



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

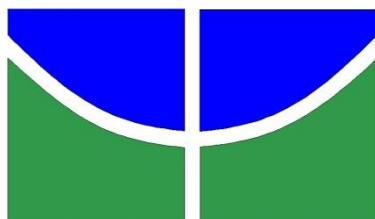
**ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE
USO E COBERTURA DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO POR
MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Elis Rejane Freire

Brasília, 19 de abril de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE
USO E COBERTURA DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO POR
MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

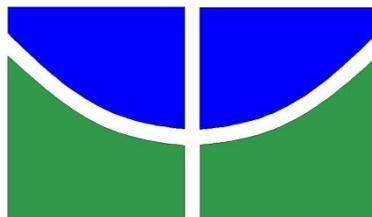
Elis Rejane Freire

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de Brasília como parte
das exigências para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Florestal.

Orientador(a): Prof.(a). Dr(a). Rejane Ennes
Cicerelli

Co-orientador(a): Prof.(a). Dr(a). Andréia de
Almeida

Brasília-DF, 19 de abril de 2022



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL

ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Estudante: Elis Rejane Freire

Matrícula: 15/0123981

Orientador: Prof.ª Dr.ª Rejane Ennes Cicerelli

Menção: SS

Aprovada por:

Prof.ª Dr.ª Rejane Ennes Cicerelli

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências - IGD
Orientadora (EFL)

Prof. Dr. Ricardo Tezini Minoti

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Membro da Banca

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Brasília, 19 de abril de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rejane Ennes Cicerelli, Professor(a) de Magistério Superior do Instituto de Geociências**, em 19/04/2022, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Tezini Minoti, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 20/04/2022, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 25/04/2022, às 18:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7930429** e o código CRC **2450BC19**.

FICHA CATALOGRÁFICA

FREIRE, ELIS REJANE

ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO NO DO CERRADO BRASILEIRO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO.

xx p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheira, Engenharia Florestal, 2022).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Sentinel- 2A

2. Índices espectrais

3. TDR

4. Fazenda Água Limpa (FAL)

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREIRE, E. R. (2022). **ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 50 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR(A): Elis Rejane Freire

TÍTULO: *Análise da umidade do solo em diferentes classes de uso e cobertura do solo no Cerrado brasileiro por meio de sensoriamento remoto.*

GRAU: Engenheiro(a) Florestal

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Elis Rejane Freire

elisrejanef@gmail.com

Dedico esse trabalho:

À recuperação das águas, das terras, das florestas [...] dos homens.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são:

Pelo privilégio de me graduar em Engenharia Florestal com a possibilidade de agregar conhecimento de várias áreas do conhecimento.

Esse trabalho é resultado de um conjunto de esforços por tanto, quero agradecer a minha co-orientadora Andreia de Almeida, a qual, tive o prazer de trabalhar e me deu fundamental suporte. Ao professor Sérgio Koide que tem minha admiração profissional e pessoal. A minha orientadora Rejane Ennes Cicerelli que possibilitou a existência dessa temática, além de influenciar no meu interesse em uma área da qual não acreditava.

Quero agradecer em especial a minha família, meus avós Rejane Freire e Domingos Antônio por todo apoio e suporte, meu '*namorado*' Fernando Aires, te agradeço por tudo amor; aos meus pais Robson Heitor e Verusa Martins pela minha educação desde a infância e por serem minha inspiração de vida. A caçula Lara Liz que antes de irmã é minha amiga.

Agradeço ainda aos amigos de floresta Breno Abreu e Bárbara Valadares que os levo no coração por toda a vida. Sem deixar de mencionar os professores que tem meu apreço pessoal Noris Diniz e Julio Pastore.

Agradeço a FAP-DF e Finatec pelo Projeto de Iniciação Científica (ProIC) e a Universidade de Brasília pela experiência única e plural.

Essencialmente à Deus.

“Não nascemos criativos ou destrutivos. Cada um de nós tem a capacidade de criar ou destruir, de deixar o mundo melhor do que o encontramos, ou pior”. (Yo-Yo Ma)

RESUMO

Freire, Elis Rejane (FREIRE, E. R.) **ANÁLISE DA UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO NO CERRADO BRASILEIRO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

A umidade do solo é uma variável-chave para processos ecohidrológicos. No Cerrado brasileiro, a umidade do solo é fator limitante dos balanços hídrico e de energia e influencia os padrões da vegetação. Contudo, a obtenção de dados de umidade do solo é limitada quanto às resoluções espacial e temporal. Desse modo, este trabalho teve como objetivo detectar a variação da umidade do solo e sua relação com uso e cobertura do solo do Cerrado brasileiro por meio de imagens de Sensoriamento Remoto orbital. Dados mensais de umidade do solo medidos em campo entre julho de 2019 e agosto de 2020, em doze pontos de monitoramento com diferentes classes de uso e cobertura do solo, foram correlacionados com dados de sensoriamento remoto. Para isso, imagens mensais de Sentinel-2A de dias compatíveis com a coleta de dados em campo foram selecionadas e processadas para extração de índices de vegetação (NDVI e SAVI) e razões de bandas contrastantes quanto à reflectância e absorção da radiação (B3/B4, B8/B4 e B11/B4). Modelos de regressão lineares de θ em função dos dados extraídos do Sentinel indicaram significância nas relações ao nível de p-valor inferior à 0.001. Porém, o modelo proposto com a razão B3/B4 como variável preditora indicou maior capacidade de explicação de θ ($R^2 = 0.36$) e foi selecionado para etapas de validação e estimativa da θ para os pontos de monitoramento na FAL. Por meio da validação cruzada, o modelo apresentou-se adequado para estimativa da umidade do solo. A aplicação do modelo linear derivado de B3/B4 para as imagens Sentinel dos meses de dezembro/2019 (chuva) e julho/2020 (seca) evidenciou padrões de variação da umidade do solo entre as classes de uso e cobertura do solo nativas e não nativas, nas estações, especialmente para as formações Cerrado e formações campestres. Por fim, verificou-se possibilidade de utilização de Sensoriamento Remoto para estimativa da umidade do solo no Cerrado.

Palavras-chave: Sentinel- 2A; índices espectrais; TDR; Fazenda Água Limpa (FAL)

ABSTRACT

Freire, Elis Rejane (FREIRE, E. R.) **SOIL MOISTURE ANALYSIS IN DIFFERENT CLASSES OF USE AND SOIL COVER IN THE BRAZILIAN CERRADO USING REMOTE SENSING.** Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

Soil moisture is a key variable for ecohydrological processes. In the Brazilian Cerrado, soil moisture is a limiting factor for water and energy balances and influences vegetation patterns. However, obtaining soil moisture data is limited in terms of spatial and temporal resolutions. Thus, this work aimed to detect the variation of soil moisture and its relationship with use and land cover in the Brazilian Cerrado through orbital Remote Sensing images. Monthly soil moisture data measured in the field between July 2019 and August 2020, at twelve monitoring points with different land use and land cover classes, were correlated with remote sensing data. For this, monthly Sentinel-2A images of days compatible with field data collection were selected and processed to extract vegetation indices (NDVI and SAVI) and contrasting bench ratios regarding reflectance and radiation absorption (B3/B4, B8/B4 and B11/B4). Linear regression models of θ as a function of data extracted from Sentinel indicated significance in the relationships at the p-value level below 0.001. However, the proposed model with the B3/B4 ratio as the predictor variable indicated greater ability to explain θ ($R^2 = 0.36$) and was selected for the validation and θ estimation steps for FAL. Through cross-validation, the model proved to be adequate for estimating soil moisture. The application of the linear model derived from B3/B4 for the Sentinel images of the months of December/2019 (rain) and July/2020 (drought) showed patterns of soil moisture variation between native and non-native land use and cover classes in the seasons, especially for Cerrado formations and grassland formations. Finally, it was possible to use Remote Sensing to estimate soil moisture in the Cerrado.

Keywords: Spectral index; Sentinel- 2A; TDR; Fazenda Água Limpa (FAL).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fitofisionomias do bioma Cerrado.....	20
Figura 2. Componentes da trajetória da REM.....	21
Figura 3. Assinatura espectral da vegetação.....	24
Figura 4. Curva espectral fitofisionomias do Cerrado.....	25
Figura 5. Pontos de monitoramento (PM) em fitofisionomias do Cerrado na Fazenda Água Limpa (FAL).....	27
Figura 6. Classes de uso e cobertura do solo na Fazenda Água Limpa (FAL).....	28
Figura 7. Dados da θ obtidos em campo na FAL/UnB.....	29
Figura 8. Resolução espacial das bandas do Sentinel-2.....	32
Figura 9. Umidade volumétrica do solo em coberturas e fisionomias do Cerrado na FAL..	35
Figura 10. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados dos índices de vegetação (NDVI e SAVI).....	36
Figura 11. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre as bandas B8 e B4 (à direita); B11 e B4 (à esquerda).....	37
Figura 12. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre as bandas B3 e B4.....	37
Figura 13. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados dos índices de vegetação (NDVI e SAVI) para cada classe de uso e cobertura do solo.....	38
Figura 14. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre bandas para cada classe de uso e cobertura do solo.....	39
Figura 15. Correlação entre os dados de umidade do solo monitorados em campo e estimados a partir do modelo linear avaliado por meio de validação cruzada K-grupos.....	40
Figura 16. Mapas do índice RSg (razão entre as bandas espectrais B03 e B04).....	42
Figura 17. Mapas de umidade do solo FAL estimada a partir do modelo proposto com valores da razão B3/B4.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos Pontos de Monitoramento FAL.....	28
Tabela 2. Especificações técnicas do satélite Sentinel-2.....	30
Tabela 3. Designação das bandas espectrais do satélite Sentinel-2.....	31
Tabela 4. Relação (R^2) entre os dados de umidade do solo e os dados derivados de SR para cada classe de uso e cobertura do solo.....	39
Tabela 5. Valores preditos de umidade do solo a partir do modelo linear proposto na validação cruzada K-grupos e seus respectivo e intervalo de confiança (2.5 – 97.5%).....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

θ	Umidade do Solo
θ_v	Umidade volumétrica do solo
SR	Sensoriamento Remoto
RS	Razão Simples entre bandas espectrais
RSs	Razão da banda infravermelho próxima (NIR) pela banda vermelha
REM	Radiação Eletromagnética
PM	Pontos de Monitoramento
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
ESA	Copernicus da European Space Agency
T_p	Tempo de propagação do campo eletromagnético
ϵ_a	Permissividade aparente
RS_g	Razão da banda verde pela banda vermelha
RS_{sw}	Razão da banda SWIR1 pela banda vermelha
RS_{re}	Razão da banda infravermelho próximo (NIR) pela banda de borda vermelha
NIR	Banda espectral do infravermelho próximo
Red	Banda espectral do vermelho
FAL	Fazenda Água Limpa
Lv	Latossolo vermelho
Lv/a	Latossolo vermelho-amarelo
RMSE	Raiz do erro quadrado médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Umidade do solo.....	18
3.2	A cobertura do solo como modulador da umidade do solo no bioma Cerrado e suas fitofisionomias.....	20
3.3	Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da a umidade do solo	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1	Área de estudo	27
4.2	Metodologia.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Umidade do solo em diferentes classes de uso e cobertura do solo no Cerrado obtidos pelo monitoramento na FAL	355
5.2	Relação entre os dados de umidade do solo e de SR	36
5.3	Validação do modelo proposto e análise das estimativas de umidade do solo a partir de SR.....	40
6	CONCLUSÕES.....	44
7	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é a segunda maior região biogeográfica da América do Sul e é considerada a formação savânica mais biodiversa do mundo ocupando 25% do território nacional (INPE,2021). Por isso, o levantamento de dados de áreas preservadas do bioma Cerrado é uma importante estratégia para a identificação dos impactos antrópicos sobre o bioma que já havia perdido até 2021, quase um milhão de quilômetros quadrados por desmatamento (JORNALDACIÊNCIA,2022). A importância do monitoramento da cobertura vegetal em função da disponibilidade hídrica no compartimento do solo é essencial para a gestão ambiental, prevenção a eventos climáticos extremos e produção agrícola (LEWIS, *et al.*, 2022).

O monitoramento e a análise da concentração de água na zona não saturada do solo, denominada umidade do solo, são essenciais para a previsão do desenvolvimento de culturas agrícolas, para análises climáticas e para o planejamento associado à recuperação e desenvolvimento das florestas. Isso ocorre principalmente devido ao fato de que a umidade do solo controla as trocas hídricas e energéticas entre os principais compartimentos ambientais - atmosfera e solo - e interfere principalmente nos processos hidrológicos. Destaca-se ainda que a umidade do solo está diretamente relacionada com fatores topográficos, geológicos e de uso e cobertura do solo (FONTANET, *et al.*,2018).

A cobertura do solo como parâmetro modulador da umidade do solo reafirma a importância da vegetação no solo, principalmente em regiões tropicais sazonalmente secas, para a manutenção do equilíbrio hídrico e também, para a regulação do estoque de carbono, com potencial de reduzir ações que corroboram com as mudanças climáticas (LEWIS, *et al.*, 2022). De maneira antagônica à necessidade de cobertura vegetal, o bioma Cerrado conta com mais de 50% de modificações na mata nativa, onde a taxa média anual corresponde cerca de 6 mil km² retirados de sua cobertura natural pelo desmatamento, principalmente com destino a atividade agropecuária (BARROSO, 2016; SHIROMA, *et al.*,2020). Estudos apontam que essas modificações têm contribuído para processos de desertificação do bioma (VIEIRA, 2015; CARVALHO *et al.*, 2009).

