

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

**Variáveis do solo e da vegetação de diferentes
fitofisionomias na transição Cerrado-Amazônia
Mato-Grossense**

Maristela Volpato

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS**

**VARIÁVEIS DO SOLO E DA VEGETAÇÃO DE DIFERENTES
FITOFISIONOMIAS NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA MATO-
GROSSENSE**

MARISTELA VOLPATO

Sob a Orientação da Professora
Eliane Maria Ribeiro da Silva

e Coorientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor em
Ciências Ambientais e Florestais**, no
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, Área
de Concentração em Conservação da
Natureza

Seropédica, RJ
Março de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V931v Volpato, Maristela, 1992-
Variáveis do solo e da vegetação de diferentes
fitofisionomias na transição Cerrado-Amazônia Mato
Grossense / Maristela Volpato. - Seropédica, 2024.
83 f.: il.

Orientadora: Eliane Maria Ribeiro da Silva.
Coorientador: Marcos Gervasio Pereira.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Ciências
Ambientais e Florestais, 2024.

1. Biologia do solo. 2. Transição cerrado-floresta.
3. Sensoriamento remoto. I. Silva, Eliane Maria
Ribeiro da, 1956-, orient. II. Pereira, Marcos
Gervasio, 1965-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais e Florestais. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

MARISTELA VOLPATO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de Concentração em Conservação da Natureza.

TESE APROVADA EM 25/03/2024

Eliane Maria Ribeiro da Silva. PhD. Embrapa Agrobiologia
(Orientadora)

André Felipe Nunes de Freitas. Dr. UFRRJ

Bruno Araújo Furtado de Mendonça. Dr. UFRRJ

Deivid Lopes Machado. Dr. Universidade Federal de Jataí

Orivaldo José Saggin Junior. Dr. Embrapa Agrobiologia



TERMO Nº 438/2024 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 19/06/2024 18:52)

ANDRE FELIPPE NUNES DE FREITAS

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptCAmb (12.28.01.00.00.00.29)

Matrícula: ###817#0

(Assinado digitalmente em 20/06/2024 08:46)

BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONCA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)

Matrícula: ###456#4

(Assinado digitalmente em 26/06/2024 16:31)

DEIVID LOPES MACHADO

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.987-##

(Assinado digitalmente em 19/06/2024 16:13)

ELIANE MARIA RIBEIRO DA SILVA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.027-##

(Assinado digitalmente em 19/06/2024 17:34)

ORIVALDO JOSÉ SAGGIN JÚNIOR

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.158-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 438, ano: 2024, tipo: **TERMO**, data de emissão: 19/06/2024 e o código de verificação: **ac6a73c343**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria de Fátima e Nestor,
ao meu sobrinho, Breno Blem Volpato (*in memoriam*),
ao professor e orientador, Acácio Geraldo de Carvalho (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de viver essa etapa e por, em meio às tribulações, me manter firme e sustentar para que conseguisse seguir.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais pela oportunidade de cursar essa pós-graduação.

Ao professor e orientador Acácio Geraldo de Carvalho (*in memoriam*) por ter aceitado orientar-me logo que entrei em contato, sem me conhecer, e assim me possibilitado iniciar esse trabalho. Agradeço o apoio e orientação durante o período em que estivemos juntos. Uma partida triste, precoce e inesperada que interrompeu essa caminhada.

À minha também orientadora, professora Eliane, por ser uma pessoa muito humana e compreensiva, por todas as palavras de incentivo e carinho, além de todo apoio e orientação para conclusão desse trabalho. Ao professor Marcos Gervasio também pela disponibilidade, apoio e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho, principalmente pela viabilização das análises laboratoriais de solo.

Aos meus pais, Maria de Fátima e Nestor, pela ajuda, base, apoio e incentivo. À minha família, irmãs Jaqueline, Camila e Maria e sobrinhos Breno (*in memoriam*), Anna, Bruno, Miguel e Beatriz, pelo que vivemos em conjunto e pelas memórias que criamos.

Ao meu esposo Fábio pela companhia, cuidado pessoal e parceria profissional do início ao fim dessa etapa, por me encorajar e incentivar. Aos meus sogros, Terezinha e Jair, pela ajuda, apoio e incentivo.

À equipe da Somar Ambiental e Engenharia, na pessoa do engenheiro Vilmar Ramos, pelo apoio e viabilização da coleta de dados, e aos proprietários dos imóveis onde foram realizadas as coletas.

