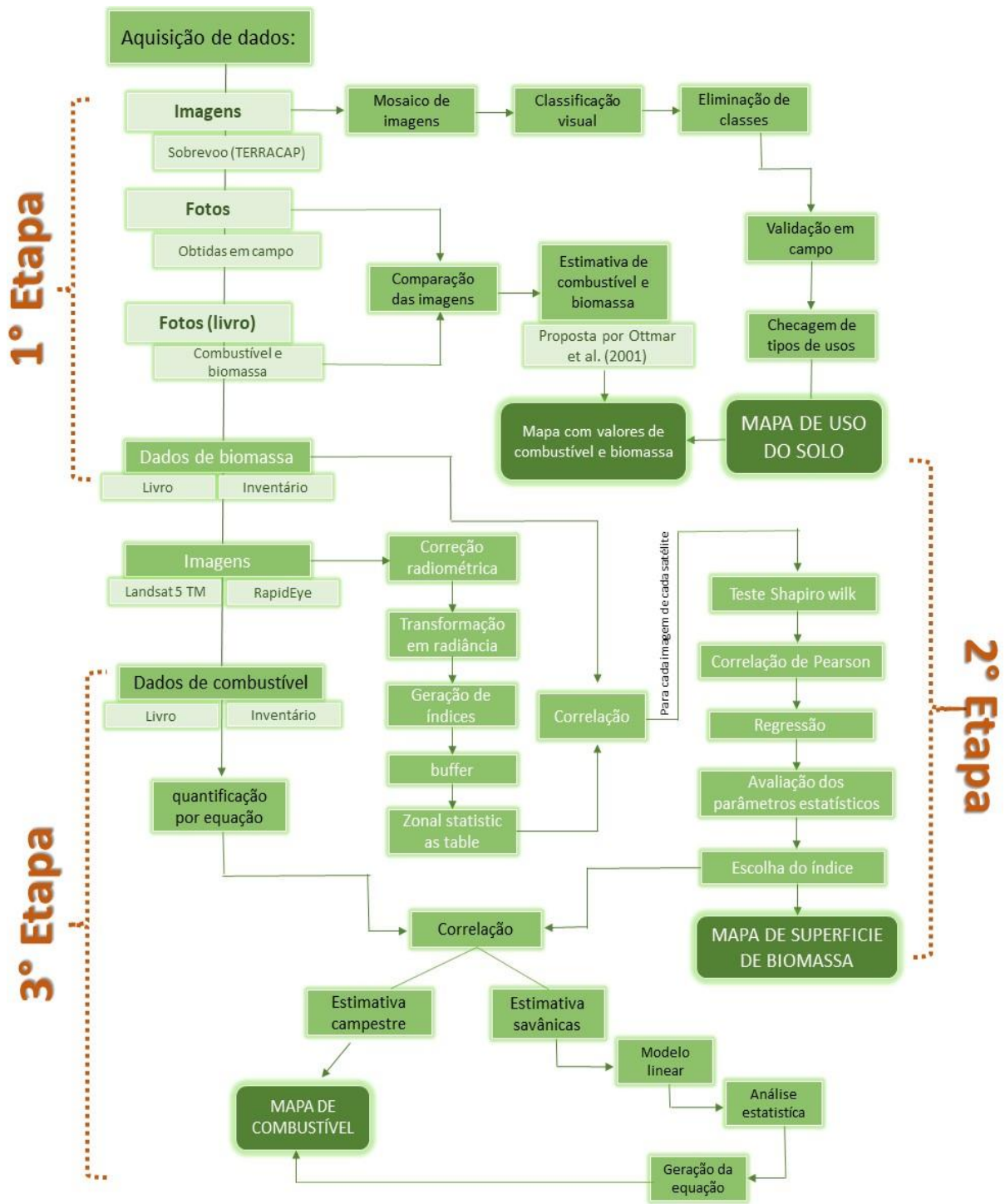
As temperaturas podem variar de 12°C a 28,5°C. A umidade relativa pode oscilar entre 15% a 70%, com média de 47% e a precipitação média anual é de 1400 mm, segundo dados coletados na estação meteorológica da Fazenda Água Limpa. O solo que predomina na FAL é o Latossolo vermelho-escuro, com alto teor de alumínio e baixo teor de cálcio e magnésio (LIBANO; FELFILI, 2006) e o predominante no IBGE é Latossolo vermelho amarelo, típico da região (IBGE, 2004).

As áreas se localizam a aproximadamente 20 km ao sul da cidade de Brasília (LIBANO; FELFILI, 2006), Capital Federal. A estação experimental da Universidade de Brasília ocupa uma área de aproximadamente 4233 hectares e a Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) possui 3400 hectares. A fitofisionomia predominante nas áreas é o Cerrado sentido restrito (FELFILI et al., 1992; IBGE, 2004), mas existem, também, áreas cobertas por diversas fitofisionomias, variando desde campo limpo até matas de galeria, além de possuir áreas de agricultura e silvicultura.

### **3.2. Fluxograma Metodológico**

O estudo foi dividido em três etapas, a primeira etapa foi realizada na área da Fazenda Água Limpa, onde foi gerado a classificação de uso do solo e a quantificação de biomassa e combustível por estéreo-fotografias. A segunda etapa foi realizada na FAL e na Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pois as parcelas de quantificação de biomassa foram alocadas nas duas áreas. A terceira etapa, realizada na área da FAL, consistiu na quantificação de combustível com base na relação com a biomassa gerada por índices de vegetação.

A metodologia foi descrita passo a passo na forma de fluxograma (Figura 2) apresentado a seguir, para uma melhor visualização das etapas realizadas.



**Figura 2.** Fluxograma metodológico para classificação de uso do solo e estimativa de biomassa e combustível.

### 3.3. Base de dados

#### 3.3.1. Imagens

Para o estudo de uso e cobertura da terra na FAL foram utilizadas imagens de sobrevoo realizados pela Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal (TERRACAP)

em 2017. As imagens obtidas são do período mais seco do ano, entre junho e setembro, evitando, assim, confusões espectrais devido à nebulosidade. A resolução espacial da imagem é de 50x50 centímetros por pixel, geradas em três bandas.

Na estimativa de biomassa, foram utilizadas duas imagens de satélites distintos: *RapidEye* e *Landsat 5 TM*. A imagem do satélite *RapidEye* foi adquirida em 30 de junho de 2014, disponibilizada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). A data de aquisição da imagem foi escolhida por ser a imagem com menor porcentagem de nuvem e por representar as características do período mais seco do Cerrado (ALVARADO et al., 2017), época em que a vegetação se encontra mais susceptível a possíveis incêndios devido a baixa umidade.

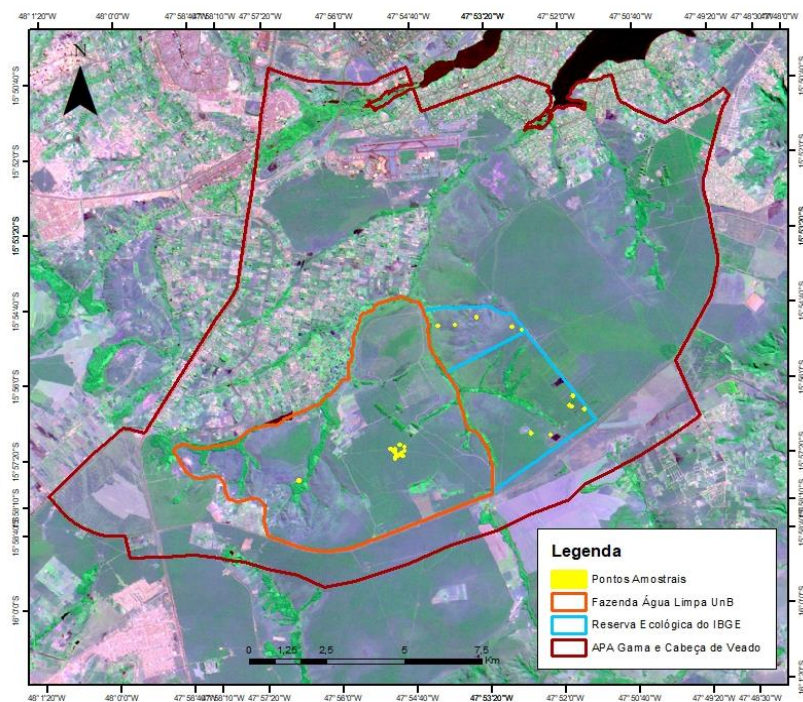
O sistema de composição de imagens multiespectrais *RapidEye* é constituído por cinco satélites que operam conjuntamente e possui resolução espacial de 5 metros, cobrindo uma área de 25 m<sup>2</sup> por pixel. O satélite gera imagens em cinco bandas espectrais: azul, verde, vermelho, *Red-Edge* e infravermelho próximo (MASSETTI et al., 2016; LI et al., 2017; XU et al., 2017).

A imagem adquirida pelo satélite *Landsat 5 TM* (221/71) em 25 de junho de 2000 foi disponibilizada pelo Instituto de Pesquisa Espacial (INPE). O satélite *Landsat 5 TM* possui resolução espacial de 30 metros, cobrindo 900 m<sup>2</sup> por pixel (KOVALSKYY; ROY, 2013; ALMEIDA et al., 2014a; XU et al., 2017). A imagem foi georreferenciada em projeção UTM e Datum WGS 84. Posteriormente, ambas as imagens foram tratadas para minimização dos efeitos atmosféricos.

Para a quantificação de combustível foi utilizada a imagem que gerou o índice com os melhores parâmetros estatísticos de correlação com a biomassa.

### 3.3.2. Dados de biomassa

Os dados de biomassa foram obtidos de duas formas distintas: uma segundo a metodologia proposta por Ottmar et al. (2001), que consiste em quantificar a biomassa a partir da comparação da imagem real com fotografias estereoscópicas, e outra a partir de um inventário em campo. No total, foram obtidos 24 pontos amostrais, 12 de cada metodologia (Figura 3).



**Figura 3.** Localização dos pontos amostrais em relação a APA Gama e Cabeça de Veado.

### 3.3.2.1. Estéreo-fotografias para quantificação de biomassa

Os dados de biomassa oriundos do livro de séries estéreo-fotográficas para quantificar a biomassa da vegetação do Cerrado do Brasil central podem ser encontrados no livro “séries de estéreo-fotografias para quantificar a biomassa da vegetação do Cerrado do Brasil central” (Ottmar *et al.* 2001). Do qual foram coletados dados da estrutura do estrato lenhoso, composição e biomassa da vegetação, biomassa da vegetação herbáceo arbustiva e do material lenhoso morto e acumulado na superfície do solo, divididos em classes de tamanhos. Os dados foram coletados entre julho e agosto, que são os meses mais secos na região.

Para a quantificação de biomassa a partir da comparação com estéreo fotografias, foram consideradas todas as parcelas do livro e verificadas as apresentavam maior similaridade com as fitofisionomias encontradas na Fazenda Água Limpa. Já para a análise de correlação entre biomassa e índices de vegetação, foram considerados apenas os pontos localizados no DF (Tabela 1), onde foi possível amostrar cinco tipos de fitofisionomias.

**Tabela 1.** Pontos em que foram coletados e quantificados a biomassa da vegetação do Cerrado no Brasil Central.

<b>Amostras</b>	<b>Fitofisionomia</b>	<b>Área</b>
<i>CL01</i>	Campo Limpo	IBGE Brasília – DF
<i>CL02</i>	Campo Limpo	IBGE Brasília – DF
<i>CL06</i>	Campo Limpo	Fazenda Água limpa – DF
<i>CS01</i>	Campo Sujo	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CS04</i>	Campo Sujo	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CS07</i>	Campo Sujo	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CR03</i>	Cerrado Ralo	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CSS01</i>	Cerrado Sentido Restrito	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CSS03</i>	Cerrado Sentido Restrito	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CD01</i>	Cerrado Denso	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CD02</i>	Cerrado Denso	Reserva ecológica do IBGE - DF
<i>CD03</i>	Cerrado Denso	Reserva ecológica do IBGE - DF

A metodologia sugerida no livro consiste em estimar a biomassa de um determinado local a partir da comparação das fotografias correspondentes à área mais similar com a que se pretende avaliar. Assim, é possível estimar a biomassa por comparação com as fotografias disponíveis no manual de campo.

Para a quantificação de biomassa foram utilizadas as coordenadas geográficas encontradas no livro para que fosse possível correlacionar os pontos com as imagens. Miranda (2013), em uma pesquisa no Cerrado, verificou que a variação anual de biomassa é cerca de 0,073 Mg.ha<sup>-1</sup> ao ano, variando de acordo com a frequência de fogo e a sazonalidade das regiões. A partir desses dados, foi possível averiguar a pouca variação das características ambientais nos últimos 20 anos nessas áreas. Entretanto, se faz necessário ressaltar que a área sofreu um grande incêndio em 2011, portanto algumas das diferenças encontradas nas imagens, podem estar atreladas a esse evento.

### 3.3.2.2. Estimativa de biomassa a partir de Inventário Florestal

O inventário florestal da vegetação foi realizado em 2014. Para a amostragem, foram aleatorizadas 12 parcelas de 20 m x 50 m, perfazendo 1,2 ha amostrado. Em cada parcela foi medida toda a vegetação lenhosa viva e morta em pé, com diâmetro da base

(Db) a 0,30 cm do solo, igual ou superior a 5 cm, usando a suta para medir os diâmetros e uma régua hipsométrica para a altura.

O volume de cada árvore foi estimado utilizando o modelo ajustado para o Cerrado sentido restrito por Rezende *et al.* (2006), o qual é dado por:

$$V=0,000109Db^2+0,0000154Db^2Ht \quad (1)$$

$V$  = volume individual por árvore (m<sup>3</sup>);

$Db$  = diâmetro da base, tomado a 0,30 m do solo (cm);

$Ht$  = altura total da árvore (m);

Para a estimativa da biomassa acima do solo, foram considerados tronco, galho e serapilheira. Os troncos e os galhos foram considerados tanto nos indivíduos vivos quanto nos mortos e a biomassa foi obtida pela seguinte equação gerada, também, para cerrado sentido restrito (REZENDE *et al.*, 2006):

$$BS=- 0,49129+0,02912Db^2Ht \quad (R^2 = 98,28\% \text{ e } Syx = 25,79\%) \quad (2)$$

BS = Biomassa seca em kg por árvore.

Na quantificação do estoque de biomassa na serapilheira, foram selecionados, aleatoriamente, 3 pontos amostrais em cada uma das 12 parcelas. Em cada ponto foi alocado um gabarito de 50 cm x 50 cm (0,25 m<sup>2</sup>) e toda a serapilheira encontrada dentro do gabarito foi coletada e levada para secagem em estufa para obtenção do peso seco do material. A massa seca total foi obtida por parcela a partir da média dos três pontos em cada uma das parcelas. Os valores foram encontrados em g e extrapolados para Mg.ha<sup>-1</sup>.

O valor de biomassa da regeneração natural (indivíduos lenhosos com  $Db \leq 5$  cm) e dos indivíduos herbáceos, considerando gramíneas e ervas de caule pouco lignificado, foram estimados considerando os valores de 5,74% e 11,37%, respectivamente, do valor total de biomassa seguindo dados obtidos por Azevedo (2014) em área semelhante de Cerrado.