Concomitante à necessidade de conhecer e avaliar a umidade do solo agregam-se as exigências por ferramentas capazes de auxiliar na aquisição de dados confiáveis e representativos de umidade do solo (SHUKLA, *et al.*, 2014). Em função disso, técnicas de sensoriamento remoto demonstram potencial na mensuração indireta da umidade do solo, principalmente por oferecer maior amplitude na escala espacial, com baixos custos e maior praticidade (LACKSHIM, 2017).

O método gravimétrico de medição direta da umidade do solo, padrão em estudos do solo (DOBRIYAL, *et al.*, 2012; WANG; SHI,2019; LIYAANAGE, *et al.*, 2022), apesar de ser confiável, acessível e oferecer precisão na calibração dos sensores alternativos, é um método destrutivo, moroso e de baixa cobertura espacial. A alternativa para medições em campo, necessárias para a umidade do solo, são as sondas Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que garantem maior eficiência na aquisição dados, porém restritas ao monitoramento pontual (TOPP;DAVIS,1985; LACKSHIM, 2017).

O sensoriamento remoto, por sua vez, tem aperfeiçoado suas plataformas de monitoramento e com isso várias técnicas de medição da umidade surgem para agregar melhores soluções quando comparadas a métodos tradicionalmente existentes (MOHANTY, *et al.*,2017).

Esse cenário reitera as vantagens da utilização do sensoriamento remoto, como sendo relevante para entraves ao monitoramento da umidade do solo, abrangendo maiores áreas de cobertura, com produtos de sensores em melhores resoluções espacial, temporal e espectral que permitem o monitoramento com frequência temporal e espacial em comparação com determinados métodos de campo (WANG *et al.* 2018; AKIYAMA, *et al.*,2018). As geotecnologias associadas ao monitoramento *in loco* fornecem maior precisão na estimativa da umidade do solo, tendo em vista a importância da calibração dos equipamentos e aferição dos mesmo em campo (TEIXEIRA, *et al.*, 2017).

Considerando diferenças na resposta espectral da cobertura do solo em função do efeito da umidade do solo, estudos demonstram a possibilidade de utilização de imagens multiespectrais com intervalos espectrais no visível, infravermelho próximo e termal para a estimativa da umidade do solo (LOPES, *et al.*,2011). Desse modo, o comportamento espacial e temporal da umidade do solo pode ser inferido a partir de dados de sensoriamento remoto por meio da estimativa indireta gerada por índices de vegetação ou ainda com a combinação de bandas com diferentes resoluções espectrais que evidenciem tais características (GAO, *et al.*, 2017).

Entres os índices de vegetação, os mais utilizados são o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI ((Soil Adjusted Vegetation Index) por contribuírem com o aumento da sensibilidade do vigor vegetativo (GAMEIRO, *et al.*,2017). Índices obtidos pela razão direta de bandas espectrais, são outra fonte de informação, pois podem ser utilizados no diagnóstico das principais diferenças entre as fitofisionomias do Cerrado e diferentes coberturas do solo (MELLO, *et al.*, 2009; BHOGAPURAPU, *et al.*, 2022; RIBEIRO, *et al.*, 2020).

No presente estudo, avaliou-se a aplicabilidade do sensoriamento remoto o presente estudo avaliou a aplicabilidade do sensoriamento remoto para a estimativa da umidade do solo em diferentes classes de cobertura do solo na Fazenda Água Limpa (FAL-UnB), localizada no Distrito Federal, dentro do bioma Cerrado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a variação da umidade do solo de acordo com uso e cobertura do solo do Cerrado brasileiro utilizando dados derivados de Sensoriamento Remoto orbital.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar a umidade do solo em diferentes classes de uso e cobertura do solo de formações nativas e não nativas do bioma Cerrado por meio de técnicas de campo tradicionais considerando suas variações sazonais;
- Analisar as configurações de imagens de Sensoriamento Remoto orbitais juntamente com modelos pré-existentes e propor as melhores opções para o Cerrado;
- Relacionar dados de Sensoriamento Remoto e teor de umidade do solo com o objetivo de construir um modelo de regressão, cuja resposta seja diretamente as alterações de umidade do solo;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Umidade do solo

A umidade do solo (θ), segundo KIRKHAM (2005), refere-se à água armazenada na zona não saturada do solo sob influência de fatores climáticos, topográficos, pedológicos e de cobertura do solo. A umidade do solo tem fundamental importância para a compreensão da dinâmica espacial e temporal de eventos hidrológicos, meteorológicos, bem como para a previsão de eventos climáticos críticos e em análises de estabilidade em obras de engenharia (LEKSHMI *et al.*, 2014; VEREECKEN *et al.*, 2014).

Importante variável ambiental, a umidade do solo influencia na composição vegetal em função da sua relação com outros processos hidroclimáticos, onde seu conhecimento gera produtos em diversas escalas que são imprescindíveis para o monitoramento ambiental, gestão do balanço hídrico das bacias hidrográficas e na irrigação (FONTANET, *et al.*, 2018).

Atualmente, existem diferentes tipos de metodologias para medir a umidade do solo. As medições da θ , em geral, são obtidas por meio do método direto gravimétrico que consiste na aquisição de amostras em campo, que são secas utilizando estufa em laboratório e posteriormente pesadas. Apesar de fornecer dados diretos de θ , o método gravimétrico não é prático levando em consideração a necessidade de análise de um número elevado de amostras para garantir a representatividade espacial e temporal dos dados (SANTOS, *et al.*, 2011).

Métodos indiretos, a exemplo de sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR), permitem a aquisição de dados satisfatórios de θ . Para TDR, o parâmetro de interesse é a constante dielétrica, também denominada permissividade relativa aparente (ϵ_a). A presença de umidade no solo altera sensivelmente ϵ_a , possibilitando que a referida grandeza possa ser utilizada como medida indireta do teor de umidade (WHITE; ZEGELIN, 2000). É importante ressaltar que os valores de ϵ_a podem ser determinados por meio da Equação 1, utilizando dados de tempo de propagação do campo eletromagnético (tp), obtidos com a sonda TDR, em picossegundos.

$$\epsilon_a = \exp(0.00478tp + 0.34928) \quad (1)$$

A conversão dos dados de tp para ϵ_a e, posteriormente, de ϵ_a para θ é realizada automaticamente pela sonda. Aplicando-se a equação adequada para a calibração e a conversão dos dados de ϵ_a em umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). A equação de Topp(1980) (Equação

2) é utilizada para conversão dos dados de ε_a em umidade volumétrica do solo (θ_v , cm³.cm⁻³) para determinados tipos de solo.

$$\theta_v = 7,16 \times 10^{-12} r_a^5 - 1,36 \times 10^{-8} r_a^4 + 9,81 \times 10^{-5} r_a^3 - 3,20 \times 10^{-3} r_a^2 + 5,26 \times 10^{-1} r_a - 3,01 \times 10 \quad (2)$$

Os dados de umidade do solo exibem forte relação com a escala que pode interferir significativamente a confiabilidade das medições. Dependendo do método utilizado para estimar a variável física, alguns fatores podem intervir diretamente, principalmente fatores relacionados as propriedades do solo; contribuem para a alta variabilidade da umidade do solo, tanto espacialmente como temporalmente – vegetação, topografia, cobertura do solo, condições atmosféricas, geologia – também com graus diferenciados de interferência sobre a umidade do solo (YOO; KIM, 2004).

Sendo assim, dados gravimétricos em campo normalmente são indicados e usados como valor de referência da umidade do solo para calibração do sensor, ou estudos prévios que estimem umidade. Mesmo sendo o mais confiável em pequenas escalas, o método direto gravimétrico possui a desvantagem da coleta das amostras em campo, seguidas de laboratório que despendem demasiados recursos. Sensores de umidade do solo, como as sondas de reflectometria no domínio do tempo são suficientes para mensuração da variável de modo contínuo, a partir de um registrador de dados. O ganho de tempo das sondas perde na representatividade em uma área de análise maior, devido o número baixo de medições lidas in situ que fornecem uma imagem incompleta de uma grande área de estudo (FONTANET, et.al., 2018).

Por sua vez o sensoriamento remoto e as técnicas aprimoradas de geoprocessamento são ferramentas que permitem investigar e prever mudanças ambientais de um modo confiável, repetitivo, não invasivo, rápido e econômico com estratégias consideráveis para a tomada de decisão (GAMEIRO, et.al.,2017; FONTANET, et.al., 2018;) O método indireto a partir de produtos de satélite permite a relação da umidade do solo a partir de modelos empíricos de parâmetros conhecidos fornecidos pelas imagens a partir de valores de refletância com o uso de índices espectrais (SHIROMA, et al., 2019; RIBEIRO, et al., 2020).

3.2 A cobertura do solo como modulador da umidade do solo no bioma Cerrado e suas fitofisionomias

O Cerrado pode ser apresentado como um mosaico vegetacional, composto por diferentes formações que se distinguem em formações florestais, savânicas e campestres. Sendo assim, pode-se caracterizar o bioma Cerrado em onze (11) fitofisionomias (Figura 1), tipos de vegetação principais, onde quatro (4) são florestais – Mata de Galeria, Mata Ciliar, Mata Seca e Cerradão – quatro (4) são savânicas – Cerrado Sentido Restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda – três (3) são campestres – Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre (SILVA JUNIOR, et.al.,2014).

De acordo com LEWIS, *et.al.* (2022), é imprescindível mapear diferentes tipos de vegetação nativa e não nativa em regiões tropicais sazonalmente secas, como o Cerrado, e entender seu comportamento e interferências na regulação do balanço hídrico, na cobertura do solo e assim encontrar maneiras de mitigação de eventos críticos. Por isso, em função da cobertura do solo, as fisionomias do Cerrado se distinguem em comunidades de vegetação com estruturas e características distintas, desde a altura e espaçamento até o tipo de solo e características geológicas. É possível obter assim, um gradiente onde às formações florestais apresentam cobertura entre 50 e 95% de cobertura arbórea; as formações savânicas cobertura entre 5 e 70% e as formações campestres rica em vegetação herbácea com ausência de árvores ou muito esparsas (SILVA JUNIOR, et.al.,2014).

Vários estudos apontam para a extrema complexidade dos processos biofísicos em respostas visíveis que o solo fornece como indicador de qualidade ambiental através da vegetação, principalmente se considerarmos a forte heterogeneidade da cobertura do solo e sua variabilidade temporal (GAMEIRO, et al.2017; MELLO *et al.*,2009). As fisionomias do Cerrado, dessa forma apresentam peculiaridades não distinguíveis facilmente em imagens de satélite, diferentemente de como classificadas em campo.

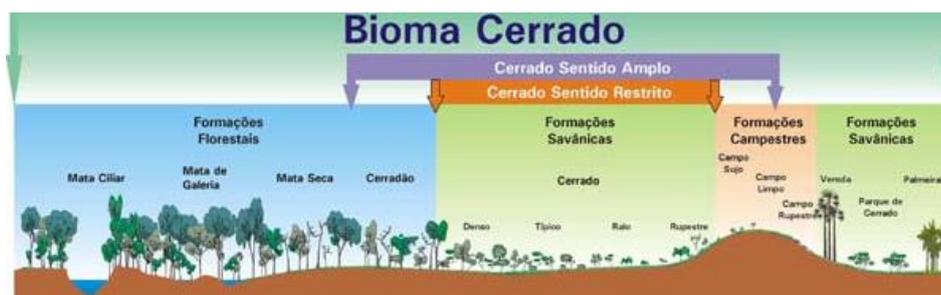


Figura 1. Fitofisionomias do bioma Cerrado. Fonte: Sena-Souza, et al. (2013). Ribeiro & Walter (2008).

3.3 Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da a umidade do solo

Segundo RICHARD; JIA (2006), a obtenção de imagens digitais por sensoriamento remoto (SR) ocorre em função da emissão de energia oriunda da superfície da Terra que pode ser mensurada a partir de um sensor, seguida da transmissão pela atmosfera por plataformas de sensoriamento remoto, conseguindo ao retorno dos dados de volta à superfície terrestre gerando produtos de imagem possíveis de utilização. Essa definição é essencial para compreender a complexidade do sensoriamento remoto como ciência e melhor compreensão de como ocorre a extração de dados dos mapas de paisagens gerados.

Os produtos de sensores remotos obtidos por satélite permitem a aquisição de informações sobre objetos terrestres sem que haja contato direto entre o sensor e o alvo. Ademais, é devido a radiação eletromagnética emitida e refletida que se possibilita quantificar a energia espectral dos objetos (MENEZES;ALMEIDA;2012) (Figura 2). Por isso a utilização de imagens de satélite possibilita o alcance espacial e realce nas modificações locais ou regionais, naturais ou antrópicas, bem como indicadores de qualidade da vegetação (GAMEIRO, et. al., 2016).