Aos professores da UFMT Sinop que permitiram a utilização da infraestrutura dos seus laboratórios para secagem e moagem do material vegetal.

À pesquisadora Maria Elizabeth Fernandes Correia pelo auxílio da identificação de indivíduos da macrofauna.

Por fim, e não menos importante, aos amigos que fiz durante todo o período em que estive em Seropédica-RJ, os quais tornaram esse tempo muito melhor. E, também, aos amigos e parceiros do laboratório de Micorrizas da Embrapa Agrobiologia, com os quais tive aprendizados que vão além do mundo científico, agradeço a todos pelas trocas de saberes e pela ajuda em tudo.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu concluísse o doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO GERAL

VOLPATO, Maristela. **Variáveis do solo e da vegetação de diferentes fitofisionomias na transição Cerrado-Amazônia Mato-Grossense**. 2024. 83 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

A região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado no estado de Mato Grosso apresenta uma complexidade ambiental com características intermediárias dos dois biomas, o que promove a interação de várias fitofisionomias florestais e savânicas. Assim, essa região apresenta elevada biodiversidade, muita da qual ainda não foi descrita e que, dada sua localização em fronteira agrícola e intenso desmatamento, pode ser reduzida por ações antrópicas. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivos conhecer as comunidades do solo (fungos micorrízicos arbusculares e macrofauna) em fitofisionomias dessa região e compreender como as características do solo e da vegetação estão relacionadas a esses grupos. Para responder às indagações do trabalho, a vegetação, solo e serapilheira de áreas de Savana Florestada e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana, localizadas na Amazônia Matogrossense, foi amostrada em 48 parcelas de 1000m². A partir desse material foram determinados atributos da vegetação, como abundância de indivíduos, área basal, altura, riqueza de espécies e famílias de plantas, serapilheira (estoque de material e teores de nitrogênio, fósforo e potássio) e solo (composição química e granulometria) para serem relacionados aos componentes biológicos (fungos micorrízicos arbusculares e macrofauna). Os resultados demonstraram que as fitofisionomias possuem diferentes abundâncias de fungos e macrofauna, mas a riqueza de espécies e de grupos é semelhante entre elas. Também foi proposto verificar o potencial do uso de características espectrais da vegetação, obtidas indiretamente por meio de sensores de satélites, para estimativa do estoque e nutrientes da serapilheira através de técnica de *machine learning*, de modo a contribuir com métodos alternativos para caracterização desse importante componente do compartimento solo-vegetação. Assim, foi observado um desempenho satisfatório para o teor de nitrogênio do material, demonstrando que há possibilidade de utilização desses tipos de informações para caracterização da serapilheira. Com essas análises foi possível identificar que as características do solo e da vegetação das fitofisionomias afetam as comunidades biológicas do solo avaliadas, reforçando o fato da importância da conservação dos remanescentes dos diferentes tipos de vegetação para conservação da biodiversidade dessa região que tem sido impactada por diversas atividades antrópicas. Além disso, ferramentas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas como subsídios para ações de conservação além do que já vêm sendo tradicionalmente aplicadas visando o monitoramento da dinâmica da paisagem.

Palavras-chave: Biologia do solo, vegetação savânica, sensoriamento remoto.

GENERAL ABSTRACT

VOLPATO, Maristela. **Soil and vegetation variables of different phytophysiognomies in the Cerrado-Amazonia Mato-Grossense transition.** 2024. 83 p. Thesis (Doctor in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

The transition region between the Amazon and Cerrado biomes in the state of Mato Grosso has an environmental complexity that involves intermediate characteristics of the two biomes, which promotes the interaction of various forest and savanna phytophysiognomies. Thus, this region has high biodiversity, much of which has not yet been described and which, given its location on the agricultural frontier and intense deforestation, can be reduced by anthropogenic actions. Therefore, this research aimed to know the soil communities (arbuscular mycorrhizal fungi and macrofauna) in phytophysiognomies of this region and to understand how the characteristics of soil and vegetation are related to these groups. To answer the questions of the work, the vegetation, soil and litter of areas of Forested Savanna and Seasonal Evergreen Submontane Forest, located in the Mato Grosso Amazon, were sampled in 48 plots of 1000m². From this material, vegetation attributes were determined, such as abundance of individuals, basal area, height, species richness and plant families, litter (stock of material and nitrogen, phosphorus and potassium contents) and soil (chemical composition and granulometry) to be related to biological components (arbuscular mycorrhizal fungi and macrofauna). The results showed that the phytophysiognomies have different abundances of fungi and macrofauna, but the richness of species and groups is similar among them. It was also proposed to verify the potential of using spectral characteristics of vegetation, obtained indirectly through satellite sensors, to estimate litter stock and nutrients through machine learning technique, in order to contribute with alternative methods for characterization of this important component of the soil-vegetation compartment. Thus, a satisfactory performance was observed for the nitrogen content of the material, demonstrating that there is a possibility of using these types of information to characterize the litter. With these analyses, it was possible to identify that the characteristics of the soil and the vegetation of the phytophysiognomies affect the soil biological communities evaluated, reinforcing the fact of the importance of conserving the remnants of the different types of vegetation for the conservation of the biodiversity of this region, which has been impacted by several anthropogenic activities. In addition, remote sensing tools can be used as subsidies for conservation actions beyond what has been traditionally applied to monitor landscape dynamics.