### **3.4. Classificação do Uso do Solo**

#### **3.4.1. Métodos de geoprocessamento e classificação**

Para a classificação dos tipos de uso da terra foram utilizadas imagens de sobrevoo fornecidas pela TERRACAP. As imagens foram trabalhadas no ambiente ArcMAP – ArcGIS 10.3, da distribuidora ESRI. Primeiramente, foram cheçadas possíveis

sobreposições das imagens para georreferenciamento, e então realizado o mosaico para composição da área da Fazenda Água Limpa.

Subsequentemente, foi realizada a análise visual do perfil horizontal devido à alta qualidade das imagens, com resolução espacial de 50 centímetros por pixel. Apesar de a classificação computacional ser a mais comumente utilizada devido à rapidez e facilidade em obter resultados, a escolha da realização da classificação visual se deu em decorrência da fragmentação do uso do solo em pequenas áreas, característica que dificulta a utilização de técnicas automatizadas de classificação.

A escolha das classes foi definida após a observação geral da imagem, na qual foram identificadas 10 classes de uso da terra, sendo que, destas, seis foram de vegetação nativa, composta por cerrado sentido restrito, campo sujo, campo limpo, mata de galeria, cerradão e áreas úmidas, que são os campos de murundu. As demais foram classificadas em área degradada, silvicultura, pecuária e agricultura. Dentro da agricultura foi considerada a área de olericultura, de cultura de grãos e os galpões utilizados para essa finalidade.

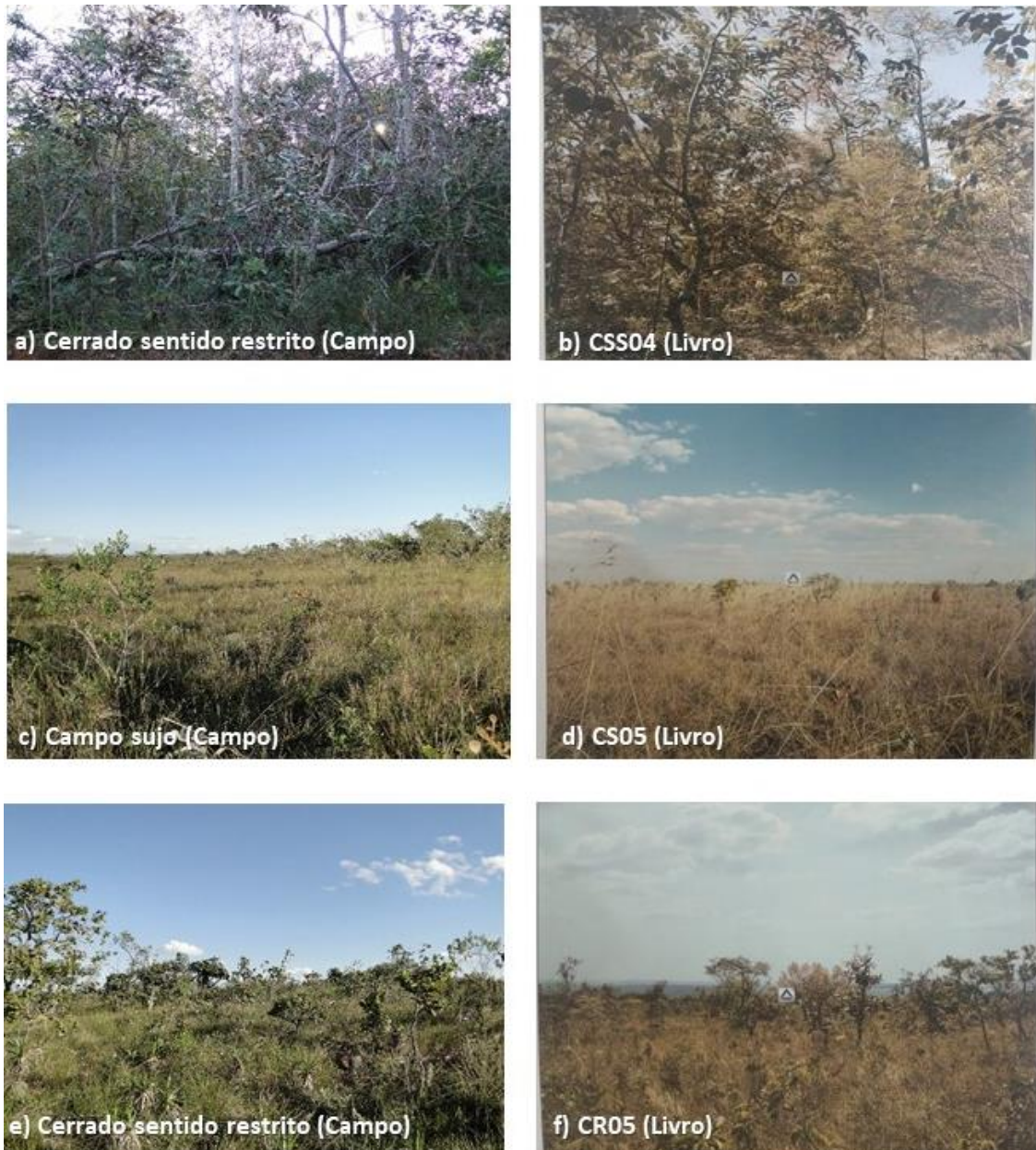
#### 3.4.2. Checagem em campo

Foram realizadas visitas na FAL para a validação e confirmação da classificação do uso da terra, sendo esta etapa necessária para identificar alguns tipos de uso que causam confusão na classificação visual de imagens, como é o caso entre pastagem e campo limpo. Após a classificação da imagem, as fitofisionomias foram visitadas a fim de validar a classificação.

### **3.5. Quantificação de biomassa e combustível por estéreo-fotografias**

A metodologia consistiu em fazer visitas a campo para tirar fotos das fitofisionomias existentes na área e posteriormente compará-las com os dados da estéreo-fotografia. Após a obtenção das imagens, foi possível encontrar fitofisionomias que eram semelhantes em comparação às imagens (Figura 4).





**Figura 4.** Registro fotográfico da checagem em campo (à esquerda) e imagens estéreo-fotográficas (à direita) de diferentes fisionomias na área de estudo.

Depois da verificação da semelhança entre as imagens de campo e as imagens estéreo-fotográficas foi possível estimar a biomassa para quatro fisionomias distintas, campo sujo, campo limpo, cerrado sentido restrito e cerradão, pois as fisionomias eram semelhantes. A biomassa foi estimada a partir das tabelas de valores geradas por Ottmar et al. (2001) (Figura 5).



(SWIR), utilizando valores da elevação solar, disponibilizados pelo INPE, por meio da seguinte equação (CHANDER; MARKHAM, 2003):

$$L_{\lambda} = L_{min(\lambda)} + \left( \frac{L_{max(\lambda)} - L_{min(\lambda)}}{Q_{max}} \right) \cdot Q_{cal} \quad (5)$$

$L_{\lambda}$  = radiância espectral na banda i ( $\text{Watts m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );

$L_{max(\lambda)}$  = radiância espectral máxima na banda i;

$L_{min(\lambda)}$  = radiância espectral mínima na banda i;

$Q_{max}$  = nível de cinza máximo na banda i;

$Q_{cal}$  = nível de cinza para o pixel.

A conversão de números digitais (ND) em radiância foi dada por (CHANDER; MARKHAM, 2003; PLANET, 2016):

$$r_{0,i} = L_{rad} \cdot \left( \frac{\pi * d^2}{E_{0,i} * \cos\theta} \right) \quad (6)$$

$r_{0,i}$  = reflectância espectral na banda i;

$d^2$  = distância Terra-Sol em unidade astronômica;

$E_{0,i}$  = valor médio da irradiância solar exo-atmosférica na banda i em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} / \text{m}^{-1}$  (constante solar);

$\theta$  = ângulo zenital solar calculado a partir do ângulo de elevação solar;

$L_{rad}$  = radiância espectral na banda i em  $\text{Wm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} / \mu\text{m}^{-1}$ .

Após a correção radiométrica e a transformação de números digitais em radiância, foram gerados os índices de vegetação, por meio de operações matemáticas. Todas as operações realizadas na imagem foram feitas no software ERDAS Imagine 2011. Para a imagem do satélite Landsat 5 TM, foram gerados três índices de vegetação: o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). Para a imagem do *RapidEye* foi possível utilizar seis índices (Tabela 2), pois além das bandas existentes no Landsat, o *RapidEye* possui mais uma banda, a *red-egde*.

**Tabela 2.** Equações dos índices de vegetação utilizados no trabalho.

Índices de vegetação	Equação	Referência
<i>IV Melhorado</i> (*)	$EVI = 2,5 \cdot \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + 2,4 \cdot R_{RED} + 1)}$	(JIANG et al., 2008)
<i>Diferença Normalizada</i> (*)	$NDVI = \left( \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \right)$	(ROUSE et al., 1974)
<i>IV Ajustado ao solo</i> (*)	$SAVI = \frac{(1+Ls)(R_{NIR}-R_{RED})}{Ls+R_{NIR}+R_{RED}}$	(JUSTICE et al., 1998)
<i>Diferença Normalizada do Vermelho Limítrofe</i>	$NDRE = \frac{(R_{NIR} - R_{RE})}{(R_{NIR} + R_{RE})}$	(GITELSON; MERZLYAK, 1994)
<i>Índice de clorofila</i>	$CI_{green} = \frac{R_{NIR}}{R_{GREEN}} - 1$	(GITELSON et al., 2003)
<i>Índice de clorofila modificado</i>	$CI_{red-edge} = \frac{R_{NIR}}{R_{RE}} - 1$	(GITELSON, 2005)

$R_{nir}$  - valor de radiância refletida da banda do infravermelho próximo;  $R_{RED}$  - valor de radiância refletida da banda do vermelho;  $R_{RE}$  - valor de radiância refletida da banda red-egde;  $Ls$  - constante denominada de fator de ajuste do índice SAVI. (\*) - índices que foram calculados para os dois satélites.

Para a obtenção dos valores dos índices por parcela foram gerados *buffers* com raio de 27,5 metros a partir do ponto central e posteriormente, utilizou-se a ferramenta *Zonal Statistics as Table*, disponível no ArcGis™ 10.3, para obtenção do valor médio de cada índice dentro de cada parcela.

### 3.7. Estatística para estimativa de biomassa

Foi aplicada a análise de variância (one-way ANOVA), utilizando-se o teste de Shapiro – Wilk para verificação da normalidade do conjunto de dados no software Action Stat 3. Após a verificação, foi utilizado o teste de correlação de Pearson entre os índices e a biomassa total das parcelas obtidas em campo. Para a modelagem, foram ajustados modelos lineares utilizando o valor de biomassa total em  $Mg \cdot ha^{-1}$  e os índices de vegetação médios de cada parcela.

O modelo foi escolhido baseado no índice que obteve os seguintes parâmetros: a maior correlação, o menor erro padrão relativo ( $S_{yx\%}$ ), o maior coeficiente de correlação

( $R^2$ ) e a melhor distribuição dos resíduos, calculada a partir da diferença entre a biomassa real e a estimada (MIGUEL et al., 2015). A partir do modelo ajustado, foi gerado um mapa de superfície de biomassa para toda a área de estudo.

### **3.8. Análise de regressão e correlação entre biomassa e combustível**

Para a equação de quantificação de combustível foram utilizados os dados de biomassa obtidos a partir da melhor correlação com os índices de vegetação e os valores de combustível disponível para a queima de acordo com as equações supracitadas.

Quando analisada a correlação entre os dados de biomassa e o combustível disponível para a queima, não foi encontrada correlação significativa. Portanto, os dados foram estratificados considerando um grupo para fisionomias campestres e outro para fisionomias savânicas e florestais. Nas fisionomias campestres, foi considerado como combustível 94% da biomassa total e nas savânicas e florestais foi realizada a regressão para uma melhor estimativa.

Sequencialmente, foi ajustado o modelo linear. Escolhido, pois a distribuição dos dados, relacionando a biomassa obtida a partir de índice de vegetação e o valor do combustível, apresentou comportamento tendendo a uma reta. O modelo foi avaliado em função do gráfico de correlação dos dados, do erro padrão relativo ( $S_{yx\%}$ ), do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e da distribuição dos resíduos, calculado a partir da diferença entre a biomassa real e estimada (MIGUEL et al., 2015). A partir do modelo ajustado, foi gerado um mapa de superfície de combustível para a Fazenda Água Limpa.

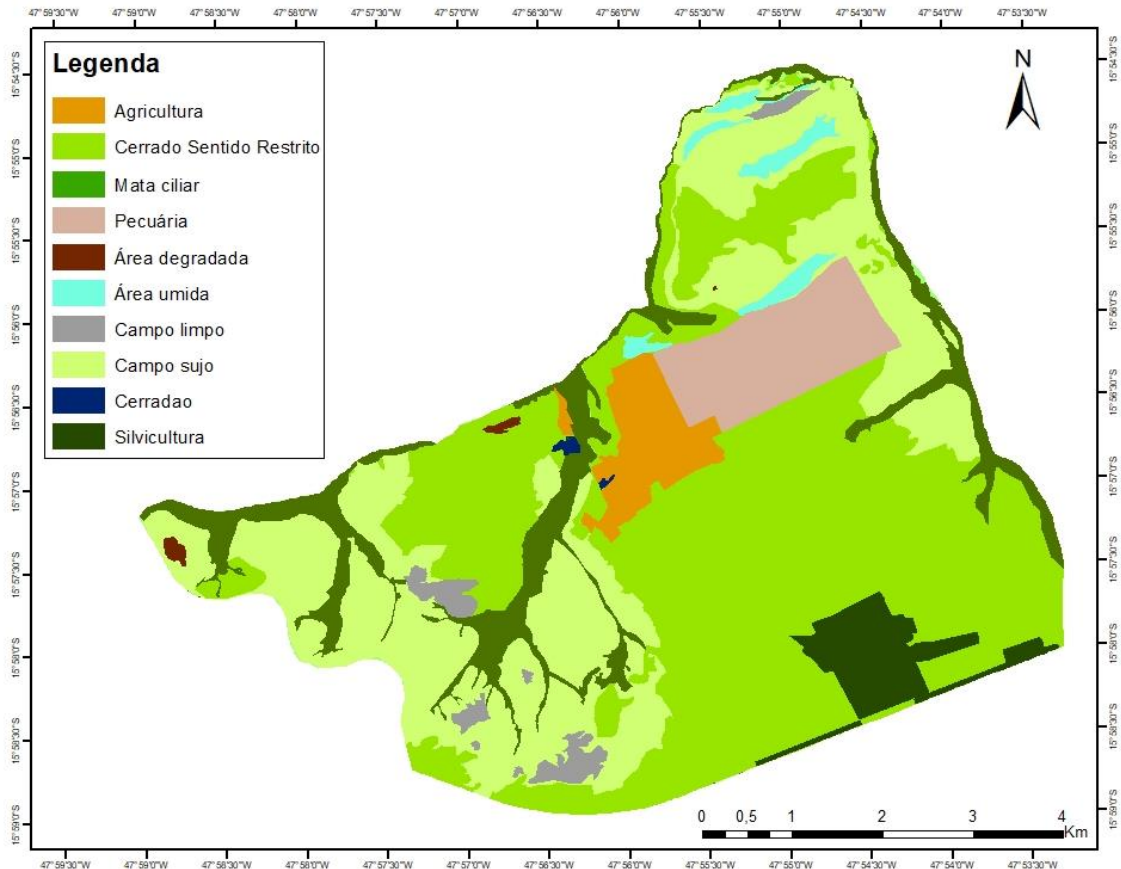
## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Uso e Cobertura do solo**

A classificação visual apresentou boa precisão no estudo e viável para regiões com diversos usos em áreas com pequena extensão (PAIVA et al., 2010; HALADOVÁ; PETROVIČ, 2015). A acurácia estimada na análise se deve à alta qualidade das imagens com resolução espacial de 50 x 50 centímetros por pixel (PANIZZA; FONSECA, 2011). Mas é necessário ressaltar que a metodologia foi utilizada, porque a área de estudo não é extensa, possuindo aproximadamente 4233 hectares (Figura 6). Em áreas maiores, a realização dessa classificação poderia ser limitada pelo tempo necessário para esse tipo de estudo.