Os objetos imageados por sensores remotos são necessariamente obtidos por meio de medições da REM, para serem classificados produtos de SR, entretanto é importante ressaltar que imagens de satélite não são fonte exclusiva na obtenção de informação de SR, fotografias aéreas e imagens radiométricas são importantes ferramentas pertencente a classe dos produtos obtidos a partir de sensores remotos (GAMEIRO, et. al., 2016). Sensores remotos, são dispositivos utilizados para registrar dados de SR e são classificados em diferentes níveis – aéreos, orbitais, de campo ou de laboratório- capazes de detectar, em determinadas faixas do espectro eletromagnético, a REM oriunda de um objeto, e convertida em informações dos alvos de interesse da superfície terrestre (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

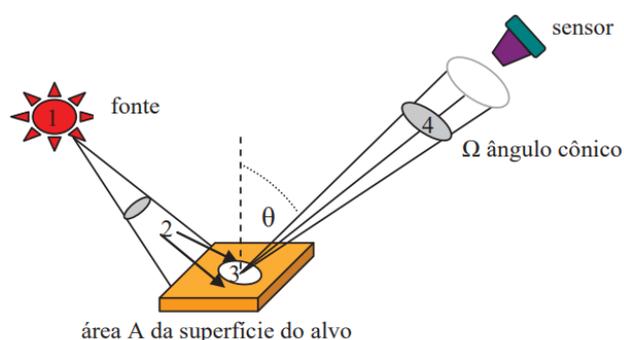


Figura 2. Componentes da trajetória da REM. Fonte: MENEZES; ALMEIDA (2012).

O SR tem sido fundamental, nas últimas décadas, na análise e monitoramento das modificações florestais, aplicações agrícolas e consequentemente na gestão e prevenção de desastres ambientais (ZHANG, T. *et.al.*,2017). Em função disso, as técnicas de SR atualmente fornecem meios altamente relevantes para a caracterização e monitoramento perto da superfície terrestre e estima θ de superfície e próximo à superfície com base nas técnicas de reflectância e emissão de radiação eletromagnética dentro do ótico, térmico, ativo e passivo, assim como em faixas de frequências de micro-ondas em várias escalas espaciais (BABAEIAN *et al.*, 2019).

As imagens oriundas de SR podem gerar dados representativos de θ devido a reflectância dentro do espectro visível demonstrando sua variação na vegetação, condições hídricas e propriedades do solo, onde os dados de θ podem ser obtidos principalmente a partir de informações das bandas espectrais (RIBEIRO, *et.al.*, 2020). Bandas espectrais podem ser definidas como produtos imageados por sensores, em diferentes comprimentos de ondas e, o nome da banda espectral, se refere à região do espectro onde a mesma está localizada (RIBEIRO, *et.al.*, 2020).

As imagens são obtidas principalmente, a partir das características de interesse nos dados de radar; características-alvo como rugosidade, topografia, constante dielétrica e cobertura vegetal, onde diversos estudos propõem a utilização de SR para dados representativos de θ em função das maiores escalas espacial e temporal atrelado a praticidade (LAKSHIMI, 2012; FONTANET, *et.al.*, 2018; INOCENCIO, *et. al.*, 2019).

A umidade do solo via satélite não é uma medição convencional direta, os dados são resultados de um processamento relacionado ao monitoramento da superfície da Terra via satélite, dessa forma a informação das bandas espectrais são convertidos em coeficientes para depois estimar a θ . Esses coeficientes são obtidos através de índices espectrais, muito utilizados, como parâmetro de informações biofísicas da vegetação (FONTANET, *et.al.* 2018).

O índice de diferença normalizada (NDVI) definido pela Equação 3, foi desenvolvido com a finalidade de identificar as condições da vegetação. Gerando um valor normalizado para o intervalo de -1 a +1 (RIBEIRO, *et.al.*, 2020). A relação do NDVI não é restrita a condições específicas da vegetação, mas em maiores escalas, o comportamento dos ecossistemas. Sendo restrito seu uso pelas condições atmosféricas, por exemplo, nuvens e aerossóis que afetam a qualidade dos produtos compostos e geram dados perdidos (BOKE-OLÉN, *et.al.*, 2018).

$$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \right)$$

Em que: NIR é a banda do infravermelho próximo e R corresponde a banda do vermelho.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) é definido pela Equação 4. Foi desenvolvido por Huete (1988) e como o NDVI utiliza as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, porém ajustado para o solo com o intuito de minimizar a interferência do efeito de brilho do solo. (SHIROMA, *et.al.*, 2019).

$$SAVI = \left(\frac{(1 + L) \cdot (\rho \text{ NIR} - \rho \text{ R})}{\rho \text{ L} + \rho \text{ NIR} + \rho \text{ R}} \right) \quad (4)$$

Onde: NIR = refletância na faixa do infravermelho próximo, R = refletância na faixa do vermelho e L = fator de ajuste (0,5).

De maneira análoga outros índices são gerados com o intuito de classificar o tipo de cobertura do solo, detectar mudanças ou avaliar a saúde da vegetação e culturas (EOS). Por isso, os parâmetros de interesse da vegetação podem, por tanto, ser obtidos pela razão direta de duas bandas espectrais, através do método Proporção Simples (RS) (Equação 5), ou (*Simple Ratio*) que consiste na divisão direta dos valores de pixel da banda NIR (banda 8- *Sentinel-2*) pela banda vermelha (banda 4 – *Sentinel-2*) (MONTEIRO, *et.al.*, 2013).

$$RS = \frac{B08 \text{ (infravermelho próximo)}}{B04 \text{ (vermelho)}} \quad (5)$$

$$RSg = \frac{B03 \text{ (verde)}}{B04 \text{ (vermelho)}} \quad (6)$$

$$RSsw = \frac{B11 \text{ (SWIR1)}}{B04 \text{ (vermelho)}} \quad (7)$$

As respostas da vegetação à proporção simples da reflectância de duas bandas dão-se pelo comportamento da vegetação quando interage com a REM, resultando numa curva espectral (Figura 3 à direita) onde comprimentos de onda na faixa do visível – azul e vermelho absorvem à clorofila gerando uma baixa reflectância, enquanto na banda verde a reflectância é mais alta pela

baixa absorção da REM. Similarmente o infravermelho próximo (NIR) apresenta na vegetação pouca absorção da radiação e alta reflectância significativa (TRINDADE, et.al., 2018).

As bandas espectrais do satélite Sentinel-2 (Figura 3 à esquerda; Figura 7) possuem comportamento associado à vegetação de baixa ou alta reflectância em função ao comprimento de onda da banda espectral, sendo assim a banda 11, bem como as bandas de alta reflectância como NIR respondem a proporção direta quando associada com uma banda de maior absorção como B04 (banda do vermelho – Sentinel-2)(tabela 2).

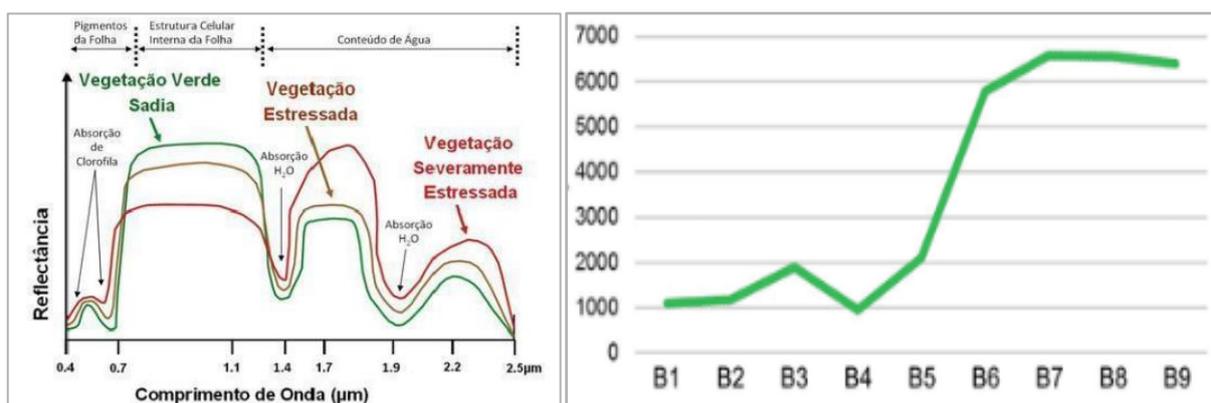


Figura 3. Assinatura espectral da vegetação

FONTE: à direita CAVALCANTE (2020); DEMATTÊ *et al.* 2020 à esquerda.

Em decorrência a resposta espectral da vegetação, Enterprise do Arcgis acrescenta a possibilidade de obter índices de um comprimento de onda por sua divisão direta também no método da Proporção Simples de Borda Vermelha (RSre). Consiste em um índice de vegetação para estimar a quantidade de vegetação saudável e sob estresse. Onde a proporção de luz espalhada no NIR é absorvida nas bandas de bordas vermelhas, o que reduz os efeitos da atmosfera e da topografia.

O estudo de Mello *et al.* (2009) desenvolveu a assinatura espectral para fisionomias do Cerrado, tendo em vista a heterogeneidade das paisagens, em satélite Landsat-5. As curvas demonstram diferenças entre a curva de Mata de Galeria das demais o que evidencia a variabilidade espectral dessa vegetação incluindo a dificuldade em classificá-la dentro das fitofisionomias apenas com as informações das bandas espectrais do sensor. As demais curvas relacionam a tendência natural dos comprimentos de onda associados a REM. Banda azul e vermelha com menor reflectância, verde, infravermelho próximo, médio e termal respondem a maior reflectância (Figura 4).

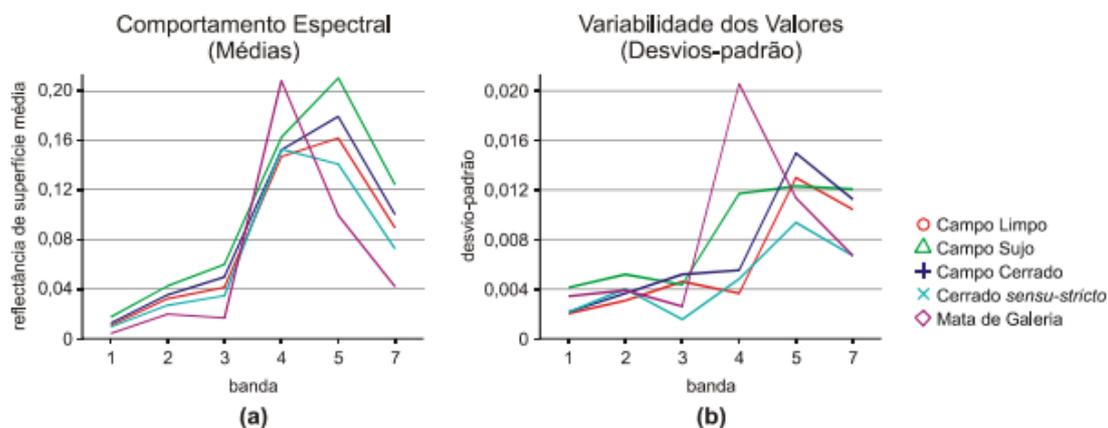


Figura 4. Curva espectral fitofisionomias do Cerrado. (a) valores médios de reflectância de superfície em cada banda do TM; (b) desvios-padrão dos valores de reflectância das amostras. Fonte: INPE (2009). Mello, *et al.*, (2009).

Os dados de sensoriamento remoto podem ser fonte exclusiva de informação disponível para o monitoramento de determinadas localidades, caso os dados de θ medidos em campo estiverem disponíveis, eles podem ser usados combinados com os dados de sensoriamento remoto para dados consistentes de θ . Para medições volumétricas da umidade do solo (θ_v) pode-se adotar índices como parâmetro indireto desses dados, sendo eles obtidos pelo algoritmo do pixel da imagem de satélite multiespectral (SAHA, *et al.*, 2019). RHEE *et al.* (2010) agrupou diferentes índices para obter dados de parâmetros biofísicos, a partir da correlação de cada variável bruta com análise de regressão. A maioria dos estudos empíricos tem usado índices de razão de banda ou modelos para relacionar variáveis baseadas na informação vegetacional com o teor de umidade medido em campo (QI. *et al.*, 2012).

As estimativas de θ a partir de sensoriamento têm sido estudadas por muitos anos, com progressos significativos. ZHANG; ZHOU, (2016) apresentam uma revisão sobre o tema, evidenciando diferentes abordagens para aprimoramento das estimativas de θ , com desenvolvimento de modelos estatísticos e modelos empíricos, evolução das bases teóricas da relação entre a umidade do solo e a reflectância da superfície e proposição de técnicas de validação em campo. ZHANG, *et al.* (2021) exemplificam os avanços na proposição de modelos ao propor índices de seca adaptados a partir do NDVI combinado com informação de temperatura do solo.

LIU, *et al.* (2002) destacaram que há um limite crítico de umidade do solo a partir do qual a refletividade aumenta à medida que umidade do solo aumenta. Um desafio amplamente considerado é reescalonar dados de umidade estimados em escala espacial menor para área

refinadas (MOHANTY; SKAGGS, 2001). SR fornece informações apenas sobre as condições médias de umidade dentro de um pixel. Como os sensores remotos fornecem apenas um valor por pixel, a extensão da variabilidade dentro do pixel afeta o quão bem a medida de sensoriamento remoto reflete as condições de umidade dentro do pixel e, portanto, afeta a utilidade dos dados de sensoriamento remoto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde à Fazenda Água Limpa ($47^{\circ}59'02,23''\text{W}$ - $47^{\circ}53'16,15''\text{W}$ e $15^{\circ}58'32,77''\text{S}$ - $15^{\circ}58'56,84''\text{S}$), fazenda experimental da Universidade de Brasília, com área total de 4.500 hectares e que integra Unidades de Conservação (UC's) - Área de Proteção Ambiental (APA) das Bacias do Gama e Cabeça de Veado e abrange APA do Planalto Cental e Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Capetinga Taquara (LACERDA et al., 2007) (Figura 5). Algumas fitofisionomias típicas do bioma Cerrado estão representadas na área de estudo, que contempla áreas antropizadas ocupadas por agricultura, silvicultura e pastagem. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima na região é tropical do tipo Aw, com precipitação média de 1.668mm e temperatura média de $21,1^{\circ}\text{C}$. Com relação à pedologia, Latossolos são predominantes, assim como em todo o Distrito Federal, sendo caracterizados pelos altos teores de óxidos de ferro e alumínio (REATTO et al., 2004).