Keywords: Soil biology, Savanna vegetation, Remote sensing.

LISTA DE TABELAS

Table 1. Average (\pm standard deviation) and total attributes related to vegetation and soil in Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF) in the study area. LST: land surface temperature; TOC: total organic carbon; SB: sum of bases.	28
Table 2. Averages (\pm standard deviation) of spore abundance, richness, diversity index and Chao-2 richness estimator of AMF in Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).	30
Table 3. List of AMF species observed and their respective frequency of occurrence (FAi) and dominance classes (Do) of the samples of Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). D: dominant occurrence; C: common occurrence; R: rare occurrence; NID: morphospecies not identified at the genus level.	31
Table 4. Species indicator values (IndVal) of AMF in Savanna Forested (SF).	31
Table 5. Percentage of the independent effect of vegetation and soil attributes on the variability of spores abundance and AMF richness in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). P: phosphorus, Na: sodium, LST: land surface temperature.	33
Tabela 6. Contribuição relativa (%) na composição e Frequência absoluta-FA (%) dos grupos taxonômicos da macrofauna do solo em Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).	51
Tabela 7. Características das bandas espectrais dos satélites Sentinel 2A e 2B.	67
Tabela 8. Características da serapilheira em Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).	69
Tabela 9. Estatísticas de tendência de Mann-Kendall e inclinação de Sen para reflectância da vegetação entre os meses de maio a outubro.	70
Tabela 10. Resultados de validação da modelagem de N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) e do estoque da serapilheira em áreas de Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).	72

LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Location of the three sampling areas (A, B and C) with Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF), Savanna/Seasonal Forest contact region in the Amazon biome, the northern state of Mato Grosso. Landsat-8 satellite image, date 2020-10-14, scene 227-068, composition bands 4, 3, 2 (RGB).....	23
Figure 2. Daily rainfall (mm) in the study areas for the period from January 1, 2020, to March 31, 2021. The arrow represents the period of data collection in the field.	24
Figure 3. Maps (top) with RGB composition (4, 3, and 2 bands) from Landsat-8 images and maps (bottom) with average land surface temperature data (LST) resulting from Landsat-8 images obtained in A, B, and C areas.....	26
Figure 4. Total monthly precipitation (mm), average evapotranspiration (ET) (mm.day ⁻¹), and the average Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the areas of Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).....	29
Figure 5. Ordination diagram of the Principal Component Analysis (PCA) of the abundance of spores, AMF richness and diversity with vegetation and soil attributes in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).	32
Figure 6. Ordination diagram of the Canonical Correspondence Analysis (CCA) of the presence/absence of AMF species with vegetation/litter attributes in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).....	34
Figura 7. Áreas de Savana Florestada (SF), e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) na região de contato Savana/Floresta Estacional no bioma Amazônia, norte do estado de Mato Grosso.....	49
Figura 8. Ordenação de escala multidimensional não métrica (nMDS) baseada nas dissimilaridades de Bray-Curtis para a comunidade da macrofauna em Savana Florestada e (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).	52
Figura 9. Número de espécies (curvas de rarefação e intervalo de confiança de 95%) para a comunidade da macrofauna edáfica na Savana Florestada e (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).	52
Figura 10. Coeficientes de correlação se Spearman entre riqueza, abundância e variáveis do solo e da vegetação das fitofisionomias.	53
Figura 11. Diagrama de ordenação da Análise de Componentes Principais dos grupos taxonômicos da macrofauna com variáveis da vegetação (A) e do solo (B) nas fitofisionomias.	54
Figura 12. Locais de amostragem da serapilheira na região de contato Savana/Floresta Estacional no bioma Amazônia, norte do estado de Mato Grosso.	66
Figura 13. Resposta espectral da Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) nas bandas espectrais B2 a B8, B8A, B11 e B12 do satélite Sentinel-2 (A e B).	69
Figura 14. Reflectância da vegetação nas bandas espectrais ao longo do período de maio a outubro.....	70
Figura 15. Análise de correlação de Spearman entre a reflectância das bandas espectrais e índices derivados e variáveis da serapilheira. Retângulo na horizontal na cor cinza indica a região de não significância das correlações (p>0,05).....	71