A forma mais disseminada de classificar o uso do solo é por meio de classificações computacionais que são fáceis e rápidas de serem geradas (REJAUR; SAHA, 2008;

KATERJI et al., 2016; SHISHIR; TSUYUZAKI, 2018). Entretanto, existem estudos que requerem detalhamentos específicos de uso da terra. Para esse tipo de estudo é recomendada a utilização de imagens de alta resolução e uma classificação mais detalhada, sendo, no geral, realizada visualmente (PANIZZA; FONSECA, 2011; HALADOVÁ; PETROVIČ, 2015). Para o mapa de uso da FAL foram definidas e aplicadas dez classes de uso distintas, sendo seis fitofisionomias do Cerrado e quatro classes de uso antrópico.



**Figura 6.** Uso e cobertura da terra na Fazenda Água Limpa.

A fitofisionomia predominante na FAL é o cerrado sentido restrito, ocupando 45,6% de toda a fazenda (Tabela 3). Estudos na mesma área de cerrado sentido restrito mostram uma riqueza variando entre 57 e 65 espécies lenhosas, tendo como principais espécies a *Qualea parviflora*, *Polyouratea hexasperma*, *Caryocar brasiliense*, *Tachigali vulgaris* e *Sclerolobium paniculatum* (MEDEIROS et al., 2007; ALMEIDA et al., 2014b), o que mostra a importância na preservação dessa fitofisionomia.. Felfili *et al.* (1992), em um estudo na mesma área, também verificou o Cerrado sentido restrito como a fisionomia predominante, mostrando uma preservação das características da área após mais de 25 anos.

A fitofisionomia florestal com maior área de cobertura é a mata de galeria (393,94 ha), fisionomia que possui como característica principal o margeamento contínuo de corpos d'água. Portanto, é de grande importância para a proteção de rios, evitando assoreamento e lixiviação (SANO et al., 2008; MATOS et al., 2017). Na FAL, sua importância se deve às várias nascentes que brotam dentro da área e necessitam de preservação, além de proporcionar recursos hídricos para áreas de plantios agrícolas.

Outra fitofisionomia florestal encontrada foi o cerradão, o qual ocupa uma área de 5,85 há e se caracteriza por apresentar dossel praticamente fechado com árvores medindo até 15 m de altura (RIBEIRO; WALTER, 2008). O cerradão foi muito impactado pela agricultura e pecuária e, por isso, ocorre apenas em pequenas manchas no DF, tendo sido muito desmatado (GOMES et al., 2004). Sua preservação é extremamente importante por apresentar um dos maiores potenciais de estoque de biomassa em relação às formações savânicas do Cerrado (MIGUEL et al., 2017a).

Na fazenda Água Limpa, também foi encontrado campo de murundus, ocupando 1,5% da área. Essa fisionomia é caracterizada por ser uma área plana e suscetível a inundações sazonais ou permanentes (PINTO et al., 2014). Porém, ela deve ser observada pelo potencial de armazenamento de recursos hídricos que possui e pela crescente demanda hídrica (LIMA; SILVA, 2008).

As formações campestres representaram 30% da cobertura da FAL e nelas foram encontrados campo sujo e campo limpo. O campo sujo é composto por espécies herbáceo-arbustivas com arbustos e subarbustos espalhados entre si (GIÁCOMO et al., 2013). Já o campo limpo é composto em sua grande maioria por espécies herbáceas, onde praticamente não há presença de arbustos e árvores (RIBEIRO; WALTER, 2008; GOMES et al., 2018a). Essas áreas são extremamente sensíveis a incêndios e, por isso, requerem maior cuidado de controle e prevenção do fogo (PINHEIRO; DURIGAN, 2009; MASSI et al., 2017).

**Tabela 3.** Área total do uso e cobertura da terra na Fazenda Água Limpa (UnB).

<b>Classes de uso e cobertura da terra</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Cerradão	5,34	0,10
Área degradada	9,42	0,20
Área úmida (campos de murundus)	62,48	1,50
Campo limpo	71,29	1,70

Agricultura	154,46	3,60
Silvicultura	153,54	3,60
Pecuária	256,00	6,00
Mata de galeria	393,94	9,30
Campo sujo	1195,97	28,30
Cerrado Sentido Restrito	1929,65	45,60
<b>Total</b>	<b>4232,92</b>	<b>100,0</b>

Apesar da crescente exploração do Cerrado no Brasil, a FAL tem grande parte de sua extensão conservada, sendo 86,4% coberta por fitofisionomias do Cerrado. Essa significativa área se deve à presença, em seu interior, da Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Capetinga e da ARIE Taquara (FELFILI et al., 1992), que são áreas destinadas à conservação de espécies.

Além da preservação, a FAL é um órgão complementar da UnB que tem como função gerar a prática de ensino, pesquisa e extensão para professores, graduandos e pós-graduandos. Assim, a fazenda possui 13,6% do território destinados aos estudos em agricultura, pecuária e silvicultura, que são os principais usos antrópicos encontrados na fazenda. Os cursos de engenharia florestal, biologia (ecologia, botânica, zoologia, fisiologia), agronomia, fitologia e zootecnia são as unidades acadêmicas que mais utilizam a fazenda, com 153,5 ha destinados para a silvicultura e 410,5 ha para a agropecuária.

#### **4.2. Estimativa de biomassa e combustível por estéreo fotografias**

Das seis fitofisionomias encontradas na FAL, foram estimadas a biomassa aérea e o combustível para quatro fisionomias seguindo a metodologia proposta por Ottmar *et al.* (2001) (Tabela 4). O cerradão e o cerrado sentido restrito apresentaram as maiores quantidades de biomassa quando comparados com as formações campestres. Essa expressividade de biomassa é devido às fisionomias serem compostas por vegetação lenhosa e não apenas por herbáceas (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Valores semelhantes foram encontrados por Miguel *et al.* (2015) em áreas de cerradão (61,35 Mg.ha<sup>-1</sup>) e valores superiores foram encontrados por Castro e Kauffman (1998) em áreas de cerrado sentido restrito (46,5 Mg.ha<sup>-1</sup>). Essa superioridade pode estar atrelada diretamente à amostragem, pois as fitofisionomias variam significativamente em relação ao tipo de solo, fertilidade, umidade e temperatura, variáveis estas que se diferenciam drasticamente em um curto espaço (LEHMANN et al., 2014). Mota (2017)



encontrou 30,38 Mg.ha<sup>-1</sup> de biomassa para cerrado sentido restrito na mesma área de estudo, quantidade semelhante ao encontrado na presente pesquisa.

Quando avaliada a biomassa total da fazenda, o campo sujo e o cerrado sentido restrito foram as fitofisionomias que apresentaram os maiores valores de biomassa, tendo em média 98 vezes mais biomassa que o campo limpo e o cerradão. Essa representatividade se deve à grande extensão de área que essas fisionomias cobrem, representando, aproximadamente, 74% da FAL.

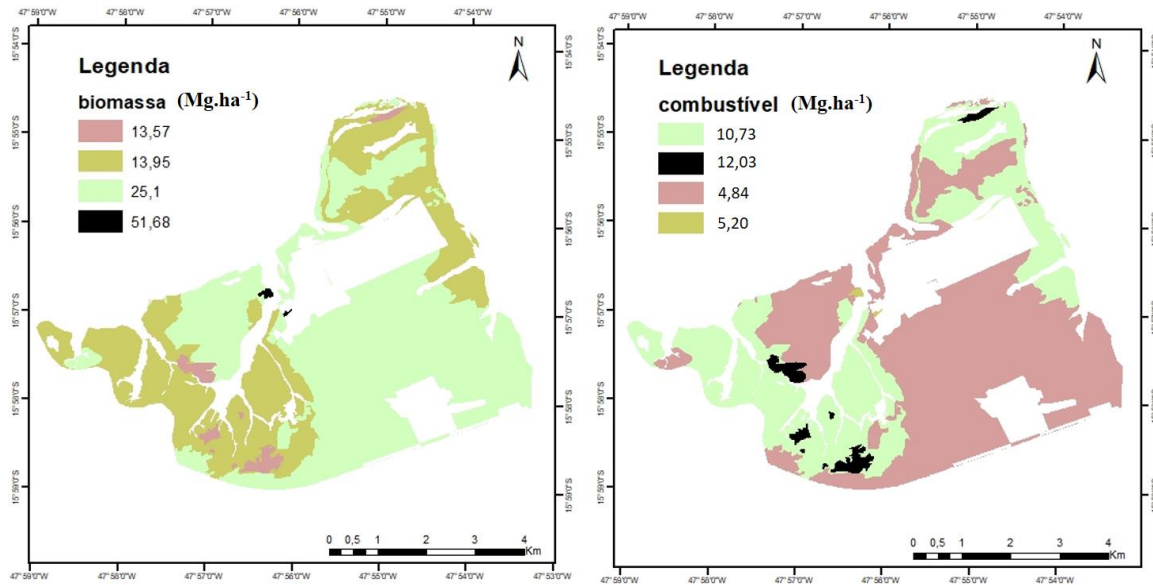
**Tabela 4.** Quantificação da biomassa aérea e do combustível pelo método de estereofotografias para fitofisionomias do Cerrado na área da Fazenda Água Limpa.

	Área (ha)	Biomassa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Biomassa total (Mg)	Combustível (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Combustível total (Mg)
<i>cerradão</i>	5,34	51,68	276,18	5,20	27,80
<i>campo limpo</i>	71,29	13,57	967,36	12,03	857,64
<i>campo sujo</i>	1195,97	13,95	16677,75	10,73	12836,31
<i>cerrado sentido restrito</i>	1929,65	25,10	48430,24	4,84	9341,59
<b>Total</b>	3202,24	104,29	66351,54	32,81	23063,33

Em relação ao combustível, as formações campestres apresentaram quantidades superiores aos do cerradão e do cerrado sentido restrito. O combustível do campo sujo representou em média 76,9% da biomassa total e o do campo limpo representou 88,7% (Figura 7). Para o cerradão e para o cerrado sentido restrito, os valores foram bem inferiores, sendo 10,1% e 19,3%, respectivamente. Isso se deve a diferença entre as formações campestres e florestais, justificadas pela variação da estrutura dos diferentes tipos de vegetação. As formações campestres apresentam vegetações mais espaçadas com abundância de gramíneas. Material este que é altamente inflável devido a sua baixa umidade (HOFFMANN; SOLBRIG, 2003; HOFFMANN et al., 2012) e representa grande parte da equação de estimativa de combustível em que considera somente os materiais que entraria em ignição caso houvesse fogo, sendo eles, as herbáceas, o material lenhoso e as folhas das arbóreas.

No geral, a carga de combustível equivale à biomassa total disponível para a queima. Entretanto, os incêndios não necessariamente queimam toda a biomassa em pé (VAN LEEUWEN et al., 2014). As cargas de combustível do Cerrado consistem principalmente em combustíveis de superfície, como estrato rasteiro e detritos lenhosos (MIRANDA et al., 2010). A maior parte do combustível consumido em incêndios vem da camada herbácea, pois, no geral, o fogo é de superfície com chamas variando entre 1,2

e 2,9 metros de altura (CASTRO; KAUFFMAN, 1998) em que cerca de 90% do combustível é consumido durante queimas em formações abertas (MIRANDA et al., 2010). Portanto, as fisionomias que apresentam grande carga de combustível rasteiro, como o caso de campos e cerrado sentido restrito, necessitam de um maior controle e prevenção para focos de incêndios.



**Figura 7.** Biomassa e de combustível quantificado pelo método de Estéreo-Fotografias na Fazenda Água Limpa.

As áreas com maior carga de combustível, na FAL (Figura 7), são as que apresentaram coloração verde e preta, classificadas como fisionomias campestres. As características dos incêndios são definidas não apenas pela quantidade de combustível, como também pelo clima, topografia e ações antrópicas. Portanto, juntamente com as variáveis ambientais, as atividades humanas possuem grande influência nas características, na distribuição e na periodicidade da ocorrência de incêndios florestais (CHANG et al., 2015).

Torres *et al.* (2017), em um mapeamento de risco de incêndios florestais, verificaram que o número de ocorrência de incêndio diminui conforme se afasta de áreas urbanas e volta a aumentar conforme se aproxima, mostrando assim a influência antrópica em relação ao início de focos de fogo. Zumbrunnen *et al.* (2011) verificaram que os focos de incêndio não possuem relação linear com o aumento da população, exceto se o aumento da população ocorre em áreas menos habitadas, como o caso da FAL. Sendo assim, áreas naturais que fazem fronteiras com setores urbanos ou estradas estão mais susceptíveis a incêndios florestais.

As áreas que estão ao sul da fazenda são cobertas por cerrado sentido restrito, fisionomia que, apesar de não possuir os maiores valores de combustível por hectare, é caracterizada por ser aberta com grande quantidade de herbáceas, o que facilita a propagação do fogo. Além disso, essas áreas fazem fronteira com uma estrada, o que implica em maior risco de ocorrência de incêndios antrópicos.

Com base nas informações da quantificação de combustível e na variação da proximidade antrópica é possível definir zonas para construção de aceiros, para localização de brigada e, conseqüentemente, para prevenção e combate de incêndios florestais na fazenda.

### **4.3. Quantificação da biomassa por parcela amostrada**

Com base nos dados do inventário florestal e da estéreo-fotografia, o total de biomassa acima do solo para a vegetação variou de 3,78 Mg.ha<sup>-1</sup> a 67,47 Mg.ha<sup>-1</sup> (Tabela 5). A amplitude dos resultados se deve a quantificação ter sido realizada em formações campestres e savânicas, que são áreas que se diferem significativamente. As campestres são áreas mais abertas, caracterizadas pela densidade de arbustos e subarbustos e as savânicas pela densidade de estrato arbustivo-arbóreo (RIBEIRO; WALTER, 2008). Assim, áreas que apresentam indivíduos lenhosos, juntamente com arbustos, tendem a ter maior quantidade de biomassa.