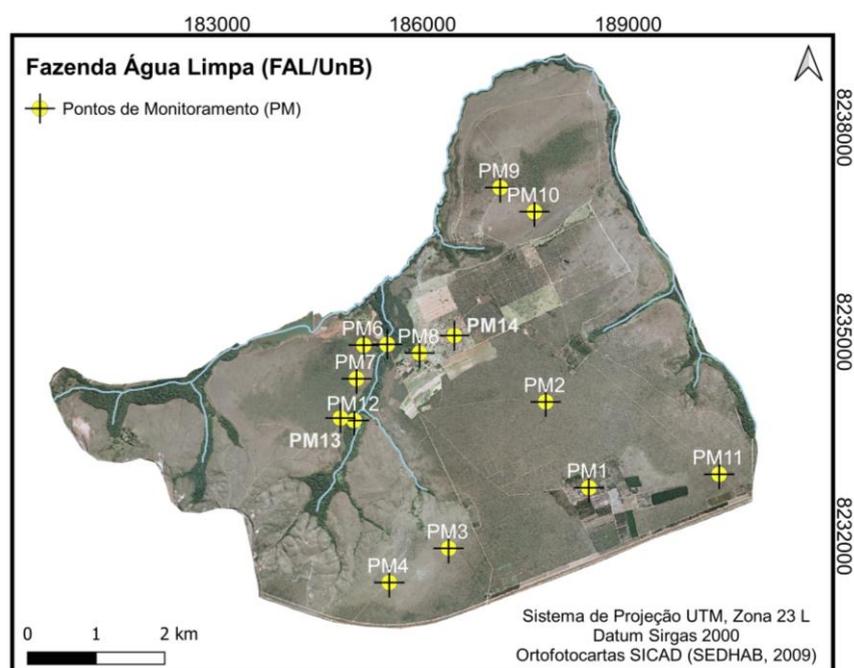


Figura 5. Pontos de monitoramento (PM) em fitofisionomias do Cerrado na Fazenda Água Limpa (FAL).

Os pontos de monitoramento (PM) foram instalados na FAL para medição direta em campo da θ (Figura 5). Com a finalidade de obter representatividade espacial do bioma Cerrado na área da FAL estabeleceu-se PM nas fitofisionomias de Cerrado sensu stricto, Mata de Galeria, Campo

sujo e Campo Limpo. E para maior abrangência da cobertura do solo aderiu-se também dois pontos sobre silvicultura, PM1 (Eucalipto) reflorestado com espécie de *Eucalyptus sp.*, e PM14 (Silvicultura) com à associação de plantio de *Gliricidia sepium* e capim-braquiária. PM8 (Pastagem) solo sob condições hidromórficas e atividade agropastoril (Tabela 1, Figura 6).

Tabela 1. Caracterização dos Pontos de Monitoramento FAL

PM	CS	Tipos de Solo	Nº Medições
PM1	Eucalipto	Latossolo (Lv/a)	07
PM2	Cerrado sensu stricto	Latossolo (Lv)	09
PM3	Campo Sujo	Latossolo (Lv)	06
PM4	Campo Limpo	Hidromórfico	04
PM5	Mata de Galeria	Hidromórfico	06
PM6	Cerrado sensu stricto	Latossolo (Lv/a)	06
PM7	Campo Sujo	Cambissolo	05
PM8	Pastagem	Hidromórfico	06
PM9	Cerrado sensu stricto	Latossolo (Lv/a)	03
PM10	Campo sujo	Cambissolo	03
PM11	Cerrado sensu stricto	Latossolo (Lv)	05
PM12	Mata de Galeria	Hidromórfico	07
PM13	Silvicultura	Latossolo v (Lv)	01
PM14	Cerrado sensu stricto	Latossolo (Lv/a)	05
Total	07	04	73

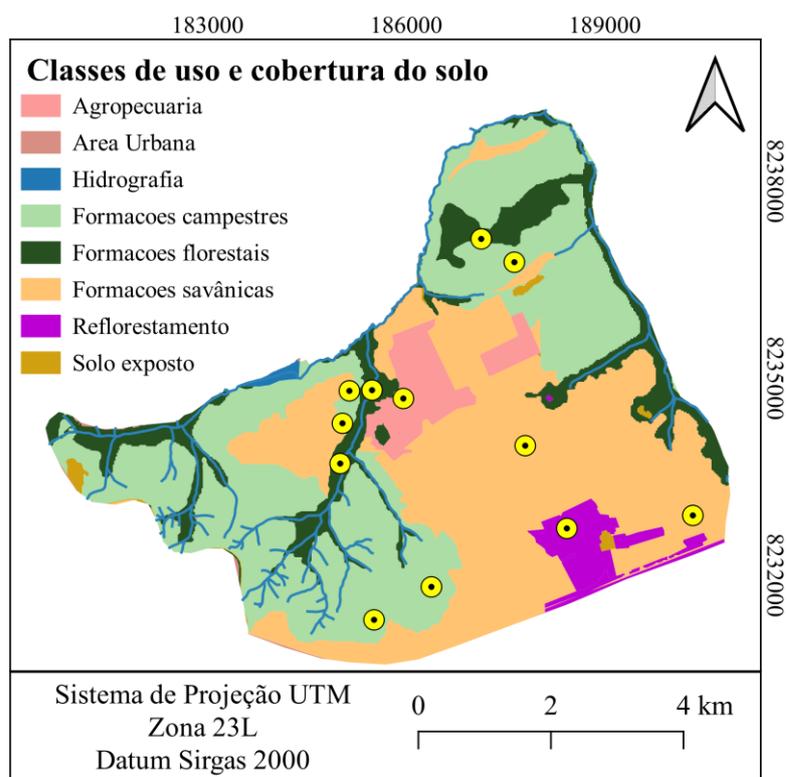


Figura 6. Classes de uso e cobertura do solo na Fazenda Água Limpa (FAL).

4.2 Metodologia

4.2.1 Aquisição de dados de θ em campo

Foram instalados quatorze (14) PM na FAL com visitas e medições mensais em cada ponto. Cada PM dos 14 pontos instalados em campo, foi demarcada uma unidade amostral (UA). Cada UA foi equipada com um tubo de acesso com 40 cm de diâmetro, para a leitura à sonda TDR modelo TRIME PICO IPH/T3-44, sendo constituído de policarbonato do tipo TECANAT.

O monitoramento da umidade do solo foi realizado entre setembro de 2019 e agosto de 2020. Para isso, utilizou-se sonda TDR modelo TRIME PICO IPH/T3-44, que possibilita a aquisição de dados de umidade em diferentes profundidades do solo. A aquisição de dados em profundidade requer a instalação de tubos de acesso constituídos de policarbonato do tipo TECANAT (Figura 7).

Ao todo, 14 pontos de monitoramento foram equipados com tubos de acesso para obtenção de dados entre 0-20 cm, representativos da umidade superficial do solo. As medições de θ_v com a sonda TDR foram realizadas com três repetições por PM. Vale ressaltar que o monitoramento em campo foi iniciado 15 dias após instalação do experimento, período mínimo necessário para estabilização dos equipamentos no solo.

A determinação da umidade volumétrica do solo juntamente com a análise das imagens por satélite, a partir do cálculo dos índices serão usados como comparativos com intuito de estimativa para θ' real'.

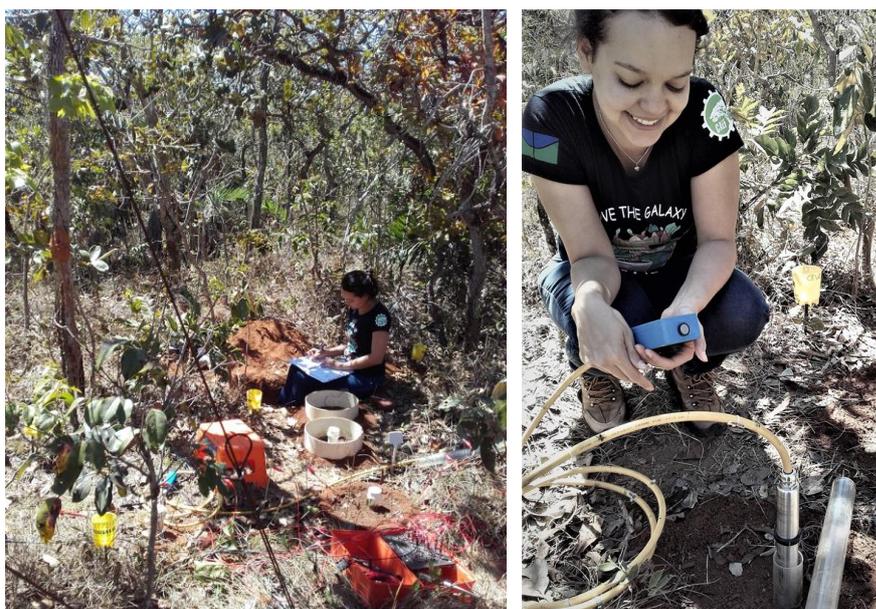


Figura 7. Dados da θ obtidos em campo na FAL/UnB.

4.2.2 Seleção e processamento das imagens de satélite representativas da Fazenda Água Limpa

Iniciada em 2014, a série Sentinel, programa de missões da Copernicus da European Space Agency (ESA), é referência na obtenção de dados de SR e deu continuidade em 2015, com o lançamento da missão Sentinel-2 (Tabela 2), com o objetivo de aquisições sistemáticas de imagens globais multiespectrais de alta resolução espacial, aliadas a uma alta frequência de revisita (ESA, 2015). Para a análise e interpretação dos dados de SR, as informações das bandas espectrais são fundamentais (Tabela 3). Paralelamente às resoluções espaciais que alcançam dez (10) metros, a contribuição do Sentinel-2 atinge competências inerentes ao monitoramento da vegetação, como no programa Global de Monitoramento e Segurança do Meio Ambiente (GMES) apoiando pela ESA (ZHANG, et. al., 2017).

Para o desenvolvimento do trabalho foram selecionadas inicialmente imagens dos satélites Sentinel-2 e CBERS-04A do Programa Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS), com lançamento em dezembro de 2019. As escolhas por esses produtos deram-se pela resolução espacial associadas a temporalidade, pois ambos os satélites forneciam produtos com resolução das imagens multiespectrais que variam, nas escalas finas, de 2 metros (pancromática) a 16,5 metros (CBERS-4A) e de 10 a 20 metros (Sentinel-2) em função da banda espectral adotada (INPE).

Tabela 2. Especificações técnicas do satélite Sentinel-2

Órbita	786 Km, Síncrona com o Sol, 10:30 a.m
Alcance Espectral	0.43 – 2.28 μ m
Cobertura Espectral	290 Km de faixa imageada
Resolução Espacial	10m (4 bandas), 20m (6 bandas), 60m (4 bandas)
Cobertura de Repetição	10 dias, 5 dias no Equador
Quantização	12 bits/pixel

Fonte: ESA (2017).

Tabela 3. Designação das bandas espectrais do satélite Sentinel-2

N° da Banda	Nome da Banda	Comprimento de onda (micrometros)	Resolução Espacial (metros)
B01	Aerossols (Aerossol)	0.43 – 0.45	60
B02	Blue (Azul)	0.46 – 0.52	10
B03	Green (Verde)	0.54 – 0.58	10
B04	Red (Vermelho)	0.65 – 0.68	10
B05	Red Edge 1 (Borda do vermelho 1)	0.7 – 0.71	20
B06	Red Edge 2 (Borda do vermelho 2)	0.73 – 0.75	20
B07	Red Edge 3 (Borda do vermelho 3)	0.76 – 0.78	20
B08	NIR (Infravermelho próximo)	0.78 – 0.90	10
B08A	Red Edge 4 (Borda do vermelho 4)	0.85 – 0.87	20
B09	Water Vapor (Vapor d'água)	0.93 – 0.95	60
B10	Cirrus	1.36 – 1.39	60
B11	SWIR1	1.56 – 1.65	20
B12	SWIR2	2.10 – 2.28	20

Fonte: ESA (2017).

Contudo, as etapas seguintes foram realizadas priorizando as imagens do Sentinel-2 em virtude do lançamento do satélite CBERS- 4A ter iniciado posterior aos dias em que foram realizados os levantamentos de umidade do solo *in situ* na FAL/UnB, conjuntamente as poucas imagens disponíveis desse satélite para os dias de coleta em campo. Ainda assim, ambos os produtos desses satélites foram classificados como aptos na estimativa de umidade do solo devido ao maior nível de detalhamento da área, em função da alta resolução espacial, para o monitoramento de áreas com menor escala espacial.