As parcelas com maiores valores de biomassa foram as de cerrado denso (67,47 Mg.ha<sup>-1</sup>) e as de cerrado sentido restrito (47,12 Mg.ha<sup>-1</sup>). As que apresentaram menor biomassa foram de campo limpo (3,78 Mg.ha<sup>-1</sup>) e de campo sujo (6,68 Mg.ha<sup>-1</sup>). Valores semelhantes para formações savânicas foram encontrados por Castro e Kauffman (1998), em que a biomassa total do cerrado denso foi 52,9 Mg.ha<sup>-1</sup> e de cerrado sentido restrito 46,5 Mg.ha<sup>-1</sup>. Em relação a literatura encontrada para a biomassa de formações campestres, o valor encontrado por Miranda et al. (2014) foi 6,70 Mg.ha<sup>-1</sup>, o que ficou próximo do valor 6,34 Mg.ha<sup>-1</sup> encontrado no presente estudo. A média da biomassa das fitofisionomias foi de 27,37 Mg.ha<sup>-1</sup>, com desvio padrão de 14,51 Mg.ha<sup>-1</sup>. Esse alto valor se deve a vasta variação de fitofisionomias amostradas.

**Tabela 5.** Biomassa total estimada por parcela em Mg.ha<sup>-1</sup> para a vegetação da área da Fazenda Água Limpa e do IBGE com base em dados do inventário de campo e dados do livro de estéreo-fotografia.

<b>Amostras</b>	<b>Parcelas</b>	<b>Biomassa (Mg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fitofisionomia</b>
<i>1</i>	CD03	67,47	Cerrado Denso
<i>2</i>	F11	47,12	Cerrado Sentido Restrito
<i>3</i>	F12	39,60	Cerrado Sentido Restrito
<i>4</i>	F07	39,10	Cerrado Sentido Restrito
<i>5</i>	F09	37,40	Cerrado Sentido Restrito
<i>6</i>	CD02	35,88	Cerrado Denso
<i>7</i>	F01	33,39	Cerrado Sentido Restrito
<i>8</i>	CSS03	33,38	Cerrado Sentido Restrito
<i>9</i>	F10	30,87	Cerrado Sentido Restrito
<i>10</i>	F08	30,69	Cerrado Sentido Restrito
<i>11</i>	CD01	29,90	Cerrado Denso
<i>12</i>	F03	29,43	Cerrado Sentido Restrito
<i>13</i>	F02	28,63	Cerrado Sentido Restrito
<i>14</i>	F04	27,62	Cerrado Sentido Restrito
<i>15</i>	F06	27,56	Cerrado Sentido Restrito
<i>16</i>	F05	26,42	Cerrado Sentido Restrito
<i>17</i>	CSS01	20,90	Cerrado Sentido Restrito
<i>18</i>	CS07	15,77	Campo Sujo
<i>19</i>	CR03	15,42	Cerrado Ralo
<i>20</i>	CL06	15,02	Campo Limpo
<i>21</i>	CS04	11,07	Campo Sujo
<i>22</i>	CS01	6,68	Campo Sujo
<i>23</i>	CL02	3,85	Campo Limpo
<i>24</i>	CL01	3,78	Campo Limpo
	<b>Média</b>	27,37	
	<b>DP</b>	14,51	
	<b>CV (%)</b>	53,01	

#### 4.4. Correlação entre os Índices e as imagens de diferentes satélites

Todos os índices, da imagem Landsat 5 TM e *RapidEye*, apresentaram correlação forte e positiva em relação à biomassa, com valores superiores a  $R > 0,70$ . A forte correlação encontrada entre os dados pode ter ocorrido devido à variação de fitofisionomias amostradas, pois os índices apresentam resposta espectral distinta para diferentes objetos (SOUSA JUNIOR et al., 2008; XIE et al., 2018). Assim, quanto maior a diferença na paisagem, maior será a variação na resposta espectral, conseguindo captar com maior variação as distintas fisionomias.

Para a imagem do satélite *Landsat 5 TM*, os índices com maior correlação foram o EVI (0,77) e o NDVI (0,76). Valores semelhantes foram encontrados por Viana *et al.* (2009), que relacionaram biomassa com o NDVI e encontraram correlação  $R = 0,72$  utilizando imagens do satélite *Landsat 5 TM*. Estudos anteriores apresentam correlação forte entre o EVI e o NDVI com variáveis climáticas, ambientais e topográficas (ZANZARINI et al., 2013; MIGUEL et al., 2015; ALVARADO et al., 2017; XU et al., 2017).

Os índices que apresentaram maior correlação utilizando imagens do *RapidEye* foi o  $CI_{red-edge}$  com 0,84 e o NDRE com 0,82. Portanto, as correlações entre a biomassa e os índices do *RapidEye* foram superiores em relação ao *Landsat 5 TM* (Tabela 6). Essa maior correlação gerada pelo *RapidEye* pode ser explicada por esse satélite possuir melhor resolução espacial, além de ter uma banda na borda da região do vermelho (*red-edge*), que propicia aperfeiçoar a diferenciação de objetos (COSTA et al., 2016).

Em estudos semelhantes, Antunes e Siqueira (2013) observaram que a banda na borda da região do vermelho representa melhor a variação, tanto no conteúdo da clorofila, quanto na estrutura, contribuindo, assim, na diferenciação de classes de vegetação. Silva & Sano (2016) estimaram alta correlação entre a *red-edge* e a banda do vermelho que é usada na diferenciação entre área com e sem vegetação. Assim, a junção dessas bandas em um índice gerou uma maior precisão na estimativa, como demonstrado nas correlações obtidas nesta pesquisa.

Diversos estudos realizados em outras pesquisas relacionando índice de vegetação com parâmetros florestais encontraram correlações variando de regular a forte, com valores entre  $R = 0,5$  e  $R = 0,8$  (PONZONI; REZENDE, 2004; LU et al., 2005; WATZLAWICK et al., 2009; BOLFE et al., 2012; MIRELES et al., 2017; PHUA et al., 2017), valores esses que condizem com o encontrado neste trabalho.

**Tabela 6.** Correlação entre os índices de vegetação e a biomassa da vegetação total da área da Fazenda Água Limpa e do IBGE. Acima da diagonal encontram-se as correlações entre os índices derivados da imagem do RapidEye e abaixo da diagonal entre os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM.

		RapidEye						
		<i>Biomassa</i>	<i>CI<sub>green</sub></i>	<i>CI<sub>red-edge</sub></i>	<i>NDRE</i>	<i>EVI</i>	<i>NDVI</i>	<i>SAVI</i>
<i>Landsat</i>	Biomassa	1	0,77	0,84	0,82	0,81	0,80	0,80
	EVI LS	0,77	0,85	0,87	0,86	0,86*	0,85	0,85
	NDVI LS	0,76	0,85	0,87	0,87	0,86	0,85*	0,85
	SAVI LS	0,71	0,86	0,86	0,86	0,87	0,86	0,86*

(\*) Significativos a 5% de significância.

Todos os índices apresentaram correlação significativa com 95% de probabilidade entre si. Os índices (EVI, NDVI e SAVI) gerados pelo satélite *Landsat* e pelo *RapidEye* apresentaram alta correlação entre si, sendo 0,85 o menor valor encontrado. A forte correlação entre os índices de diferentes satélites e diferentes anos pode ser explicada pela semelhança da resposta espectral em diferentes alvos. Um fator que interfere muito na resposta espectral de objetos é a sazonalidade (GURGEL et al., 2001; ALVARADO et al., 2017). Visto isso, as imagens foram obtidas todas no período da seca para evitar resposta distintas relacionadas a sazonalidade, além de conseguir uma estimativa mais precisa do período crítico para queimadas.

#### 4.5. Estimativa de biomassa a partir do satélite Landsat 5 TM

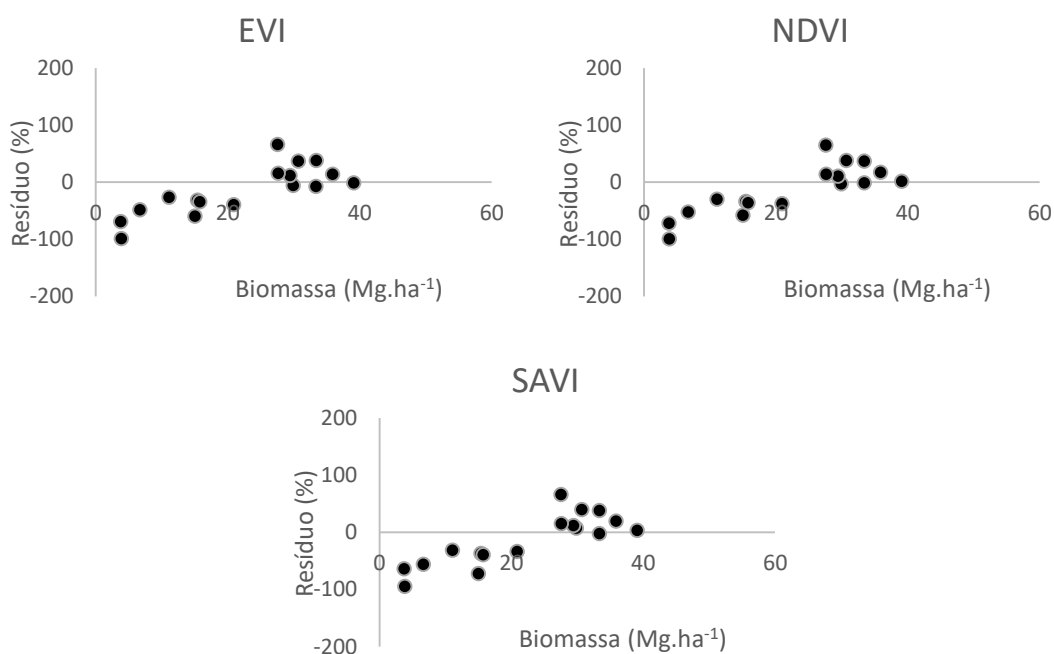
Os estimadores dos três modelos obtidos para a imagem do satélite *Landsat 5 TM* foram significativos a uma probabilidade de 95%. Todos os índices apresentaram boa medida de precisão com considerável erro-padrão da média, variando entre 51,1% e 53,49% (Tabela 7). Muukkonen e Heiskanen (2005), na Finlândia, encontraram erro-padrão relativo de 43% no modelo de regressão para estimar a biomassa em uma floresta boreal, e Watzlawick, Kirchner e Sanquetta (2009) em ajuste de regressão para estimativa de biomassa encontraram erro padrão de até 61,55%.

Em um outro estudo, Miguel *et al.* (2015) encontraram erro de 16,8% na estimativa de biomassa para vegetação de cerrado. Esse valor distinto pode ser atribuído ao fato de que os autores dessa pesquisa utilizaram além dos índices de vegetação, a área basal para estimar a biomassa, ou seja, o baixo valor do erro pode ter sido influenciado pela variável área basal, gerando uma melhor estimativa. No presente estudo, a biomassa é estimada apenas por índices de vegetação para que seja viável a extrapolação do modelo para áreas maiores e de difícil acesso.

**Tabela 7.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, erro absoluto ( $S_{yx}$ ), erro relativo ( $S_{yx}$  (%)) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM. \*Significativos a 5% de significância.

	<b>EVI</b>	<b>NDVI</b>	<b>SAVI</b>
$\beta_1$	51,75*	56,45*	57,47*
$S_{yx}$	12,68	12,95	13,28
$S_{yx}$ (%)	51,1	52,16	53,49
$R^2$	0,77	0,76	0,75

Os modelos também foram analisados quanto a sua distribuição residual (Figura 8). A partir dos gráficos de resíduos gerados, pôde-se observar que os erros não foram independentes, ou seja, estes apresentaram um padrão de distribuição em todos os índices gerados, superestimando o volume de biomassa até 30  $Mg.ha^{-1}$  e subestimando os valores com volume superior a 30  $Mg.ha^{-1}$ .



**Figura 8.** Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM.

A partir dos gráficos de resíduos, do  $S_{yx}$  (%) e do  $R^2$  o EVI foi escolhido como o melhor estimador de biomassa para imagens do Landsat 5 TM. Esse índice possivelmente foi o melhor estimador devido ao fato de ser mais sensível a variação da estrutura da vegetação em comparação aos demais, sendo apropriado para medir a variação da densidade das florestais (HUETE et al., 2002). Portanto, sua utilização vem para compensar as limitações do NDVI, índice mais sensível a variação de clorofila, já que o

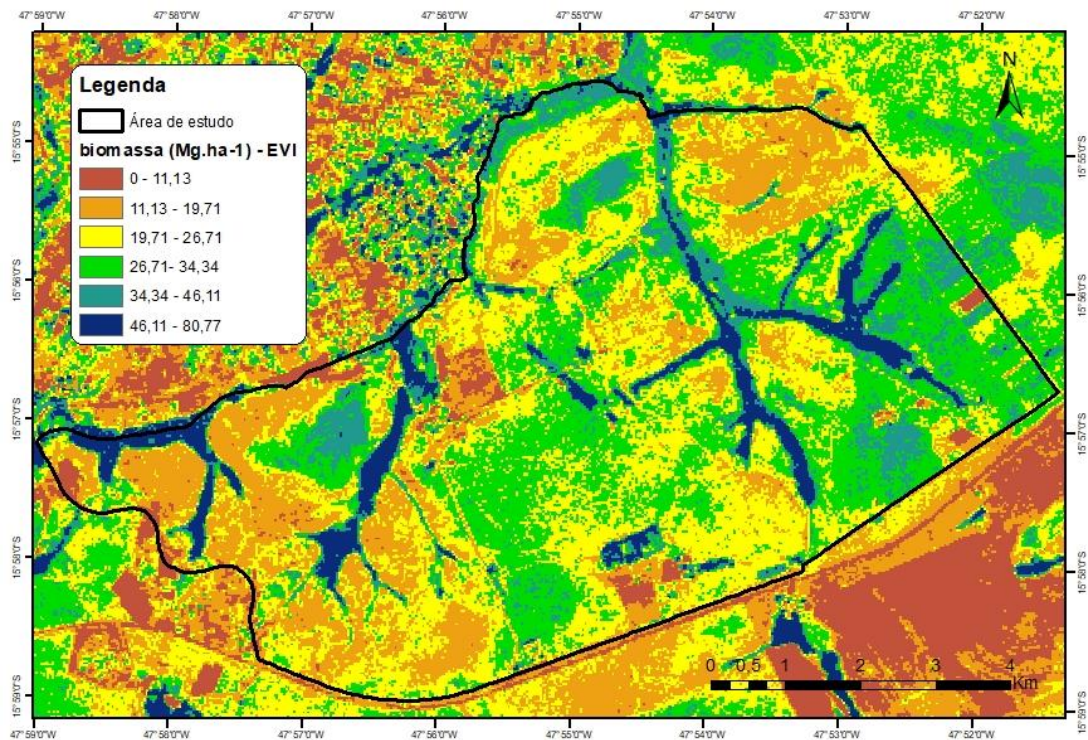
EVI é mais sensível à variação da estrutura do dossel e menos susceptível à interferência atmosférica (HUETE, 1997; ALVARADO et al., 2017). A partir dele foi gerado a superfície de biomassa para a área de estudo (Figura 3.5) utilizando a equação abaixo:

$$B = 51,75 * EVI \quad (7)$$

B = Biomassa total (t/ha);

EVI = Valor do pixel do Índice de Vegetação Melhorado.

O mapa de biomassa apresentou valores variando de 0 Mg.ha<sup>-1</sup> a 80,77 Mg.ha<sup>-1</sup>, sendo dividido em 6 classes (Figura 9). De acordo com o mapa de classificação supracitado no capítulo anterior, foi possível distinguir as fitofisionomias e classificá-las quanto à cor. As cores vermelhas e laranjadas representam as fisionomias campestres, com valores de biomassa variando até 19,71 Mg.ha<sup>-1</sup>. O amarelo apresentou, em alguns pontos, áreas campestres, mas em sua maioria representa fisionomias savânicas. Além disso, os tons de azul representam as formações florestais com biomassa de até 80,77 Mg.ha<sup>-1</sup>, como fica bastante claro e perceptível as matas de galeria ao redor dos cursos d'água.



**Figura 9.** Distribuição da biomassa total na Fazenda Água Limpa e no Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado a partir do índice de vegetação melhorado (Enhanced Vegetation Index) derivado da imagem do satélite Landsat 5 TM.



#### 4.6. Estimativa de biomassa a partir do satélite RapidEye

Os índices estimados a partir do satélite *RapidEye* apresentaram estatística de ajuste e precisão melhores que as do *Landsat 5 TM*, com erro-padrão médio de 33,8%. Todos os estimadores foram significativos a uma probabilidade de 95% e apresentaram forte coeficiente de determinação, variando entre 0,85 e 0,87 (Tabela 8).

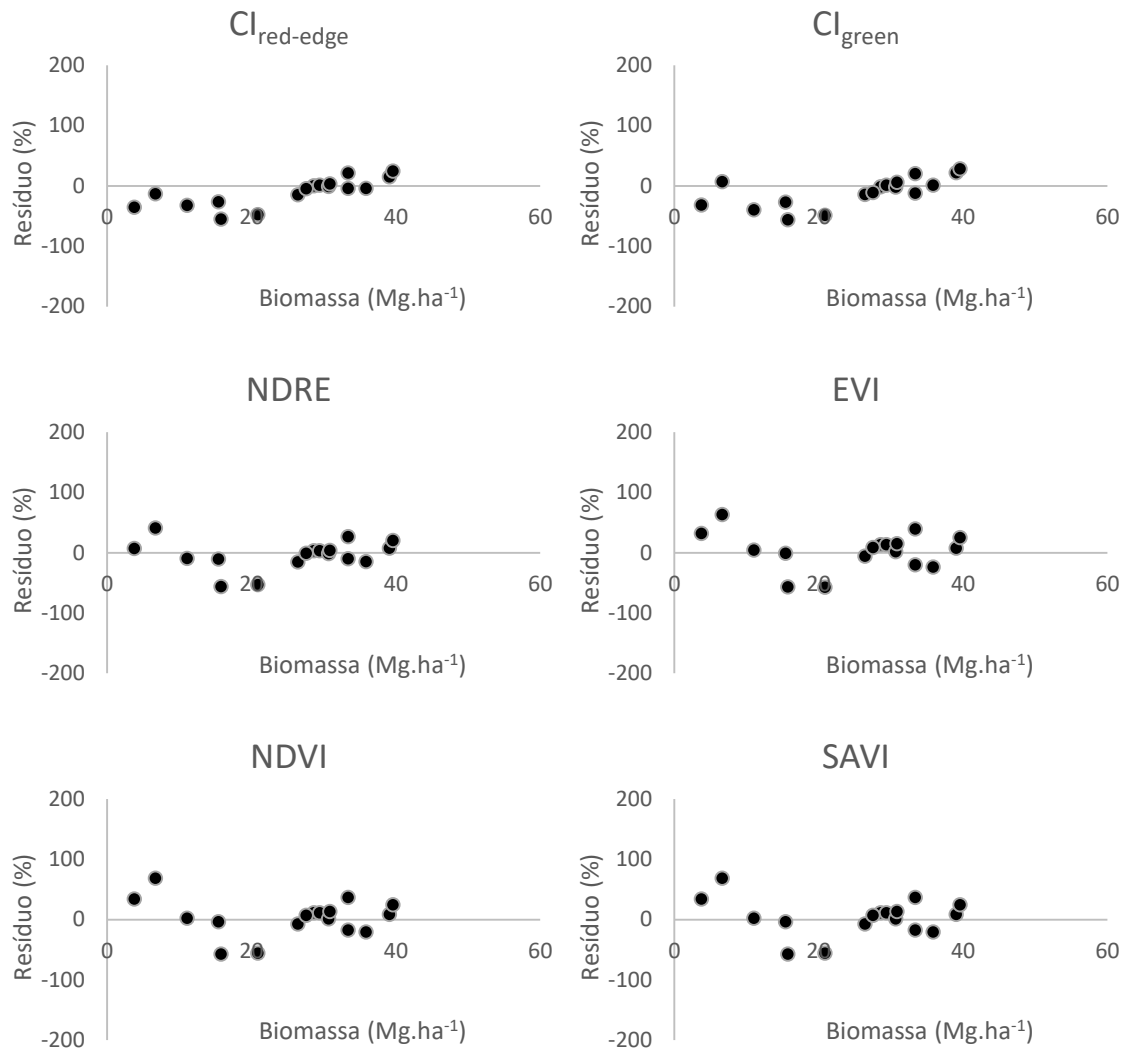
**Tabela 8.** Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, erro absoluto ( $S_{yx}$ ), erro relativo ( $S_{yx}$  (%)) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os índices derivados da imagem do satélite RapidEye. \*Significativos a 5% de significância.

	$CI_{red-edge}$	$CI_{green}$	NDRE	EVI	NDVI	SAVI
$\beta_1$	51,99*	31,08*	251,01*	101,99*	164,29*	109,54*
$S_{yx}$	9,15	9,84	8,37	9,32	9,60	9,60
$S_{yx}$ (%)	33,19	35,69	30,39	33,80	34,83	34,83
$R^2$	0,86	0,85	0,87	0,86	0,85	0,85

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) do ajuste dos índices derivados da imagem do satélite *RapidEye* foram superiores aos derivados da imagem do satélite *Landsat 5 TM*, fator que pode estar atrelado à resolução espacial do satélite, visto que o *RapidEye* possui resolução de 5 metros por pixel (MASSETTI et al., 2016; LI et al., 2017; XU et al., 2017). Essa boa resolução proporciona uma diferenciação mais precisa das fitofisionomias, o que facilita a diferenciação delas e corrobora para um coeficiente de determinação mais elevado.

Mesmo que as estatísticas de ajuste sejam boas, é necessário avaliar a distribuição do gráfico de resíduos para a escolha do modelo, tendo em vista que os erros de tendência podem ocorrer e não serem detectados pelas demais variáveis estatísticas (MIGUEL et al., 2015). A análise da distribuição residual para os modelos gerados pelo satélite *RapidEye* apresentaram distribuição não tendenciosa. Portanto, os erros não apresentam autocorrelação e são independentes (Figura 10).

A grande variação de erros observados nos gráficos de resíduos deve estar atrelada à variação temporal entre os dados, uma vez que foram utilizados dados de 2000 e 2014 e entre este período a área de estudo sofreu um grande incêndio ocorrido em 2012. Miranda (2013) verificou variação anual de biomassa, no Cerrado, de cerca de 0,073 Mg.ha<sup>-1</sup> ao ano, entretanto, esses valores variam de acordo com a frequência de fogo e a sazonalidade das regiões. Assim, a variação de erro deve estar atrelada a esse acontecimento.



**Figura 10.** Distribuição residual do modelo ajustado para obtenção de biomassa a partir dos índices derivados da imagem do satélite Landsat 5 TM.

O NDRE foi o índice para a imagens do *RapidEye* que apresentou o melhor gráfico de resíduos, o menor Syx (%) e o maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Assim, o melhor modelo para estimativa da biomassa foi obtido pela equação abaixo:

$$B = 251,01 * NDRE \quad (8)$$

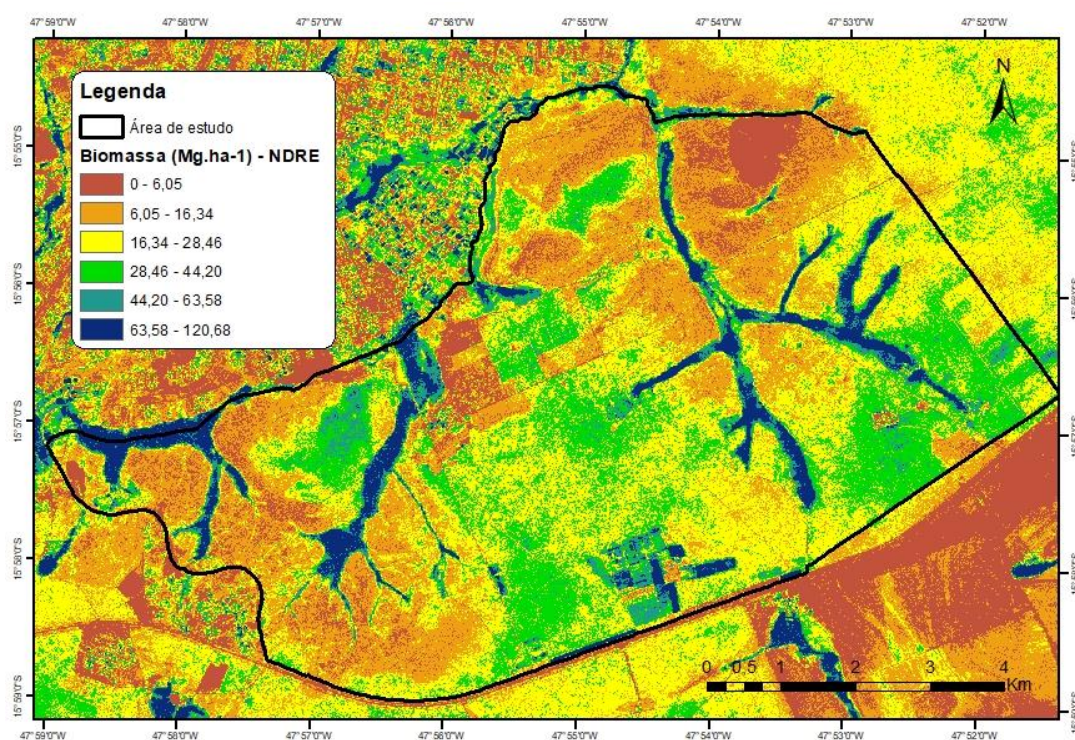
B = Biomassa total ( $Mg.ha^{-1}$ );

NDRE = Valor do pixel do índice de vegetação da diferença normalizada pelo *red-edge*.

Esse índice é a variação do NDVI para a inclusão da banda *red-edge* e para um aumento da sensibilidade à presença de clorofila (GITELSON; MERZLYAK, 1994). A forte relação do NDRE com a biomassa, pode ser explicada por a equação do índice ser

baseada na relação entre a banda *red-edge* e a banda do vermelho que é usada na diferenciação entre área com e sem vegetação, além da banda *red-edge* propiciar o aperfeiçoamento na diferenciação de objetos (COSTA et al., 2016).

A partir da equação, foi gerada a superfície de biomassa para a área da Fazenda Água Limpa (Figura 11). Os valores variaram de 0 Mg.ha<sup>-1</sup> a 120,68 Mg.ha<sup>-1</sup>, onde valores muito próximos de 0 Mg.ha<sup>-1</sup> representam áreas cobertas por água ou solo exposto. As fisionomias campestres são representadas pelas cores do vermelho e do laranja, as formações savânicas pelo amarelo e pelo verde e as formações florestais pelos azuis.



**Figura 11.** Distribuição da biomassa total na Fazenda Água Limpa e no Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, obtida a partir da aplicação do modelo ajustado pelo índice de diferença normaliza red-edge (normalized difference red edge index) derivado da imagem do satélite RapidEye.

Para formações florestais, Delitti e Burger (2000), em um estudo de mata de galeria, encontraram valor de biomassa área total de 133,3 Mg.ha<sup>-1</sup>, amostrado em São Paulo. Em formações savânicas, valores de biomassa total variaram de 2,03 Mg.ha<sup>-1</sup> (KAUFFMAN et al., 1994) a 58,87 Mg.ha<sup>-1</sup>(OTTMAR et al., 2001), com média de 24,56 Mg.ha<sup>-1</sup> (MIRANDA et al., 2014). Nas formações campestres, os valores ficaram entre de 1,09 Mg.ha<sup>-1</sup> (KAUFFMAN et al., 1994) e 15,60 Mg.ha<sup>-1</sup> (OTTMAR et al., 2001), valores esses que corroboram os dados estimados no mapa. Dessa forma, a precisão dos valores estimados pelo o NDRE condiz com os dados de campo realizados em outras pesquisas.

#### 4.7. Quantificação do combustível

Os valores médios de combustível, vivo e morto, nas parcelas variaram entre 5,9 Mg.ha<sup>-1</sup> e 11,7 Mg.ha<sup>-1</sup>, onde os maiores valores foram encontrados nas fisionomias campestres e os menores nas savânicas (Tabela 9). Considerou-se como combustível todo o material propenso a ignição caso houvesse um incêndio, sendo eles, o estrato rasteiro e os detritos lenhosos (MIRANDA et al., 2010). Isso porque, no Cerrado, a maioria do combustível consumido em uma queima vem da camada herbácea, visto que, o fogo se propaga, na maioria das vezes, na camada superficial com chamas variando entre 1,2 e 2,9 metros de altura (CASTRO; KAUFFMAN, 1998).

**Tabela 9.** Valores médios de combustível e biomassa coletados em campo.

<b>Fitofisionomias</b>	<b>Combustível (Mg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Biomassa (Mg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>C/B (%)*</b>
Cerrado Ralo	5,90	15,42	38,3
Campo Sujo	7,40	11,17	66,3
Cerrado Denso	7,43	44,42	16,7
Campo Limpo	7,51	7,55	99,4
Cerrado Típico	11,72	32,29	36,3

(\*) Onde, C/B é a razão entre o valor de combustível e a biomassa em porcentagem.

Dentre as pesquisas realizadas no Cerrado, o total de combustível encontrado variou de 3,6 Mg.ha<sup>-1</sup> a 14,5 Mg.ha<sup>-1</sup>, a depender da fisionomia avaliada e do período de proteção contra o fogo (WARD et al., 1992; KAUFFMAN et al., 1994; CASTRO; KAUFFMAN, 1998; MIRANDA et al., 2010), essa amplitude se deve a diversidade de fisionomias encontradas na savana brasileira (RIBEIRO; WALTER, 2008) e corrobora com a variação dos valores encontrado nesse estudo.

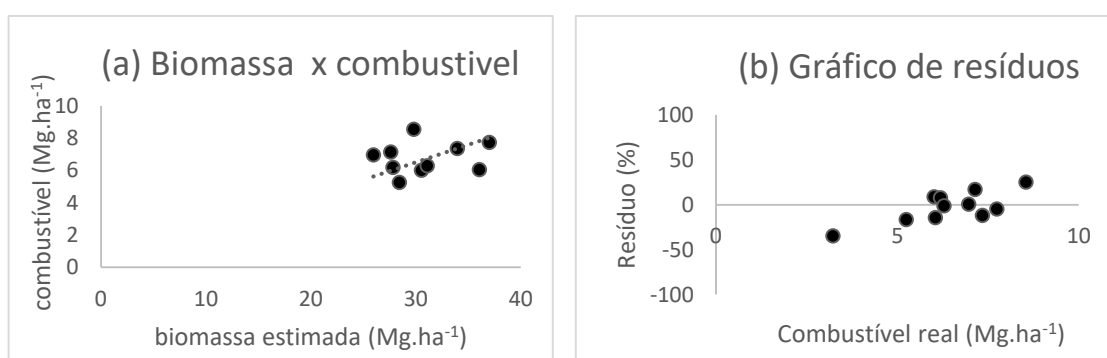
A porcentagem de combustível encontrada em fisionomias campestres foi superior à das fisionomias savânicas. Onde, 99,4% da biomassa do Campo Limpo foi composta por combustível e em Cerrado Denso esse valor representou 16,7%. Essa diferença se deve a maior abundância de gramíneas em fisionomias campestres. Alguns autores, apontam que a presença de gramíneas, nas savanas, é uma das principais causas de sua alta inflamabilidade, pois estas, produzem grande quantidade de combustível que se tornam altamente inflamáveis durante o período da seca (BEERLING; OSBORNE, 2006; HOFFMANN et al., 2012).