Os produtos do satélite Sentinel-2 foram adquiridos da base de dados do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais). O pré-processamento das imagens e cálculo dos índices foram obtidos utilizando o software livre QGIS 3.16.16 e o Excel (2010). Segundo estudos de GAO *et al.*, (2017) a alta resolução de produtos Sentinel-2 associados a ampla cobertura temporal fornece dados confiáveis de θ . Sendo assim, foram utilizadas as bandas espectrais – B03, B04, B08 e B011 – com resolução espacial de 10 e 20 metros e com revisita do satélite de 5 dias conforme apresentadas na Tabela 2 e 3 (Figura 7). As bandas foram adquiridas com a correção geométrica e radiométricas do tipo de produto nível 2A, com (100 x 100 km) na projeção UTM/WGS84 (ESA) com o auxílio do Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), no software QGIS.

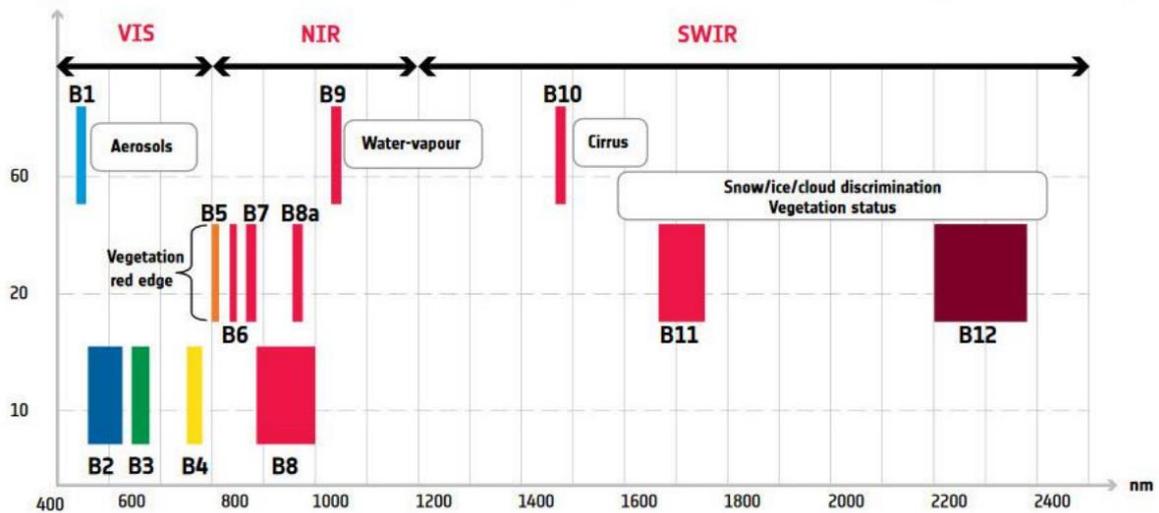


Figura 8. Resolução espacial das bandas do Sentinel-2. Fonte: Copernicus (2018).

4.2.3 Relação entre os dados de θ obtidos em campo e os dados de SR

Os produtos imageados das bandas foram primeiramente georreferenciados para projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator; DATUM - SIRGAS 2000; zona 23 hemisfério sul, em seguida atribuiu-se os valores referentes aos pixels das imagens aos pontos de monitoramento pela ferramenta (*Add raster value to factors*). Os índices foram calculados pela extração dos valores da tabela de atributos do QGIS exportados para a tabulação dos dados no Excel (2010), analisados posteriormente pela linguagem R.

Os índices calculados para esse estudo foram NDVI (Equação 3); SAVI (Equação 4); bem como os índices gerados a partir da razão direta de duas bandas espectrais RS (Equação 5); RSg (Equação 6) e RSsw (Equação 7) em função à resposta das bandas espectrais frente a reflectância, ou seja, é a razão de uma banda espectral que absorve por uma que reflete. O uso de RS em estimativas da θ é eficiente devido a diminuição dos ruídos e influências da atmosfera sobre os dados de SR (REBOUÇAS, *et al.*, 2019; MAFFRA, 2004; ACIOLLY *et al.*, 2002).

Os índices EVI (Índice de Vegetação), NDWI (Índice da Água por Diferença Normalizada), MNDWI versão modificada do NDWI e NDMI (Índice de Umidade de Diferença normalizada) foram avaliados para esse estudo, porém as estimativas não foram incluídas nos gráficos e mapas por baixa correlação com a umidade em campo.

O modelo ajustado foi obtido da relação dos índices com os dados de θ em campo de modo a ser bem representativo para estimar θ . Um conjunto de dados referente a quinze (15) imagens de

SR foram relacionados com os dados de 73 pontos de θ (tabela 1) o qual ajustaram um modelo significativo para a diferenciação dos tipos de fisionomias e coberturas do solo.

Dados foram analisados por meio da linguagem estatística e de programação R. Por meio da função `lm` do pacote `stats` foi possível elaborar modelos de regressão linear com os valores de θ em função dos dados derivados das bandas do Sentinel. O pacote `Ggplot2` possibilitou elaborar gráficos de dispersão para representação e análise dos modelos lineares.

Para avaliar os modelos de regressão linear propostos, adotaram-se os valores de R^2 e p-valor. O coeficiente de determinação (R^2) indica a qualidade do ajuste do modelo, numa escala entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior a capacidade do modelo em explicar a variância da variável dependente (θ) a partir da variável preditora (dados de SR). O p-valor, por sua vez, indica a importância da variável preditora para o modelo. Desse modo, variáveis predictoras que resultam em valores reduzidos de p-valor ($p < 0.05$) são significativas para explicar o comportamento da variável dependente.

A geração dos mapas de uso e cobertura do solo para os índices espectrais e para os dados de umidade do solo estimados foi feita através da calculadora raster no QGIS em composição colorida para sete (7), classes de valores e cores, para diferenciação das respostas dos parâmetros analisados frente à vegetação.

4.2.4 Validação do modelo proposto e análise da viabilidade de estimativa da umidade do solo a partir de SR

O modelo linear proposto para estimativa da umidade do solo a partir dos dados de sensoriamento remoto foi avaliado por meio de validação cruzada, com o pacote `Caret` (KUHNS, 2022), do programa R. O conjunto total de dados (73 amostras) foi subdividido em amostras de treino (80% do conjunto total, 59 amostras) e de teste (20% restantes do conjunto total, 14 amostras). O conjunto de amostras de treino possibilitou aplicar a validação cruzada pelo método K-grupos, a exemplo de GUEVARA;VARGAS (2019), SUNGMIN;ORTH (2021) e PHINZI *et al.* (2021).

Dados de treino foram então subdivididos aleatoriamente em dez subconjuntos com quantidade igual de amostras. Desses dez subconjuntos, nove (90% das amostras de treino) possibilitaram o treinamento do modelo, enquanto a amostra remanescente (10% das amostras de treino) foi utilizada para validação dos modelos gerados. Esse arranjo de amostras resultou em dez modelos, dentre os quais selecionou-se aquele que apresentou maior correlação e menor erro entre

dados de umidade do solo observados em campo (y_j) e preditos pelo modelo (\hat{y}_j). A correlação foi avaliada com base no coeficiente de determinação (R^2), enquanto o erro do modelo foi estimado pela Equação 8, a partir da métrica de raiz do erro quadrático médio (RMSE: root mean squared error).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$

(8)

Estimativas de umidade do solo obtidas a partir do modelo selecionado na etapa de treino foram comparadas com dados reservados ao grupo de teste. Isso possibilitou a avaliação final do modelo proposto, com base nos valores de R^2 , RMSE, p-valor e nos intervalos de confiança (2,5% e 97,5%) para a predição da umidade do solo com base no sensoriamento remoto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Umidade do solo em diferentes classes de uso e cobertura do solo no Cerrado obtidos pelo monitoramento na FAL

Dados de campo indicaram valores médios de θ mais elevados e com maior amplitude na mata de galeria ($0.20 \pm 0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$), seguindo-se pela pastagem ($0.16 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$), cerrado sensu stricto ($0.15 \pm 0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$), campo sujo ($0.13 \pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$), eucalipto ($0.11 \pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e campo limpo ($0.10 \pm 0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$), entre 0-20 cm de profundidade (Figura 9). Para a silvicultura (PM13), houve apenas uma medição compatível com os dados obtidos por sensoriamento remoto, indicando θ igual à $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Os valores de pastagem superiores às formações nativas podem ser atrelados as características específicas do ponto, como a associação ao solo hidromórfico. O campo limpo, por outro lado, apresentava limitações de medição em campo, devido a presença de cascalho na borda do tubo de medição.

A comparação entre as diferentes classes de uso e cobertura do solo possibilitou identificar que, exceto pelo campo limpo, as demais fitofisionomias nativas do Cerrado apresentam valores médios de umidade do solo maiores que o ponto de monitoramento em área de eucalipto. Há evidências de que a substituição da cobertura nativa do solo pelo eucalipto intensifica as perdas de água devido à alta demanda transpirativa (LIU *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2020) e/ou a capacidade de reduzir a taxa de infiltração da água da chuva, uma propriedade descrita como repelência à água (RIEGER *et al.*, 2016; ZAVALA *et al.*, 2014).

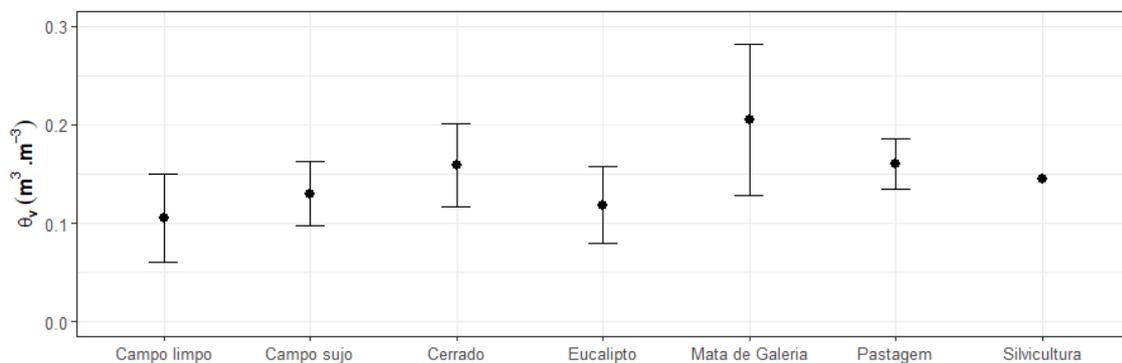


Figura 9. Umidade volumétrica do solo em coberturas e fisionomias do Cerrado na FAL

5.2 Relação entre os dados de umidade do solo e de SR

Modelos de regressão lineares estabelecidos entre os dados de θ e de SR (índices de vegetação e razões de bandas) demonstraram relações significativas (Figuras 10, 11, 12). Apesar dos valores do coeficiente de determinação (R^2) inferiores a 0.5, houve significância em todos os modelos, considerando p-valor ao nível de 0.001 (tabela 4). Isso indica a possibilidade dos dados obtidos por meio dos índices de vegetação (NDVI e SAVI) e da razão entre bandas (B3/B4, B8/B4 e B11/B4) explicar o comportamento da θ .

Dentre os modelos propostos, θ em função da razão entre as bandas B3 e B4 apresentou métricas mais adequadas de ajuste ($R^2 = 0.36$, p-valor < 0.001). O R^2 adequado que melhor explica duas variáveis apresenta no mínimo 0.5, entretanto o índice pôde ser considerado significativo devido p-valor menor que 0.01. A interação da vegetação com a radiação no comprimento de onda equivalente à B3 (verde) e B4 (vermelho) resulta em respostas de reflectância e absorção, respectivamente.

Considerando os modelos lineares por classe de uso e cobertura do solo pode-se salientar maior capacidade de explicação da variância por parte de modelos elaborados para classes com predomínio de espécies herbáceas (campo limpo), seguindo-se das classes com espécies arbustivas. Em detrimento as respostas de θ para fisionomias campestres sugere-se uma melhor aplicação do modelo a esse padrão vegetacional em detrimento às fisionomias de coberturas florestais, entretanto para essa validação são necessários maiores números de medições de θ .

Devido à quantidade limitada de dados por classe de uso e cobertura do solo, após processo de seleção das imagens disponíveis pelo satélite Sentinel-2 sem interferência de nuvens, optou-se por adotar o modelo de regressão linear com o conjunto total de PM.

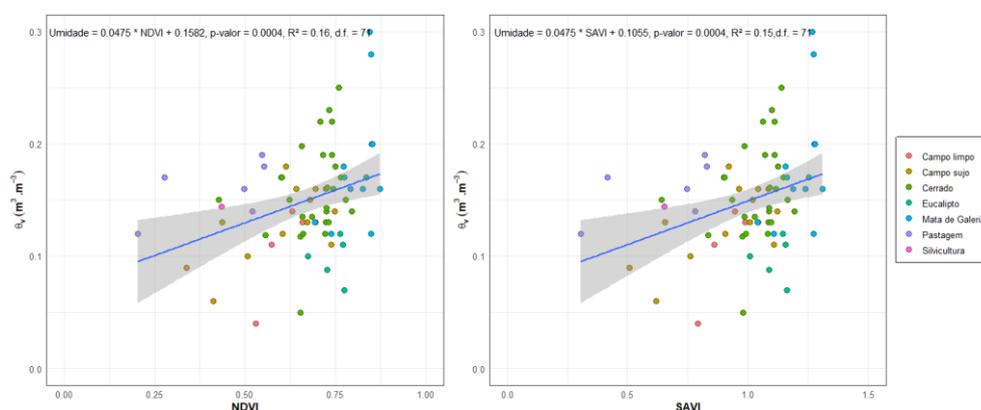


Figura 10. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados dos índices de vegetação (NDVI e SAVI).