Essa característica gera atenção especial para estudos de ocorrência do fogo, onde áreas com maior quantidade de combustível necessitam de manejo direcionado. Já que, a taxa de recuperação pós fogo das gramíneas é mais alta que a das arbóreas e, por isso, a recorrência do fogo aumenta a expansão de gramíneas que reduzem a cobertura arbórea e aumenta a inflamabilidade de incêndios (BEERLING; OSBORNE, 2006).

#### 4.8. Equação de estimativa de combustível

A relação entre biomassa e combustível disponível para a queima apresentou baixa correlação. Essa baixa correlação foi oriunda da grande variação de combustível nas diferentes fisionomias, em que fisionomias campestres apresentaram, praticamente, todo o valor de biomassa como combustível e fisionomias savânicas apresentaram valores inferiores na relação biomassa aérea/combustível. Desta forma, foi necessário estratificar os dados para a geração de uma equação de predição de combustível. De forma que, os valores de combustível das formações savânicas fossem calculados separadamente dos valores de combustível das formações campestre.

Assim, para a quantificação do combustível de formações campestres foi utilizado a relação em que 94% da biomassa das formações campestres são compostas por combustível. Visto que, a maior representatividade de formação campestres são de gramíneas, material que produz grande quantidade de combustível e se tornam altamente inflamáveis durante o período da seca. A relação de combustível e biomassa, utilizando apenas dados de formações savânicas, apresentou relação linear (Figura 12), com alta correlação. A partir dela foi gerada uma regressão para estimar os dados de combustível das formações savânicas.



**Figura 12.** (a) Gráfico de correlação entre a biomassa e o combustível real e (b) gráfico de resíduos da carga de combustível estimada.

A equação gerada apresentou  $R^2 = 0,87$  e erro padrão de 18%. Poucos estudos foram realizados para estimativa de combustível, mas muitos foram realizados para

estimativa de biomassa de formações específicas. Analisando os melhores modelos matemáticos realizados para quantificação de biomassa no Cerrado, verifica-se que os melhores coeficiente de determinação variaram entre 0,85 a 0,96 com erro percentual entre 14% e 26% (REZENDE et al., 2006; RIBEIRO et al., 2011; ROITMAN et al., 2018). Os valores encontrados para estimativa de combustível estão dentro da margem dos valores encontrados nos melhores modelos matemáticos. Cabe ressaltar que esses valores estatísticos, obtidos em outros estudos, foram relacionados com variáveis de campo, o que torna a estimativa melhor, já nessa pesquisa os valores utilizados foram unicamente gerados por imagens de satélites.

Na geração da equação de estimativa de combustível no Cerrado, foi considerado como combustível das fitofisionomias campestres 94% da biomassa e para as fitofisionomias savânicas e florestais, a equação gerada pela regressão:

$$C_{sf} = x * 0,2167 \quad (9)$$

Onde,

$C_{sf}$  = Combustível das formações savânicas e florestais (Mg.ha<sup>-1</sup>);

$x$  = Valor da biomassa estimada a partir de índices de vegetação (Mg.ha<sup>-1</sup>).

Para a geração do mapa de superfície de combustível foi necessário desenvolver uma condicional em que calculasse de forma distinta o combustível das formações campestres em relação ao das demais fitofisionomias, tendo em vista que as formações campestres são constituídas, em suma maioria, por gramíneas. Estas, quando submetidas ao fogo queimam aproximadamente todo o seu total. Portanto a equação para o mapa de combustível seguiu a seguinte condicional:

$$MAPA = SE (Fc, (x * 0,94), (x * 0,2167)) \quad (10)$$

Onde,

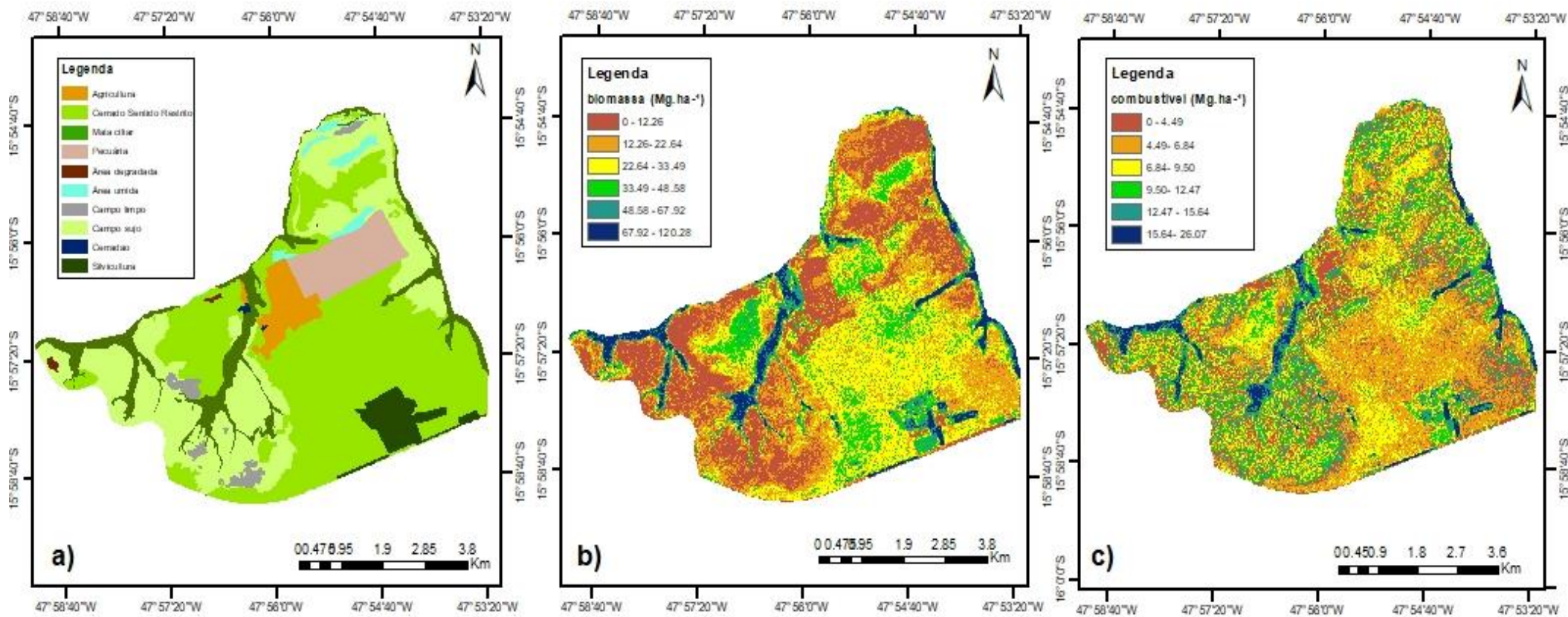
MAPA = Superfície de combustível a ser gerada;

SE = condicional lógica entre valores;

Fc = formações campestres;

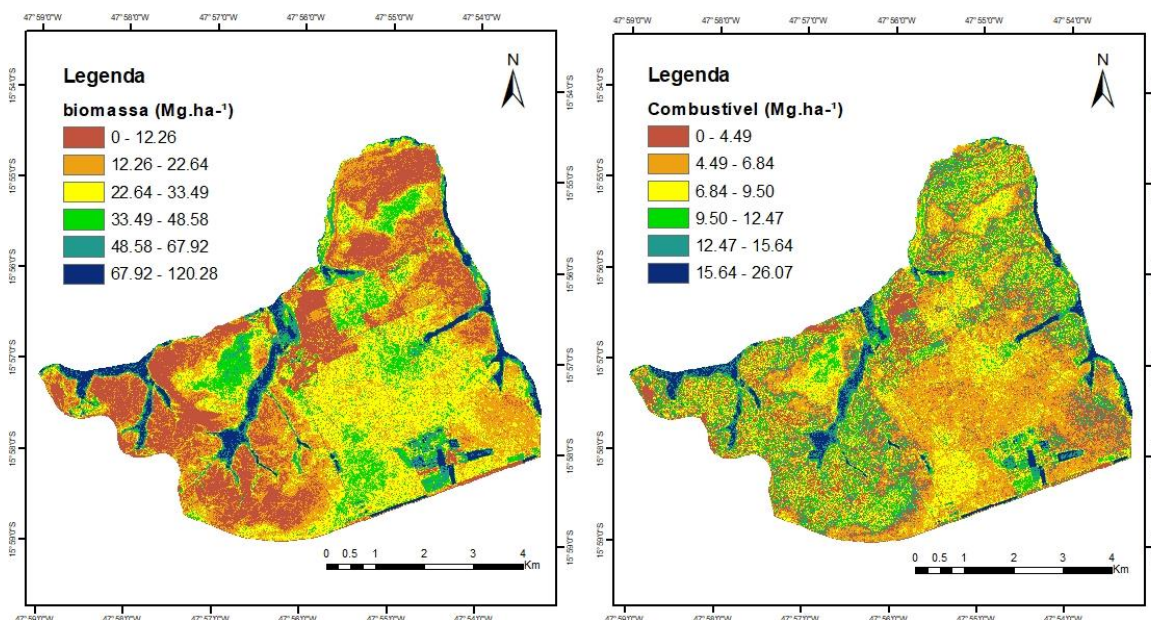
$x$  = Valor da biomassa estimada a partir de índices de vegetação (Mg.ha<sup>-1</sup>).

Na análise dos valores a serem aplicados na condicional foi necessário avaliar primeiramente o mapa de biomassa juntamente com o mapa de uso do solo (Figura 13), com isso foi possível distinguir quais áreas representavam as formações campestres.



**Figura 13.** Avaliações e classificação do a) mapa de uso do solo, b) mapa de biomassa aérea e c) mapa de combustível de uma área no Cerrado.

Depois dessa análise, foi aplicado o valor máximo de biomassa das fitofisionomias campestres na equação. Assim, foi avaliado que os valores de  $0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  a  $22,64 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  representavam a biomassa dos campos, portanto o  $F_c$  foi igual a  $F_c = x \leq 22,64 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Esses valores foram aplicados na equação para geração do mapa de superfície de combustível (Figura 14).



**Figura 14.** (A) Mapa de biomassa aérea e (B) mapa de combustível de uma área no Cerrado.

Os valores de combustível variaram entre  $0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $26,07 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , onde  $0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  representou áreas de solo exposto ou água e  $26,07 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  representou áreas de mata de galeria, caracterizada pela cobertura ao redor dos cursos d'água. Os elevados valores de combustível encontrados em formações florestais são oriundos do alto valor de biomassa encontrado nesse tipo de vegetação, onde chegou até  $120,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Essa relação foi construída por não haver amostras de valores de combustível de formações florestais, assim os dados dessas formações foram gerados somente pela relação biomassa/combustível.

Quando analisado o mapa de classificação do uso do solo, foi possível verificar que os menores valores de combustível foram encontrados nas formações savânicas, variando até  $9,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Ward *et al.* (1992) encontraram em formações savânicas combustível médio de  $8,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e Castro e Kauffman (1998) encontraram valor médio de  $11,0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , portanto, a equação estimou com precisão os valores de combustível em formações savânicas.



As formações campestres quando comparadas com as savânicas apresentaram valores de combustível superiores, variando entre 6,8 Mg.ha<sup>-1</sup> e 12,5 Mg.ha<sup>-1</sup>. Esse valor está relacionado a alta carga de material herbáceo encontrado nessas fitofisionomias. Estudos anteriores encontraram valores médios de até 7,8 Mg.ha<sup>-1</sup> em formações campestres (WARD et al., 1992; CASTRO; KAUFFMAN, 1998), a superioridade encontrada nesse estudo pode ser explicada pela variação do regime do fogo nos últimos anos. A taxa de recuperação das gramíneas é muito alta, portanto, conforme aumenta a frequência do fogo, aumenta a expansão de gramíneas que, conseqüentemente, aumenta a inflamabilidade de incêndios facilitando a propagação do fogo (HOFFMANN; FRANCO, 2003; HOFFMANN et al., 2012).

Os mapas de combustível podem auxiliar na definição de zonas de gerenciamento de incêndio e indicar a conectividade de áreas com alta carga de combustível (FRANKE et al., 2018). A conectividade de combustível é um dos principais fatores para dispersão do fogo, podendo sua descontinuidade atuar como aceiro para incêndios (COCHRANE; RYAN, 2009). Em algumas regiões, uma das principais estratégias utilizadas para reduzir o risco incêndio florestal é por meio do manejo do combustível (WHITEHEAD et al., 2008). A partir dos dados desta pesquisa, áreas prioritárias a serem protegidas podem ser identificadas, o que auxilia na determinação de locais para aceiros e queimas prescritas.

## 5. CONCLUSÃO

Os índices que melhor estimaram a biomassa aérea e o combustível de vegetação do Cerrado foram o EVI para imagens do satélite *Landsat 5 TM* e o NDRE para imagens do *RapidEye*. As estimativas geradas pelo *RapidEye* foram superiores ao do *Landsat 5 TM* devido a sua alta resolução espectral que proporcionou uma melhor diferenciação de objetos. Assim, os índices de vegetação, mesmo sem auxílio de outras variáveis, são capazes de estimar valores de biomassa aérea e de combustível disponível para queima.

Independentemente da heterogeneidade e da estrutura florística da vegetação, os índices de vegetação se mostraram eficazes para a estimativa de biomassa em áreas de Cerrado, com correlação superior a 70% em todos os índices testados. O índice que melhor explicou a biomassa aérea florestal foi o NDRE com  $R^2 = 0,87$  e erro padrão de 30%, o mesmo apresentou  $R^2 = 0,87$  e erro padrão de 18% para estimativa de combustível. Mostrando que, para áreas de difícil acesso, ou em caso de inviabilidade na estimativa de

biomassa e combustível por método direto, a estimativa se mostra capaz de explicar 87% da variação da biomassa área e do combustível disponível para queima no Cerrado.

Formações campestres apresentaram os menores valores de biomassa e os maiores valores de combustível disponível para a queima, comparada as formações savânicas e florestais. Gerando assim, atenção para a susceptibilidade dessas formações aos incêndios florestais.

As equações geradas nesse estudo se apresentaram eficientes quando comparadas com dados da literatura e de campo. Assim, dados de satélites têm se apresentado como a chave para o gerenciamento ambiental, visto que se torna possível a estimativa de dados fundamentais para o manejo da vegetação, sem necessidade de ir a campo e com possibilidade de projeções mensais, anuais e até sazonais. Portanto, mapa de classificação de uso, juntamente, com mapa de biomassa aérea e combustível podem ser usados para definição de risco de incêndio, monitoramento de desmatamento, estimativa de emissão de gases de efeito estufa e quantificação de sequestro de carbono.

### **5.1. Oportunidade de estudos futuros**

A problemática do aquecimento global só cresce a cada ano, sinais climáticos são cada vez mais evidentes, e com isso a quantificação de carbono emitido se torna uma variável fundamental para o equilíbrio ecossistêmico. A forma mais disseminada de quantificação de carbono é a partir de valores de biomassa, portanto se faz necessário a quantificação dessa variável. No presente trabalho, foram apresentadas equações que estimam a quantidade de biomassa aérea e de combustível em diferentes fitofisionomias do Cerrado, mas, ainda se faz necessários novos estudos que as apliquem e validem estas metodologias em outras regiões do bioma.

Novos estudos podem ser realizados avaliando o percentual em que as equações conseguem diferenciar as formações do Cerrado. Pois, se comparada a classificação de uso do solo com o mapa de cobertura de biomassa/combustível é possível verificar o quanto essas variáveis conseguem discernir a variação de fitofisionomias.

Verifica-se também a necessidade de avaliações sazonais quantificando a biomassa e o combustível em diferentes períodos do ano. Ressalta-se uma grande necessidade nesse tipo de estudo, visto que em períodos mais secos a vulnerabilidade na ocorrência de incêndios é muito maior.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, R. C. R.; HOFFMANN, W. A.; VASCONCELOS, H. L.; PILON, N. A.; ROSSATTO, D. R.; DURIGAN, G. The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. **Science Advances**, v. 3, n. 1701284, p. 1–7, 2017.
- ALMEIDA, A. Q. DE; MELLO, A. A. DE; NETO, A. L. D.; FERRAZ, R. C. Relações empíricas entre características dendrométricas da Caatinga brasileira e dados TM Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 306–315, abr. 2014a.
- ALMEIDA, R. F.; FAGG, C. W.; OLIVEIRA, M. C. DE; MUNHOZ, C. B. R.; LIMA, A. S. DE; OLIVEIRA, L. S. B. DE. Mudanças florísticas e estruturais no cerrado sensu stricto ao longo de 27 anos (1985-2012) na Fazenda Água Limpa, Brasília, DF. **Rodriguésia**, v. 65, n. 1, p. 01-19, mar. 2014b.
- ALVARADO, S. T.; FORNAZARI, T.; CÓSTOLA, A.; MORELLATO, L. P. C.; SILVA, T. S. F. Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 270–281, 2017.
- ANTUNES, M. A. H.; SIQUEIRA, J. C. S. Características das imagens RapidEye para mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, v. XVI, p. 547–554, 2013.
- AQEEL, M.; JAMIL, M.; YUSOFF, I. Introduction to Remote Sensing of Biomass. In: **Biomass and Remote Sensing of Biomass**. InTech, 2011.
- AQUINO, P. S. R.; NAPPO, M. E.; RODRIGUES, M. S.; PEREIRA, I. M.; MATRICARDI, E. A. T.; PELÁ, G. M. Análise espacial da produtividade de serapilheira em uma mata de galeria. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 489–500, 2016.
- ARCHIBALD, S. Managing the human component of fire regimes: lessons from Africa. **Biological Sciences**, v. 371, n. 1696, p. 20150346, 5 jun. 2016.
- AZEVEDO, G. B. **Amostragem e modelagem da biomassa de raízes em um Cerrado sentido restrito no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, 2014.
- BAILLIE, B. R.; CUMMINS, T. L.; KIMBERLEY, M. O. Measuring woody debris in the small streams of New Zealand's pine plantations. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 33, n. 1, p. 87–97, mar. 1999.
- BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 137, n. 1–2, p. 47–58, 2010.
- BEERLING, D. J.; OSBORNE, C. P. The origin of the savanna biome. **Global Change Biology**, v. 12, n. 11, p. 2023–2031, nov. 2006.
- BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; STOLLE, L.; TETTO, A. F.; ALVES, M. V. G.

Caracterização e modelagem de material combustível superficial em povoamentos de *Pinus elliottii*. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 443, 28 set. 2012.

BHATTI, S. S.; TRIPATHI, N. K. Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. **GIScience & Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 445–467, 4 jul. 2014.

BOLFE, É. L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, M. C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1261–1269, set. 2012.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. **Science**, v. 223, n. 4642, p. 1290–1293, 1984.

CASTRO, E. A.; KAUFFMAN, J. B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, v. 14, n. 3, maio 1998.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **Geoscience and remote sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674–2677, 2003.

CHANG, Y.; ZHU, Z.; BU, R.; LI, Y.; HU, Y. Forest Ecology and Management Environmental controls on the characteristics of mean number of forest fires and mean forest area burned ( 1987 – 2007 ) in China. **Forest ecology and management**, 2015.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FROMARD, F.; KIRA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 88–99, 2005.

CLEVE, C.; KELLY, M.; KEARNS, F. R.; MORITZ, M. Classification of the wildland–urban interface: A comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 32, n. 4, p. 317–326, jul. 2008.

COCHRANE, M. A.; RYAN, K. C. Fire and fire ecology: concepts and principles. In: **Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics**. [s.l.: s.n.]. p. 25–62.

COHEN, B. Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. **Technology in Society**, v. 28, n. 1–2, p. 63–80, jan. 2006.

COSTA, E. M.; ANTONIO, M.; ANTUNES, H.; DEBIASI, P.; CUNHA, H. Processamento de imagens RapidEye no mapeamento de uso do solo em ambiente de Mar de Morros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1417–1427, 2016.

COUTO JUNIOR, A. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A. DE; MARTINS, E. DE S.; SANTANA, O. A.; SOUZA, V. V. DE; ENCINAS, J. I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3 suppl 1, p. 699–705, jun. 2011.

- DALPONTE, M.; FRIZZERA, L.; ØRKA, H. O.; GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E.; GIANELLE, D. Predicting stem diameters and aboveground biomass of individual trees using remote sensing data. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 367–376, 2018.
- DANTAS, D.; SOUZA, M. J.; VIEIRA, A.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, I.; MACHADO, E.; SOUZA, C. M.; ROCHA, W. Soil influences on tree species distribution in a rupestrian cerrado area. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 4, p. e20170605, 2018.
- DELITTI, W. B. C.; BURGER, D. M. Carbon and mineral nutrient pools in a gallery forest at Mogi Guaçu River, Southeast Brazil. **Forest Science**, v. 57, n. 1, p. 39–47, jan. 2000.
- DEO, R. K.; DOMKE, G. M.; RUSSEL, M. B.; WOODALL, C. W.; ANDERSEN, H.-E. Evaluating the influence of spatial resolution of Landsat predictors on the accuracy of biomass models for large-area estimation across the eastern USA. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 055004, 2018.
- DUARTE, S. M. A.; MARX, P. B. Estudo dos recursos naturais e suas potencialidades. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 4, n. 3, p. 168–189, 2009.
- DURIGAN, G.; RATTER, J. A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. **Journal of Applied Ecology**, v. 53, n. 1, p. 11–15, fev. 2016.
- ENE, L. T.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; BOLLANDSÅS, O. M.; MAUYA, E. W.; ZAHABU, E. Large-scale estimation of change in aboveground biomass in miombo woodlands using airborne laser scanning and national forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, v. 188, p. 106–117, 2017.
- FAO. **Roles of forests in climate change**. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/climatechange/53459/en/>>. Acesso em: 10 set. 2018.
- FEARNSIDE, P. Quantificação do serviço ambiental do carbono nas florestas amazônicas brasileiras. **Oecologia Brasileira**, v. 12, n. 4, p. 743–756, 2005.
- FELFILI, J. M.; SILVA JR, M. C. DA; REZENDE, A. V.; MACHADO, J. W. B.; WALTER, B. M. T.; SILVA, P. E. N. DA; HAY, J. D. Análise comparativa da florística e fitossociologia da vegetação arbórea do cerrado sensu stricto na Chapada Pratinha, DF - Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 6, n. 2, p. 27–46, dez. 1992.
- FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 286–296, 2014.
- FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. D. B.; LIMA, E. R. V. DE; BANDEIRA, M. M.; SILVA, B. B. DA. Mapeamento da Caatinga com Uso de Geotecnologia e Análise da Umidade Antecedente em Bacia Hidrográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 3, p. 676, 5 nov. 2012.
- FRANÇOSO, R. D.; BRANDÃO, R.; NOGUEIRA, C. C.; SALMONA, Y. B.; MACHADO, R. B.; COLLI, G. R. Habitat loss and the effectiveness of protected areas

in the Cerrado Biodiversity Hotspot. **Natureza e Conservação**, v. 13, n. 1, p. 35–40, 2015.

FRANKE, J.; BARRADAS, A. C. S.; BORGES, M. A.; MENEZES COSTA, M.; DIAS, P. A.; HOFFMANN, A. A.; OROZCO FILHO, J. C.; MELCHIORI, A. E.; SIEGERT, F. Fuel load mapping in the Brazilian Cerrado in support of integrated fire management. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, n. August, p. 221–232, 2018.

GALIDAKI, G.; ZIANIS, D.; GITAS, I.; RADOGLU, K.; KARATHANASSI, V.; TSAKIRI-STRATI, M.; WOODHOUSE, I.; MALLINIS, G. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 7, p. 1940–1966, 2016.

GAO, J. Mapping of Land Degradation from ASTER Data: A Comparison of Object-Based and Pixel-Based Methods. **GIScience & Remote Sensing**, v. 45, n. 2, p. 149–166, 15 abr. 2008.

GIÁCOMO, R. G.; CARVALHO, D. C. DE; PEREIRA, M. G.; SOUZA, A. B. DE; GAUI, T. D. Florística e fitossociologia em áreas de campo sujo e cerrado sensu stricto na estação ecológica de Pirapitinga – MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, 27 mar. 2013.

GITELSON, A. A. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. L08403, 2005.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 271–282, jan. 2003.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 22, n. 3, p. 247–252, mar. 1994.

GOMES, B. Z.; MARTINS, F. R.; TAMASHIRO, J. Y. Estrutura do cerradão e da transição entre cerradão e floresta paludícola num fragmento da International Paper do Brasil Ltda., em Brotas, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, n. 2, jun. 2004.

GOMES, E. J. D. S.; BATISTA, I. S.; LIMA, Z. M. C. Cobertura, ocupação do solo e erosão no entorno da Laguna Guaraíras/RN, Brasil. **HOLOS**, v. 1, p. 140–156, 9 fev. 2018a.

GOMES, L.; MIRANDA, H. S.; MARIA, M. Forest Ecology and Management How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. February, p. 281–290, 2018b.

GRACE, J.; MEIR, P.; MIRANDA, H. S.; MONTES, R. A. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 387–400, 2006.

GRIFFITHS, P.; HOSTERT, P.; GRUEBNER, O.; DER LINDEN, S. VAN. Mapping

megacity growth with multi-sensor data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 2, p. 426–439, fev. 2010.

GROOT, A.; CORTINI, F.; WULDER, M. A. Crown-fibre attribute relationships for enhanced forest inventory: Progress and prospects. **The Forestry Chronicle**, v. 91, n. 3, p. 266–279, 2015.

GUINDON, B.; ZHANG, Y.; DILLABAUGH, C. Landsat urban mapping based on a combined spectral–spatial methodology. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 2, p. 218–232, ago. 2004.

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; BARRETO, A. J. L. Análise da Variabilidade Espacial e Temporal do NDVI sobre o Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1–8, 2001.

HALADOVÁ, I.; PETROVIČ, F. Classification of land use changes (Model Area: Nitra Town). **Ekologia Bratislava**, v. 34, n. 3, p. 249–259, 2015.

HARMON, M. E.; FRANKLIN, J. F.; SWANSON, F. J.; SOLLINS, P.; GREGORY, S. V.; LATTIN, J. D.; ANDERSON, N. H.; CLINE, S. P.; AUMEN, N. G.; SEDELL, J. R.; LIENKAEMPER, G. W.; CROMACK, K.; CUMMINS, K. W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. p. 59–234.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. M.; Y, Y. M. I. S. Aboveground biomass estimate for Amazonian dense tropical moist forests. **Mem. Fac. Agr. Kagoshima Univ.**, v. 30, n. 987, p. 43–54, 1994.

HOFFMANN, W. A.; JACONIS, S.; MCKINLEY, K.; GEIGER, E.; GOTSH, S.; FRANCO, A. C. Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savannaforest boundaries. **Australian Journal of Botany**, v. 37, p. 634–643, 2012.

HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C. Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts. **Journal of Ecology**, v. 91, p. 475–484, 2003.

HOFFMANN, W. A.; SOLBRIG, O. T. The role of topkill in the differential response of savanna woody species to fire. **Forest Ecology and Management**, v. 180, n. 1–3, p. 273–286, jul. 2003.

HUETE, A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451, mar. 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. .; GAO, X.; FERREIRA, L. . Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 195–213, nov. 2002.

HUETE, A. . A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, ago. 1988.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRÖDER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian

Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v. 8, p. 1154–1180, 2015.

IBGE. **Mapa de Biomass e de Vegetação**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: 15 jan. 2019a.

IBGE. **Reserva Ecológica do IBGE - Ambiente e plantas vasculares**. [s.l: s.n.].

IBRAM. **Diretrizes para o plano de manejo da área e cabeção de veado**. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/Diretrizes.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833–3845, 2008.

JUSTICE, C. O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, jul. 1998.

KATERJI, W.; FARJAS, A. M.; BALSERA, M. C. Dem Local Accuracy Patterns in Land-Use/Land-Cover Classification. **Open Geosciences**, v. 8, n. 1, 1 jan. 2016.

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of Fire, Biomass and Nutrient Dynamics along a Vegetation Gradient in the Brazilian Cerrado. **The Journal of Ecology**, v. 82, n. 3, p. 519, set. 1994.

KEANE, R. E. Describing wildland surface fuel loading for fire management: a review of approaches, methods and systems. **International Journal of Wildland Fire**, v. 22, n. 1, p. 51, 2013.

KENNEDY, C. M.; HAWTHORNE, P. L.; MITEVA, D. A.; BAUMGARTEN, L.; SOCHI, K.; MATSUMOTO, M.; EVANS, J. S.; POLASKY, S.; HAMEL, P.; VIEIRA, E. M.; DEVELEY, P. F.; SEKERCIOGLU, C. H.; DAVIDSON, A. D.; UHLHORN, E. M.; KIESECKER, J. Optimizing land use decision-making to sustain Brazilian agricultural profits, biodiversity and ecosystem services. **Biological Conservation**, v. 204, p. 221–230, 2016.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.

KOVALSKYY, V.; ROY, D. P. The global availability of Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ land surface observations and implications for global 30m Landsat data product generation. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 280–293, mar. 2013.

LACERDA, J. S.; COUTO, H. T. C.; M, H. M.; PASISHNYK, N.; POLIZEL, J. L. **Estimativa da biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de espécies nativas**. Disponível em: <<http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:metrvm:metrvm-2009->



n05.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2018.

LACERDA, T. H. S.; CABACINHA, C. D.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MAIA, R. D.; LACERDA, K. W. DE S. Artificial neural networks for estimating tree volume in the Brazilian savanna. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 483–491, 2017.