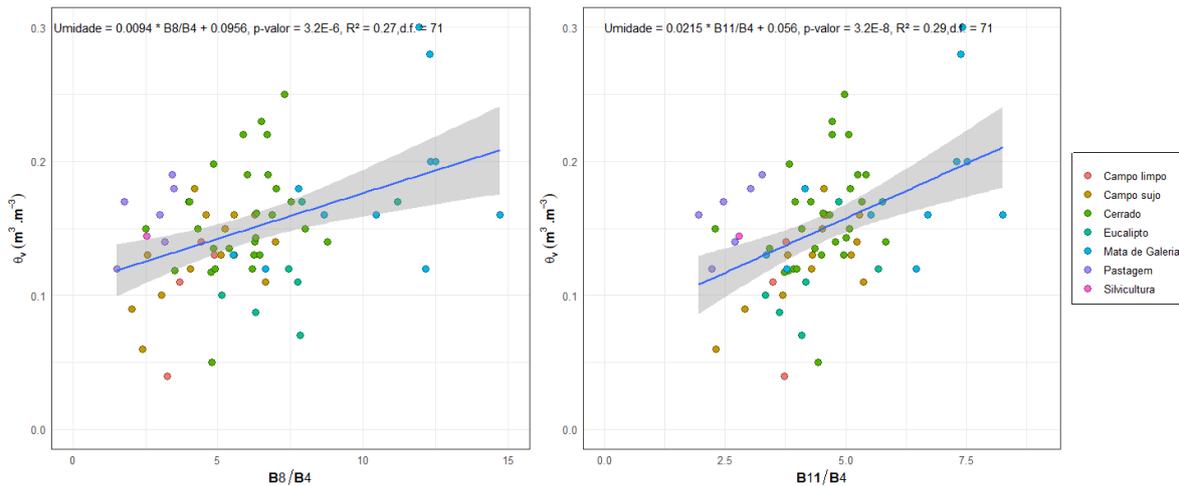


Figura 11. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre as bandas B8 e B4 (à direita); B11 e B4 (à esquerda).

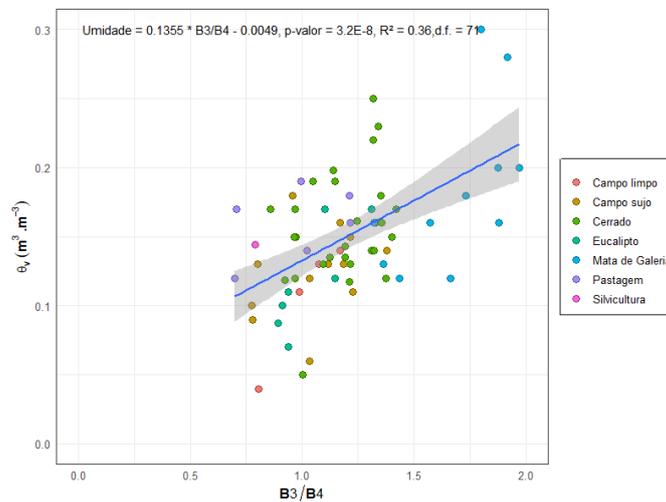


Figura 12. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre as bandas B3 e B4.

O índice NDVI diferenciou-se do SAVI, gerando mínimos e máximos de 0,20 e 0,87 para o NDVI e de 0,31 e 1,31 para o SAVI. Ainda que visualmente a reta apresente um comportamento similar, o NDVI gerou uma amplitude de variação de 0,66 associado a um R^2 pouco maior com 0,16 (Figura 10). Na correlação com os dados de θ medidos em campo, o NDVI mostrou-se melhor quando comparado com o índice SAVI para estimativa da θ .

Entre as fitofisionomias é possível verificar uma maior distribuição dos pontos de mata de galeria pelo gráfico dos índices NDVI e SAVI (Figura 10), bem como a maior concentração dos pontos próximos a reta do campo sujo. Sugere-se que algumas fitofisionomias com grande amplitude de variação como a mata de galeria e possivelmente formações florestais do Cerrado

sejam analisadas individualmente com um método de caráter mais específico (SHIROMA, *et al.*, 2019).

Ainda que o índice denominado RS que é a razão das bandas B8/B4 seja mais utilizado na literatura, inclusive a base para o NDVI e o SAVI, e tenha se mostrado bem representativo, o gráfico gerado nesse estudo mostrou que a razão B11/B4 resulta em R^2 ainda mais significativo. A explicação pode estar relacionada a variação dos dados onde o índice B11/B4 variou 6,31 contra 13,21. Ou seja, a variação dos dados do B8/B4 foi o dobro da ocorrida no índice de teste. Seguindo a mesma análise o índice da razão B3/B4 varou entre o mínimo e o máximo 1,21. Essa relação não pode ser analisada isolada, porém associada aos dados de θ em campo (Figura 11 e 12). Para os índices EVI, NDWI, MNDWI e NDMI os R^2 foram 0,1624; 0,08; 0,002; 0,1474, respectivamente.

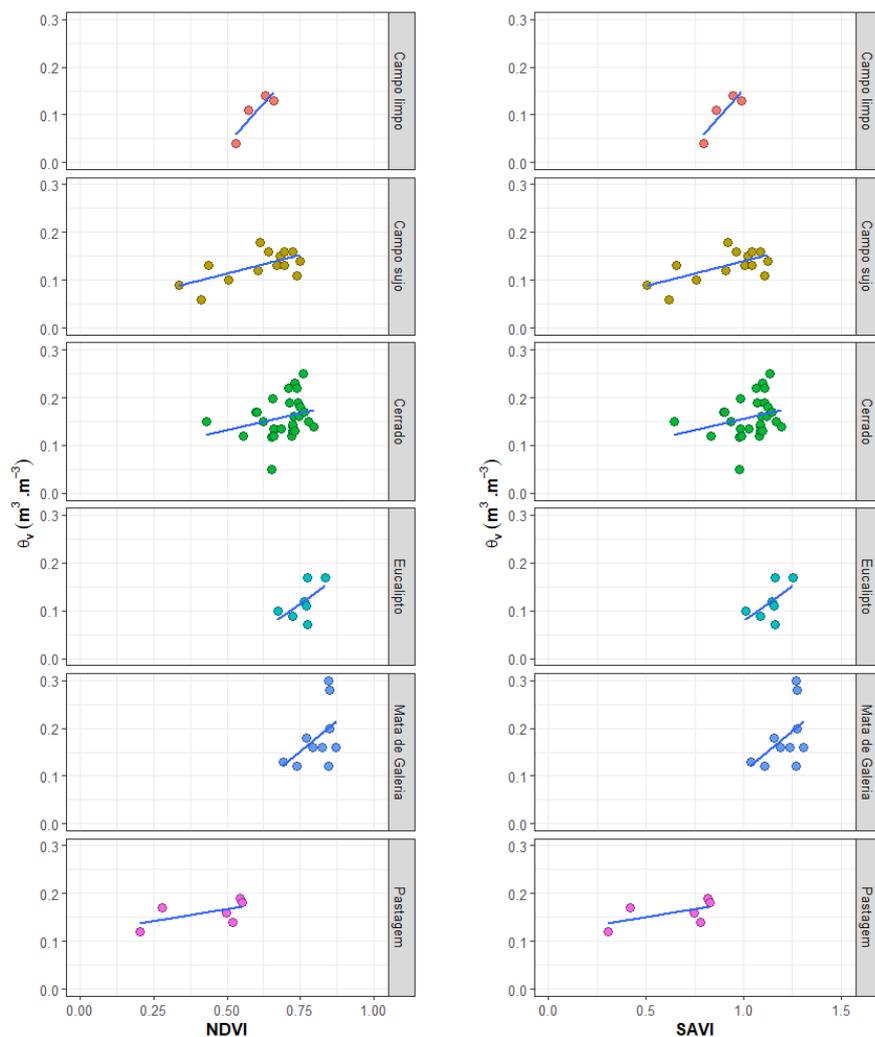


Figura 13. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados dos índices de vegetação (NDVI e SAVI) para cada classe de uso e cobertura do solo

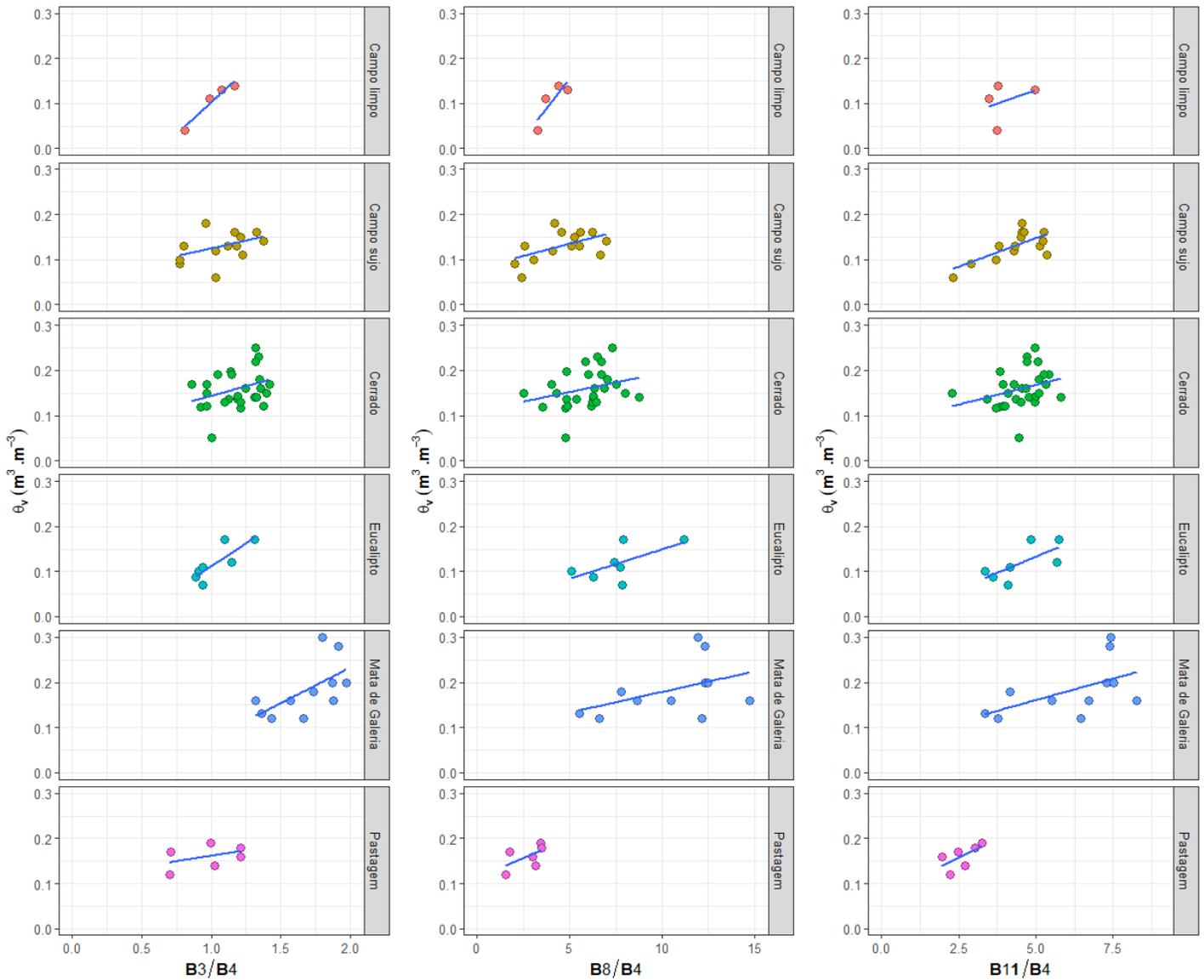


Figura 14. Modelo de regressão linear entre os dados de umidade do solo e os dados derivados da razão entre bandas para cada classe de uso e cobertura do solo.

Tabela 4. Relação (R^2) entre os dados de umidade do solo e os dados derivados de SR para cada classe de uso e cobertura do solo.

CS	NDVI	SAVI	B8/B4	B3/B4	B11/B4
Campo limpo	0,79	0,79	0,72	0,94	0,12
Campo sujo	0,40	0,40	0,29	0,17	0,49
Cerrado	0,07	0,07	0,08	0,11	0,09
Eucalipto	0,32	0,32	0,39	0,68	0,49
Mata de Galeria	0,27	0,27	0,24	0,23	0,28
Pastagem	0,35	0,35	0,34	0,18	0,39

Fonte: Autor

5.3 Validação do modelo proposto e análise das estimativas de umidade do solo a partir de SR

O modelo linear treinado pelo método de validação cruzada K-grupos forneceu estimativas significativas de θ a partir da razão entre as bandas B3 e B4 ($R^2 = 0.348$, $RMSE = 0.046$ e $p\text{-valor} = 8.67e-7$). Desse modo, após a seleção do modelo mais adequado (menor valor de RMSE e valor elevado de R^2S) resultante da etapa de treino, procedeu-se com a estimativa da umidade do solo a partir dos dados de B3/B4 e a comparação da umidade predita ($\theta_v b3/b4$) com a umidade observada em campo ($\theta_v obs$). Essa comparação indicou a possibilidade de utilização dos dados obtidos a partir das bandas b3 e b4 das imagens Sentinel para estimativa da umidade do solo entre 0 e 10 cm de profundidade (Figura 15, Tabela 5).

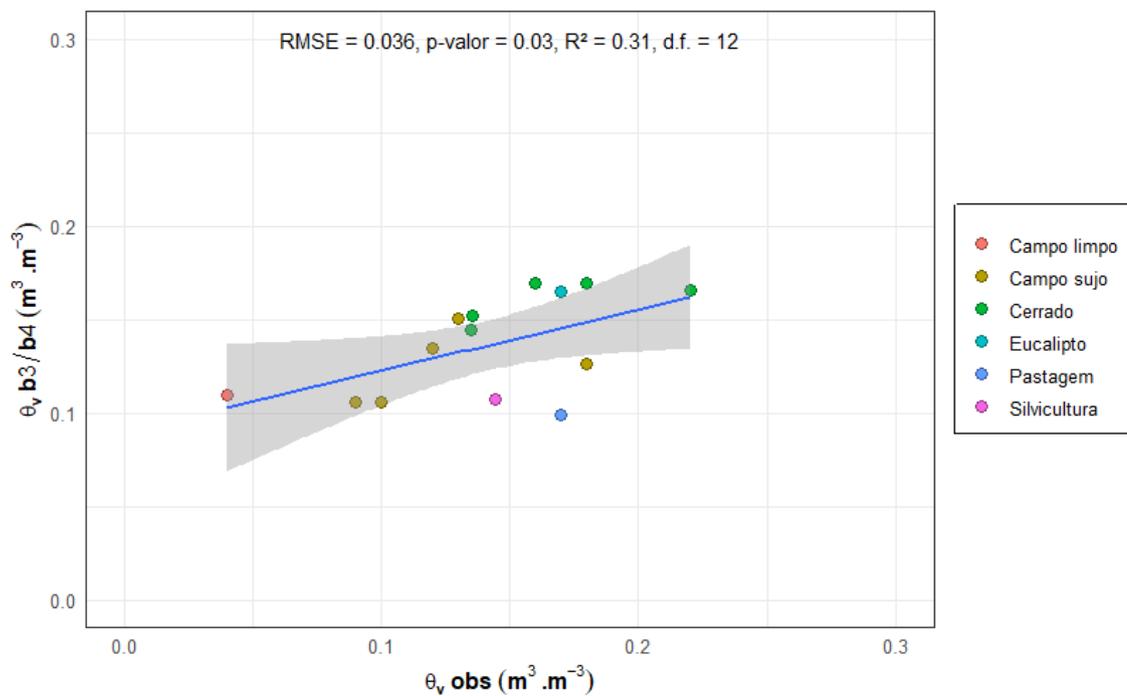


Figura 15. Correlação entre os dados de umidade do solo monitorados em campo e estimados a partir do modelo linear avaliado por meio de validação cruzada K-grupos.

Tabela 5. Valores preditos de umidade do solo a partir do modelo linear proposto na validação cruzada K-grupos e seus respectivo e intervalo de confiança (2.5 – 97.5%)

θ_v B3/B4 (m³/m³)	Limite inferior (2.5%)	Limite superior (95.7%)
0.1093	0.0882	0.1305
0.1061	0.0840	0.1282
0.1061	0.0839	0.1282
0.1344	0.1198	0.1489
0.1260	0.1095	0.1425
0.1507	0.1386	0.1628
0.1516	0.1396	0.1637
0.1441	0.1313	0.1570
0.1654	0.1532	0.1776
0.1697	0.1570	0.1824
0.1691	0.1565	0.1817
0.1647	0.1525	0.1769
0.0986	0.0742	0.1231
0.1074	0.0857	0.1291

Fonte: Autor

No mapa da Figura 16 temos a espacialização do índice B3/B4. As imagens são referentes ao mês de dezembro de 2019, acima, e julho de 2020, abaixo, período de chuva e seca, respectivamente. Foi possível observar variações nos valores do índice B3/B4 para a área da FAL, especialmente nas áreas cobertas por cerrado e campo limpo. Em contrapartida, áreas com ocorrência de mata de galeria, localizadas próximas a cursos d'água, não apresentaram variações perceptíveis visualmente.

É onde corresponde valores mais altos do índice para o mês de julho, na mata de galeria 1,57 referente ao ponto PM12. O valor mínimo ficou em 0,71 em cobertura de pastagem, PM8, tratando-se de um ponto associado a um solo Hidromórfico, onde o uso e cobertura do solo podem influenciar na perda de água em períodos de seca. Os menores valores do índice foram pastagem, seguido de campo sujo e silvicultura para julho de 2020. A mínima para o mês de dezembro correspondeu a 0,98 e a máxima 1,97 para um campo limpo e mata de galeria, respectivamente.

No mapa da figura 17, observa-se o resultado da aplicação do modelo de estimativa da θ associado ao índice B3/B4, que apresenta diferenciação na seca e na chuva. O teor máximo de θ em resposta ao índice foi de 0,26 m³.m³ para o período chuvoso que corresponde ao mês de dezembro de 2019 (imagem à direita) e o teor mínimo 0,12 m³.m³, enquanto a mínima e máxima para julho de 2020 e dezembro de 2019 ficou em 0,09 m³.m³ e 0,21 m³.m³, respectivamente.

Em ambos os meses os valores máximos são atribuídos ao tipo de paisagem de mata de galeria, enquanto os valores mínimos estão associados a cobertura de pasto. Como verifica-se no mapa a mata de galeria mantém o nível de umidade elevado, enquanto algumas áreas sofrem grave perda de umidade com a sazonalidade. Além da cobertura de pastagem, campo sujo e campo limpo tiveram teores de umidade em julho de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$ para PM3 e PM10 (campo sujo) e $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$ PM4 (campo limpo).

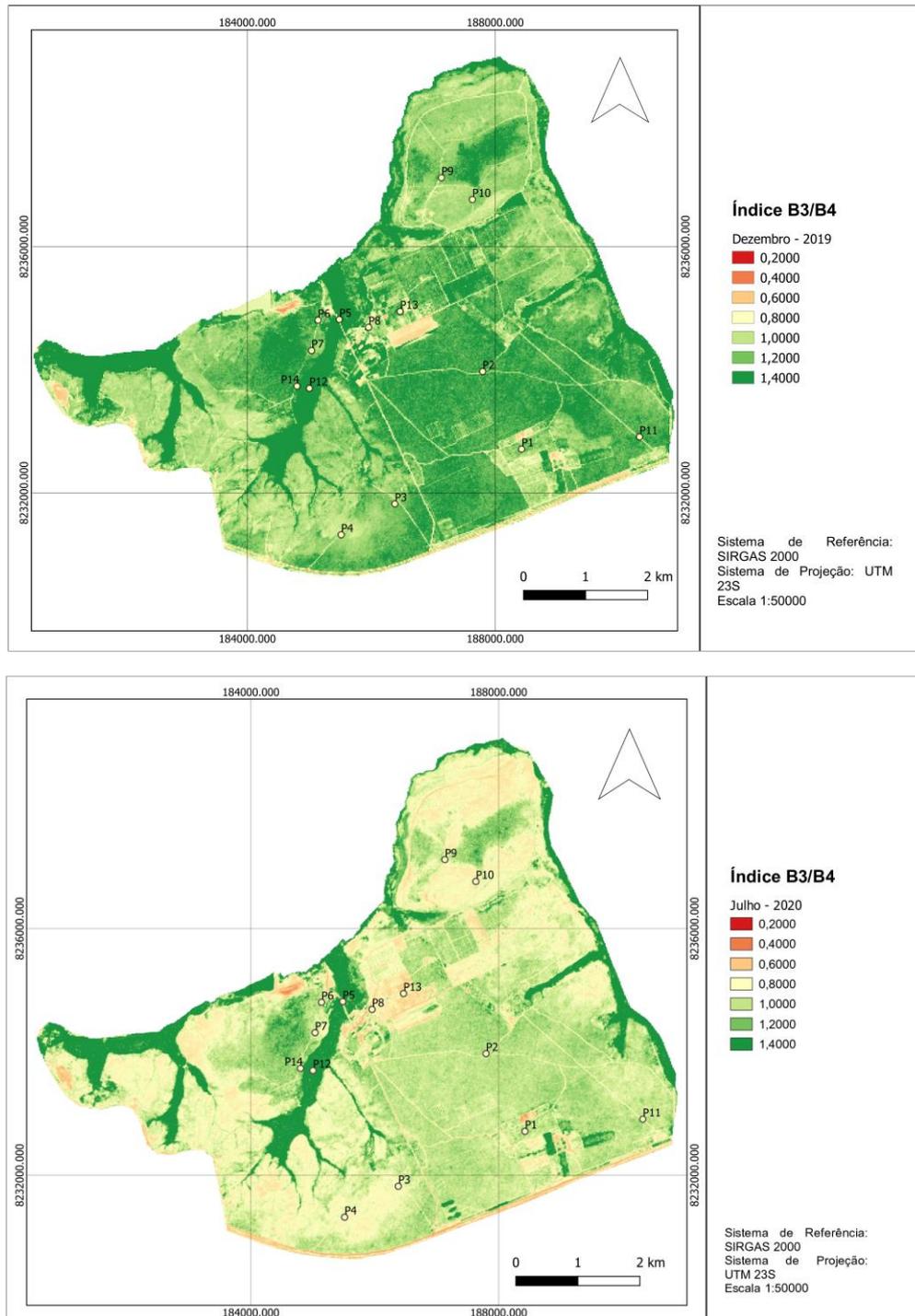


Figura 16. Mapas do índice RSg (razão entre as bandas espectrais B03 e B04)

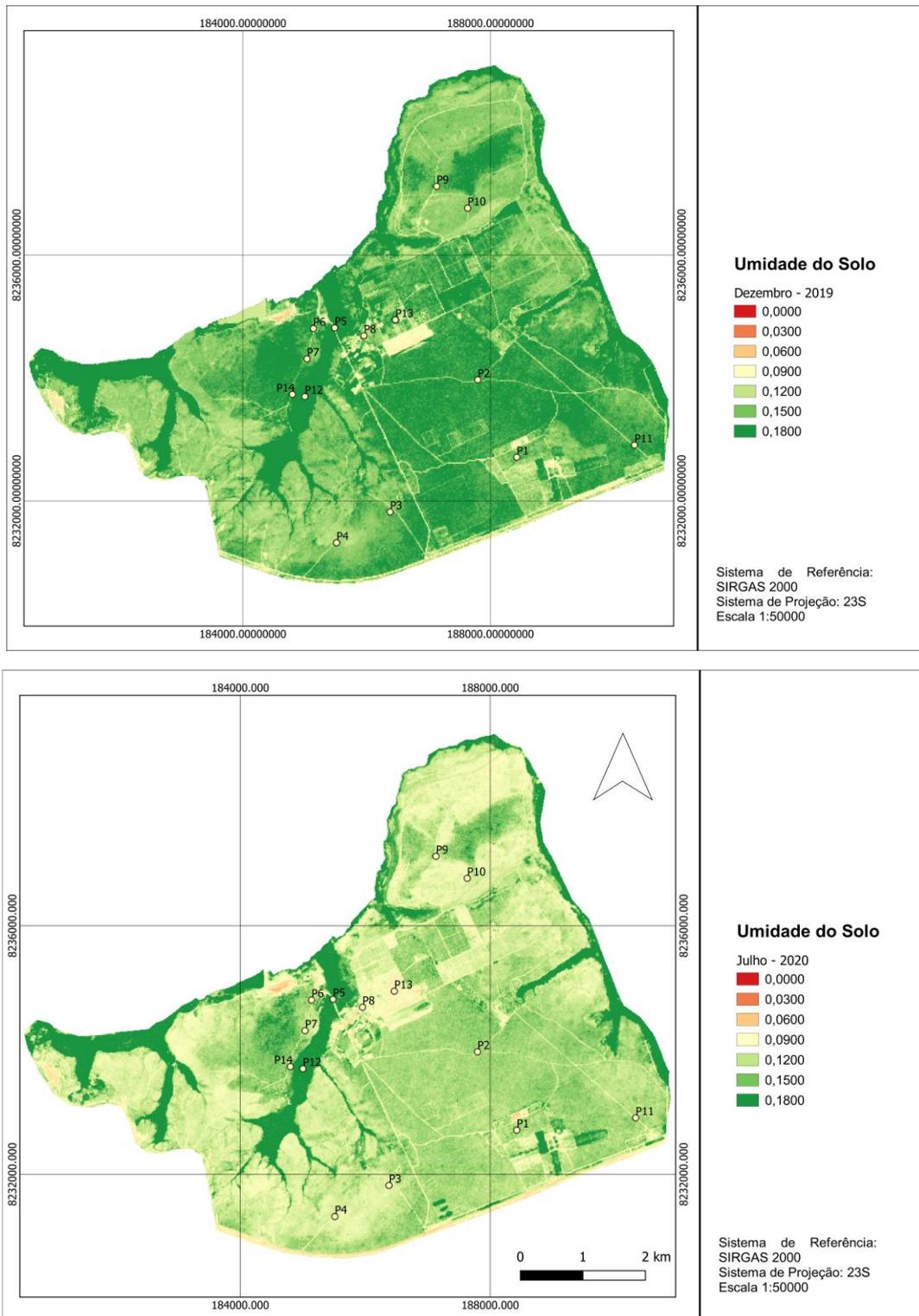


Figura 17. Mapas de umidade do solo FAL estimada a partir do modelo proposto com valores da razão B3/B4.