LEHMANN, C. E. R. et al. Savanna Vegetation-Fire-Climate Relationships Differ Among Continents. **Science**, v. 343, n. 6170, p. 548–552, 31 jan. 2014.

LI, X.; CHEN, G.; LIU, J.; CHEN, W.; CHENG, X.; LIAO, Y. Effects of RapidEye imagery's red-edge band and vegetation indices on land cover classification in an arid region. **Chinese Geographical Science**, v. 27, n. 5, p. 827–835, 13 out. 2017.

LIBANO, A. M.; FELFILI, J. M. Mudanças temporais na composição florística e na diversidade de um cerrado sensu stricto do Brasil Central em um período de 18 anos (1985-2003). **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 4, p. 927–936, dez. 2006.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Análise da situação dos recursos hídricos do cerrado com base na importância e econômica e socioambiental de suas águas. **Simpósio Internacional Savanas Tropicais**, v. 2, p. 1–6, 2008.

LU, D.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Satellite Estimation of Aboveground Biomass and Impacts of Forest Stand Structure. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 8, p. 967–974, 1 ago. 2005.

LUKE, R. H.; MCARTHUR, A. G. **Bushfires in Australia**. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1978.

MASSETTI, A.; SEQUEIRA, M. M.; PUPO, A.; FIGUEIREDO, A.; GUIOMAR, N.; GIL, A. Assessing the effectiveness of RapidEye multispectral imagery for vegetation mapping in Madeira Island (Portugal). **European Journal of Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 643–672, 17 jan. 2016.

MASSI, K. G.; EUGÊNIO, C. U. O.; FRANCO, A. C. Post-fire reproduction of herbs at a savanna-gallery forest boundary in Distrito Federal, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 4, p. 876–886, 4 maio 2017.

MATOS, N. M.; RIBEIRO, F. P.; GATTO, A.; BUSSINGUER, A. P. Estoque de Serapilheira em Três Fisionomias no Cerrado do Distrito Federal. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 28 set. 2017.

MEDEIROS, J. D. **Guia de Campo: Vegetação do Cerrado 500 espécies**. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf2008\\_df/\\_publicacao/148\\_publicacao14022012101832.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf2008_df/_publicacao/148_publicacao14022012101832.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MEDEIROS, M. M.; FELFILI, J. M.; LIBANO, A. M. Comparação florístico-estrutural dos estratos de regeneração e adulto em cerrado sensu stricto no Brasil Central. **CERNE**, v. 13, p. 291–298, 1 jan. 2007.

MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Espectrais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A.; APARECIDO, E.; MATRICARDI, T. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerrado com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829–839, 2015.

MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S.; DE AZEVEDO, G. B.; MOTA, F. C. M.; DE SOUZA, Á. N.; JOAQUIM, M. S. Modeling and prediction of volume and aerial biomass of the tree vegetation in a Cerradão area of central Brazil. **Interciencia**, v. 42, n. 1, p. 21–27, 2017a.

MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; ENSINAS, J. M. I.; MIRANDA, J. F. N. Floristic, structural, and allometric equations to estimate arboreal volume and biomass in a cerrado site. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 1691–1702, 2017b.

MIRANDA, H. S.; NETO, W. N.; NEVES, B. M. C. Caracterização das queimadas de Cerrado. In: **Efeitos do Regime do Fogo sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados do Projeto Fogo**. Brasília: IBAMA, 2010. p. 24–33.

MIRANDA, S. C. **Variação espacial e temporal da biomassa vegetal em áreas de Cerrado**. Tese (Doutorado em Ecologia). Universidade de Brasília, 2013.

MIRANDA, S. DO C.; BUSTAMANTE, M.; PALACE, M.; HAGEN, S.; KELLER, M.; FERREIRA, L. G. Regional Variations in Biomass Distribution in Brazilian Savanna Woodland. **Biotropica**, v. 46, n. 2, p. 125–138, mar. 2014.

MIRELES, M. A.; MIRANDA, R. P.; SÁNCHEZ, M. E. R.; HERNÁNDEZ, A. G.; ÁNGEL, L. M. Estimación de la densidad forestal mediante imágenes Landsat ETM+ en la región sur del Estado de México. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 8, n. 41, p. 30–55, 2017.

MMA. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite - Cerrado 2010-2011**. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/\\_arquivos/relatoriofinal\\_cerrado\\_2010\\_final\\_72\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatoriofinal_cerrado_2010_final_72_1.pdf)>. Acesso em: 18 out. 2018.

MMA, M. DO M. A.-. **Florestas do Brasil em resumo**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2013.

MOTA, F. C. M. **Biomassa, fluxos de carbono e energia em área de cerrado sentido restrito e plantio de eucalipto no Distrito Federal**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, 2017.

MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. **Geoderma**, v. 162, n. 1–2, p. 1–19, abr. 2011.

MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Estimating biomass for boreal forests using

ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 4, p. 434–447, dez. 2005.

NANDY, S.; SINGH, R.; GHOSH, S.; WATHAM, T.; KUSHWAHA, S. P. S.; KUMAR, A. S.; DADHWAL, V. K. Neural network-based modelling for forest biomass assessment. **Carbon Management**, v. 8, n. 4, p. 305–317, 2017.

NEHRING, R. Yield of dreams: Marching west and the politics of scientific knowledge in the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa). **Geoforum**, v. 77, p. 206–217, 2016.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; RATTER, J. A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. In: **The cerrados of Brazil**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 91–120.

OTTMAR, R. D.; VIHNANEK, R. E.; MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. **Stereo photo series for quantifying cerrado fuels in Central Brazil - Volume 1**. Portland: USDA Forest Service, 2001.

OVERBECK, G. E.; VÉLEZ-MARTIN, E.; SCARANO, F. R.; LEWINSOHN, T. M.; FONSECA, C. R.; MEYER, S. T.; MÜLLER, S. C.; CEOTTO, P.; DADALT, L.; DURIGAN, G.; GANADE, G.; GOSSNER, M. M.; GUADAGNIN, D. L.; LORENZEN, K.; JACOBI, C. M.; WEISSER, W. W.; PILLAR, V. D. Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and Distributions**, v. 21, n. 12, p. 1455–1460, dez. 2015.

PAIVA, G. Y.; SILVA, K. R.; PEZZOPANE, J. M.; ALMEIDA, A. E. Q.; CECÍLIO, R. A. Delimitação de sítios florestais e análise dos fragmentos pertencentes na bacia do rio Itapemirim. **Idesia (Arica)**, v. 28, n. 1, abr. 2010.

PANIZZA, A. D. C.; FONSECA, F. P. Técnicas de interpretação visual de imagens. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, n. 30, p. 30, 30 abr. 2011.

PEREIRA JÚNIOR, A. C. **Métodos de geoprocessamento na avaliação da susceptibilidade do cerrado ao fogo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal de São Carlos, 2002.

PHUA, M.-H.; JOHARI, S. A.; WONG, O. C.; IOKI, K.; MAHALI, M.; NILUS, R.; COOMES, D. A.; MAYCOCK, C. R.; HASHIM, M. Synergistic use of Landsat 8 OLI image and airborne LiDAR data for above-ground biomass estimation in tropical lowland rainforests. **Forest Ecology and Management**, v. 406, p. 163–171, dez. 2017.

PINHEIRO, E. D. S.; DURIGAN, G. Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do Cerrado no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 32, n. 3, p. 441–454, set. 2009.

PINHEIRO, L. F. S.; KOLB, R. M.; ROSSATTO, D. R. Changes in irradiance and soil

properties explain why typical non-arboreal savanna species disappear under tree encroachment. **Australian Journal of Botany**, v. 64, n. 4, p. 333–341, 2016.

PINTO, J. R. R.; MEWS, H. A.; JANCOSKI, H. S.; MARIMON, B. S.; BOMFIM, B. DE O. Woody vegetation dynamics in a floodplain campo de murundus in central Brazil. **Acta Botanica Brasílica**, v. 28, n. 4, p. 519–526, dez. 2014.

PLANET. **RAPIDEYE™ IMAGERY PRODUCT SPECIFICATIONS**. Disponível em: <<https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye-Image-Product-Specifications.pdf>>.

PONZONI, F. J.; REZENDE, A. C. P. Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais. **Revista Árvore**, v. 28, n. 4, p. 535–545, ago. 2004.

REATTO, A.; CORREIRA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. Solos do Bioma Cerrado. In: **Cerrado: Ecologia e Flora**. Planaltina: Embrapa, 2010. p. 109–133.

REDDY, R. S.; RAJASHEKAR, G.; JHA, C. S.; DADHWAL, V. K.; PELISSIER, R.; COUTERON, P. Estimation of above ground biomass using texture metrics derived from IRS Cartosat-1 panchromatic data in evergreen forests of Western Ghats, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 657–665, 2017.

REJAUR, M. R.; SAHA, S. K. Multi-resolution segmentation for object-based classification and accuracy assessment of land use/land cover classification using remotely sensed data. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, p. 189–201, 8 jun. 2008.

REZENDE, A. V.; VALE, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILI, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado sensu stricto em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 65–76, 2006a.

REZENDE, A. V.; VALE, A. D.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIRO FILHO, C. R. Comparison of mathematical models to volume, biomass and carbon stock estimation of the woody vegetation of a cerrado sensu stricto in Brasilia, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 65–76, 2006b.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado : ambiente e flora**, p. 556, 1998.

RIBEIRO, J.; WALTER, B. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado: ecologia e flora**. 1. ed. Brasília: Embrapa Cerrados/Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 151–212.

RIBEIRO, S. C.; FEHRMANN, L.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; KLEINN, C.; GASPAR, R. O. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 3, p. 491–499, 2011.

ROITMAN, I. et al. Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different

spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. **PLoS ONE**, v. 13, n. 3, 2018.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium**, v. 1, p. 309–317, 1974.

SALGADO-LABORIOU, M. . Alguns aspectos sobre a paleoecologia dos cerrados. In: SCARIOT, A., SOUSA-SILVA, J.C., FELFILI, J. M. **Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 439.

SANO, E. E.; ROSA, R.; LUÍS, J.; BRITO, S.; FERREIRA, G. Notas Científicas Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153–156, 2008.

SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: **As florestas e o carbono**. UFPR ed. Curitiba: [s.n.]. p. 119–140.

SANTOS, L. A. C.; BATISTA, A. C.; NEVES, C. O. M.; DE CARVALHO, E. V.; SANTOS, M. M.; GIONGO, M. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra em nove municípios do Sul do Tocantins, utilizando imagens Landsat. **Revista agroambiente on-line**, v. 11, n. 2, p. 111, 19 jun. 2017a.

SANTOS, M. M.; MACHADO, I. E. S.; CARVALHO, E. V.; VIOLA, M. R.; GIONGO, M. Estimativa de parâmetros florestais em área de cerrado a partir de imagens do sensor OLI Landsat 8. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 75–83, 2017b.

SEABRA, V. DA S.; CRUZ, C. M. Mapeamento da dinâmica da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do Rio São João, RJ. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 2, p. 411–426, ago. 2013.

SHISHIR, S.; TSUYUZAKI, S. Hierarchical classification of land use types using multiple vegetation indices to measure the effects of urbanization. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 6, p. 342, 11 jun. 2018.

SILVA, F. C. **Compartilhamento de nutrientes em diferentes componentes da biomassa aérea em espécies arbóreas de um cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade de Brasília, 1990.

SILVA, F. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do Bioma Cerrado. In: **Cerrado: Ecologia e Flora**. Planaltina: Embrapa, 2008. p. 69–88.

SILVA, L. R.; SANO, E. E. Análise das imagens do satélite rapidezeye para discriminação da cobertura vegetal do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 7, p. 1269–1283, 2016.

SILVEIRA, F. A. O. et al. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. **Plant and Soil**, v. 403, n. 1–2, p. 129–152, 18 jun. 2016.

- SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 27 mar. 2008.
- SOARES FILHO, B.; RAJÃO, R.; MACEDO, M.; CARNEIRO, A.; COSTA, W.; COE, M.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A. Cracking Brazil's forest code. **Science**, v. 344, p. 363–364, 2014.
- SOARES, R. V; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais - controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: p. 46-70. 2007.
- SOUSA JUNIOR, J. G. DE A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENUÍ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 727–738, abr. 2008.
- TAVARES, M. E. F. Metodologias usadas na quantificação de material combustível no Cerrado. **Revista Vértices**, v. 19, n. 1, p. 175, 2017.
- TORRES, F. T. P.; ROQUE, M. P. B.; LIMA, G. S.; MARTINS, S. V; FARIA, A. L. L. Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento Mapping of Forest Fires Risk Using Geoprocessing Techniques. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–10, 2017.
- VAN LEEUWEN, T. T. et al. Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database. **Biogeosciences**, v. 11, n. 24, p. 7305–7329, 19 dez. 2014.
- VIANA, H.; LOPES, D.; TADEU, J.; ARANHA, M. Predição de biomassa arbustiva lenhosa empregando dados de inventário e o Índice de Diferença Normalizada extraído em imagens Landsat 5 TM. **Revista Millenium**, v. 37, n. 1, 2009.
- VIEIRA, C. K.; BORGES, L. G. DOS A.; MARCONATTO, L.; GIONGO, A.; STÜRMER, S. L. Microbiome of a revegetated iron-mining site and pristine ecosystems from the Brazilian Cerrado. **Applied Soil Ecology**, v. 131, p. 55–65, 2018.
- WALTER, B. M. T.; RIBEIRO, J. F. Diversidade fitofisionômica e o papel do fogo no bioma Cerrado. In: MIRANDA, H. **Efeitos do Regime do Fogo sobre a Estrutura de Comunidades de Cerrado: Resultados do Projeto Fogo**. Brasília: IBAMA, 2010.
- WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMAN, J. B.; BABBITT, R. E.; CUMMINGS, D. L.; DIAS, B.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. W. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14601, 1992.
- WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, 2009.
- WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; VASTARANTA, M.; HILKER, T.; TOMPALSKI, P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619–641, 2016.

WHITEHEAD, P. J.; PURDON, P.; RUSSELL-SMITH, J.; COOKE, P. M.; SUTTON, S. The management of climate change through prescribed Savanna burning: Emerging contributions of indigenous people in Northern Australia. **Public Administration and Development**, v. 28, n. 5, p. 374–385, dez. 2008.

XIE, Q.; DASH, J.; HUANG, W.; PENG, D.; QIN, Q.; MORTIMER, H.; CASA, R.; PIGNATTI, S.; LANEVE, G.; PASCUCCI, S.; DONG, Y.; YE, H. Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 5, p. 1482–1492, 2018.

XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 14, p. 4269–4276, 14 jul. 2008.

XU, Y.; SMITH, S. E.; GRUNWALD, S.; ABD-ELRAHMAN, A.; WANI, S. P. Evaluating the effect of remote sensing image spatial resolution on soil exchangeable potassium prediction models in smallholder farm settings. **Journal of Environmental Management**, v. 200, p. 423–433, set. 2017.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação ( NDVI ) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583–594, 26 jan. 2003.

ZHU, X.; LIU, D. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 102, p. 222–231, 2015.

ZUMBRUNNEN, T.; PEZZATTI, G. B.; MENÉNDEZ, P.; BUGMANN, H.; BÜRGI, M.; CONEDERA, M. Forest Ecology and Management Weather and human impacts on forest fires : 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 12, p. 2188–2199, 2011.