6 CONCLUSÕES

Técnicas de campo tradicionais integradas com dados de SR possibilitam avaliar a umidade do solo sob diferentes condições de uso e cobertura do solo no Cerrado. Dados de campo indicaram valores mais elevados de umidade do solo sob coberturas nativas, exceto pelo campo limpo; e na pastagem para coberturas não nativas. Para comparação com dados de sensoriamento remoto, selecionaram-se imagens Sentinel-2A, que apresentaram resolução temporal (mensal), espacial (10-20 m) e espectral adequadas para o estudo na FAL.

Modelos de regressão linear da θ em função dos dados extraídos do Sentinel (NDVI, SAVI, B3/B4, B8/B4 e B11/B4) indicaram significância nas relações ao nível de p-valor inferior à 0.001. Porém, o modelo proposto com a razão B3/B4 como variável preditora indicou maior capacidade de explicação de θ ($R^2 = 0.36$) e foi selecionado para etapas de validação e estimativa da θ para a FAL. Por meio da validação cruzada, o modelo apresentou-se adequado para estimativa da umidade do solo.

Entre as coberturas do solo apesar da insuficiência na quantificação por categoria, o modelo indicou relevância nas áreas de pastagem e campestres, fomentando a necessidade de ampliação do monitoramento. A formação florestal de mata de galeria apesar de manter a umidade durante a sazonalidade sugere ferramentas específicas de sensoriamento remoto para identificação adequada.

A aplicação do modelo linear derivado de B3/B4 para as imagens Sentinel-2A dos meses de dezembro/2019 (chuva) e julho/2020 (seca) evidenciou padrões de variação da umidade do solo entre as classes de uso e cobertura do solo nas estações, especialmente para as áreas de Cerrado sensu stricto e campo. Por fim, verificou-se possibilidade de utilização de SR para estimativa da umidade do solo no Cerrado.

7 REFERÊNCIAS

- ACIOLLY, L.J. de O.; PACHECO, A. COSTA, T. C. C. da; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. de. **Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT**. Gestão e Controle Ambiental, Rev. bras. eng. agríc. ambient. 2002, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300019>.
- AKIYAMA, T. S.; MARCATO JUNIOR, T.; TOMMASELLI A. M. G. **Correção Geométrica de Imagens CBERS-4/PAN com Modelos Generalizados Usando como Referência Dados do Sistema Nacional de Gestão Fundiária**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 41 - 2 / 2018, p. 358-368, http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_358_368.
- BABAEIAN, E.; SADEGHI, M.; JONES, S.B. **Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture**. 2019, <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>.
- BARROSO, M. **Exploração do Cerrado: o impacto que está na mesa**. WWF (2016). Disponível <<https://www.wwf.org.br/?53402/Explorao-do-Cerrado-o-impacto-que-est-na-mesa>> Acesso: 02 de abril de 2022.
- BOKE-OLEN N., Ardö J.; Eklundh L.; Holst T.; Lehsten, V.; **Remotely sensed soil moisture to estimate savannah NDVI**. PLoSONE13(7): e020032. 2018.
- BHOGAPURAPU, N.; DEY, S.; HOMAYOUNI, S. **Field-Scale Soil Moisture Estimation Using Sentinel-1**. GRD SAR Data. DOI: 10.1016/j.asr.2022.03.019. 2022.
- CARVALHO, Carolina; ALMEIDA-FILHO, R. **Temporal landsat TM series analysis to evaluate desertification process and its causes and effects, Piauí state, northeast of Brazil**. In: IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2009.
- CAVALCANTE, A. da S. I. **Análise qualitativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) extraído a partir de imagens rapideye e utilizando-se de software livre. Estudo de caso município de São Miguel dos Campos/AL**. Abril 2016, orientador: Helio Fábio Barros Gomes. DOI:10.13140/RG.2.2.28241.43363
- COPERNICUS. **El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial**. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea mediante acuerdo, 2018, SI2.810140/04.
- CREDITO à **Monitoramento ambiental do Cerrado é estratégico, dizem especialistas**. Jornal da Ciência, ano 2022. Disponível em <

- <http://portal.sbpcnet.org.br/noticias/monitoramento-ambiental-do-cerrado-e-estrategico-dizem-especialistas/> Acesso em 19/04/2022.
- DEMATTÊ, J. A. M.; POPPIEL, R. R.; SILVEIRO, N. E. Q.; BELLINASSO, H. A. **Importância das Geotecnologias na Caracterização do Meio Físico com vistas ao aumento da Produtividade.** 2020, DOI:10.13140/RG.2.2.32587.82722.
- DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R. *et al.* **A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management.** 012, 0022-1694/\$ - see front matter, 2012, Elsevier B.V. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>.
- FONTANET, M.; FERNANDEZ-GÁRCIA, D.; FERRER, F. **The value of satellite remote sensing soil moisture data and the DISPATCH algorithm in irrigation fields.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5889–5900, 2018, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5889-2018>.
- GAMEIRO, S. *et al.* **Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE.** *Terræ*, 13(1-2):15-22, 2016.
- GAO, Q.; ZRIBI, M.; ESCURIHUELA, M.J. *et al.* **Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution.** *Sensors* 2017, 17, 1966; doi:10.3390/s17091966.
- GUEVARA M.; VARGAS, R. **Downscaling satellite soil moisture using geomorphometry and machine learning.** *PLoS ONE* 14(9): e0219639. 2019.
- INOCENCIO, T. De M.; RIBEIRO, N. A.; SOUZA, A.G.S.S. **Soil moisture obtained through remote sensing to assess drought events.** *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.24, n.9, p.575-580, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p575-580>.
- INPE. **Ações e Programas.** 2021/2022. Disponível em < <https://www.gov.br/inpe/pt-br/acao-informacao/acoes-e-programas> > Acesso em 28/03/2022.
- KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations.** Oxford UK: Editora Elsevier academic press, 2005.
- KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S. *et al.* **Classification and Regression Training.** 2022.
- LACERDA, M. P. C. *et al.* **Utilização de sensoriamento remoto para o estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico.** Distrito Federal, Brasília: UNB/FAV, 2007.
- LAKSHMI V. **Remote sensing of hydrological extremes.** Springer. 2017.

- LEWIS, K.; et al. **Mapping native and non native vegetation in the Brazilian Cerrado using freely available satellite products.** *Scientific Reports* (2022), 12:1588, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05332-6>.
- LIU W., BARET F., GU X., TONG Q., ZHENG L., ZHANG B. **Relating soil surface moisture to reflectance.** *Remote Sens. Environ.* 2002; 81:238–246.
- LIU W, WU J, FAN H, DUAN H, LI Q, YUAN Y, *et al.* (2017) **Estimations of evapotranspiration in an age sequence of Eucalyptus plantations in subtropical China.** *PLoS ONE* 12(4): e0174208. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174208>.
- LIYANAGE, D.K.; CHATHURANGA, I.; MORY, B.A. *et al.* **A Simple, Semi-Automated, Gravimetric Method to Simulate Drought Stress on Plants.** *Agronomy* 2022, 12, 349. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020349,2022>.
- LOPES, H., L., *et al.* **Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação.** Campina Grande, PB, UAEA/UFCG, v.15, n.9, p.973–980, 2011.
- MAFFRA, Cristina de Queiroz Telles. **Modelagem da umidade do solo a partir de dados multiespectrais dos sistemas Landsat, Aster e Modis.** Orientador: Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno. 2004. 166f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/39051/T%20%20CRISTINA%20DE%20QUEIROZ%20TELLES%20MAFFRA.pdf;jsessionid=49C8469F27F7753439E21B5D24FF9F62?sequence=2>> Acesso em: 04.abril.2022.
- MELLO, M. P. de, *et al.* **Comportamento espectral de fitofisionomias do Cerrado e desenvolvimento de índices utilizando bandas sintéticas derivadas de Modelos Lineares de Mistura Espectral aplicados na discriminação de fitofisionomias.** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 2839-2846.
- MENEZES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** 2012.
- MONTEIRO, R. O. C.; COELHO, R. D.; MONTEIRO, P. F. C. **Water consumption and soil moisture distribution in melon crop with mulching and in a protected environment.** 2013. DOI: 10.1590/S0100-29452013000200026.

- MOHANTY, B. P.; COSH, M.H.; LAKSHIMI, V. *et al.* **Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science**. 2017. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>.
- PHINZI, K.; ABRIHA, D.; SZABÓ, S. **Classification Efficacy Using K-Fold Cross-Validation and Bootstrapping Resampling Techniques on the Example of Mapping Complex Gully Systems**. *Remote Sens.* 2021, 13, 2980. <https://doi.org/10.3390/rs13152980>.
- QI, Y., DENNISON, P.E., SPENCER, J. *et al.* **Monitoring Live Fuel Moisture Using Soil Moisture and Remote Sensing Proxies**. *fire ecol* 8, 71–87 (2012). <https://doi.org/10.4996/fireecology.0803071>.
- REATTO, A., MARTINS, E. De S.; FARIAS, M. F. R. *et al.* **Mapa pedológico digital SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Embrapa Cerrados, Planaltina DF, 2004.
- REBOUÇAS, I. A.; DUARTE, C. R.; SILVA NETO, C. A. da; MIRANDA, M. de P. **Aplicação do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e água (NDWI) para análise de depósitos argilosos e arenosos no baixo curso do Rio Jaguaribe/CE**. 2019.
- RIBEIRO, E. S. *et al.* **Avaliação de fragmentos de cerrado com base em índices de vegetação do sensor msi/sentinel 2-a na Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho no estado de Goiás, Brasil**. *Tecnia* v.5, n.1, 2020.
- RHEE, J.; IM, J.; CARBONE, G. J. **Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data**. 2010. doi:10.1016/j.rse.2010.07.005
- RICHARDS, J.A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. 2006. DOI:10.1007/3-540-29711-1.
- RIEGER F.A., ZOLIN CA, PAULINO J, SOUZA A.P., MATOS E.S., MAGALHÃES C.A.S., FARIAS A.F.; **Water Erosion on an Oxisol under Integrated Crop-Forest Systems in a Transitional Area between the Amazon and Cerrado Biomes**. *Rev Bras Cienc Solo*. 2016; v40:e0150111.
- FORMAGGIO, A.R.; SANCHES, I.D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. 2017.
- SAHA, A.; PATIL, M.; GOYAL V. C.; RATHORE, S. **Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques**. 2019, 7, 2; doi:10.3390/ECWS-3-05802.
- DOS SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, D.D. **Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo**. 2011, DOI: 10.1590/S1415-43662011000700004.

- SENA-SOUZA, J.P.; MARTINS, E.; COUTO JUNIOR, A.R. et al. **Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000.** 2013.
- SILVA JÚNIOR, M.C. et al. **Guia do observador de árvores: tronco, copa e folha.** 2014.
- SHIROMA, G. M.; GAMARRA, R.M.; GUIRRA, A. P. M.; et al. **Comparação entre Índices de Vegetação de Diferentes Sensores na Identificação de Fitofisionomias do Cerrado.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 43 – 1, 2020 p.18-32, DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_18_32.
- SHUKLA, A.; PANSHAL, H.; MISHRA, M. et al. **Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis.** 2328-3785, ISSN (CD-ROM): 2328-3793, 2014.
- SUNGMIN, O.; RENE, ORTH. **Global soil moisture data derived through machine learning trained with in-situ measurements.** 2021, 8:17.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise do solo.** Revista Embrapa Solos, 3.ed. rev. e ampl.–Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- TOPP, C. et al. **Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines.** Water Resour. Res., 16(3).1980.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. **Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling.** 1985.
- WANG, A.; SHI, X. **A Multilayer Soil Moisture Dataset Based on the Gravimetric Method in China and Its Characteristics.** 2019, DOI: 10.1175/JHM-D-19-0035.1
- WANG, B.; JIA, K.; LIANG, S. et al. **Assessment of Sentinel-2 MSI Spectral Band Reflectances for Estimating Fractional Vegetation.** Cover. 2018, doi:10.3390/rs10121927.
- WHITE, I.; ZEGELIN, S.J. **Electric and Dielectric Methods for Monitoring Soil-Water Content.** EUA: Lewis Publishers. pp. 730, 2000.
- VERECKEN, H. J. A.; HUISMAN H.; BOGENA, J. et al. **On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review,** Water Resour. Res., 44, W00D06, 2008, doi:10.1029/2008WR006829.
- VIEIRA, R. M. da S. P. et al. **Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast.** Solid Earth, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.
- YOO, C.; KIM, S. EOF. **Analysis of surface soil moisture field variability.** Volume 27, Issue 8, August 2004, Pages 831-842, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.04.003>.

ZAVALA *et al.* **Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands.** *Geoderma* 226–227 (2014) 170–178.

ZHANG, Yu *et al.* **Drought monitoring based on a new combined remote sensing index across the transitional area between humid and arid regions in China.** *Atmospheric Research*, v. 264, p. 105850, 2021.

ZHANG, D.; ZHOU, G. **Estimativa da umidade do solo por sensoriamento remoto óptico e térmico: Uma revisão.** *Sensores*, v. 16, n. 8, pág. 1308, 2016.