Figura 16. Valores observados versus preditos para os teores de nitrogênio utilizando os dados de entrada dos meses de melhor previsão, sendo maio o mês de melhor previsão para N utilizando as bandas espectrais (A) e junho quando utilizado os índices (B)..... 73

Figura 17. Importância relativa das bandas espectrais, no mês de maio, e índices, no mês de junho, na modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira..... 74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
CAPÍTULO I.....	19
HOW IS THE COMMUNITY OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI COMPOSED AND ORDERED IN PHYTOPHYSIOGNOMIES IN THE TRANSITION BETWEEN CERRADO AND AMAZON? ¹	19
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	21
1 INTRODUCTION.....	22
2 MATERIAL AND METHODS.....	23
2.1 Study area	23
2.2 Sampling.....	24
2.3 Soil and litter and fungi analysis	25
2.4 Remote sensing data	25
2.5 Ecological and data analysis.....	26
3 RESULTS.....	28
3.1 Vegetation and soil characteristics	28
3.2 Community of arbuscular mycorrhizal fungi	29
3.3 Ordering community of mycorrhizal fungi about soil and vegetation attributes	32
4 DISCUSSION.....	35
5 CONCLUSIONS	37
6 REFERENCES	38
CAPÍTULO II.....	44
MACROFAUNA EDÁFICA RELACIONADA ÀS VARIÁVEIS DO SOLO E DA VEGETAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS DA AMAZÔNIA	44
RESUMO.....	45
ABSTRACT.....	46
1 INTRODUÇÃO.....	47
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	49
2.1 Área de estudo	49
2.2 Amostragem da vegetação, solo e macrofauna	49
2.3 Análise de dados.....	50
3 RESULTADOS	51
4 DISCUSSÃO.....	55
5 CONCLUSÕES.....	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

CAPÍTULO III	61
RELAÇÕES ENTRE O ESTOQUE DE SERAPILHEIRA E SEUS NUTRIENTES COM PARÂMETROS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO EM ÁREA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA-CERRADO	61
RESUMO.....	62
ABSTRACT.....	63
1 INTRODUÇÃO.....	64
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	66
2.1 Área de estudo	66
2.2 Dados de campo e processamento	66
2.3 Dados de sensoriamento remoto.....	67
2.4 Análise de dados.....	68
3 RESULTADOS	69
3.1 Caracterização da serapilheira e resposta espectral da vegetação	69
3.2 Performance da modelagem	71
4 DISCUSSÃO	75
5 CONCLUSÕES	78
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
2 CONCLUSÕES GERAIS	83

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a área de contato entre os biomas Cerrado e Amazônia configura-se como uma das mais extensas, com cerca de 6.000 km, e complexas regiões de transição entre formações savânicas e floresta (TORELLO-RAVENTOS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2017; MARQUES et al., 2020). Nessas regiões há ocorrência de formações vegetais que podem ter características intrínsecas e/ou intermediárias dos dois biomas, como florestas densas, decíduas, semidecíduas ou perenes de terras altas, formações savânicas e ambientes rupestres (IBGE, 2012; ROSSATTO, 2014; SANTOS, 2017; IBGE, 2018). Levando em conta as diferenças de composição de espécies, dinâmica e estrutura entre esses tipos de vegetação, ainda não estão devidamente esclarecidas as causas da ocorrência de formações florestais e savânicas na mesma localidade (ZORTEA, 2018).

Em escala local, a explicação para a ocorrência das formações florestais e savânicas que se interpenetram pode advir de fatores ambientais específicos, que não apenas condições climáticas, que podem atuar para determinar a coexistência de ambos os tipos de vegetação na mesma unidade de paisagem (ZORTEA, 2018). Uma das principais linhas de pesquisa relaciona-se às variações locais de solo e relevo, incluindo disponibilidade de água e de nutrientes (MARIMON-JUNIOR; HARIDASAN, 2005). Por exemplo, Zorteia (2018) observou diferenças significativas em relação à textura do solo para fitofisionomias nessa região e associou os maiores teores de argila, maior retenção de água e maior fertilidade à fisionomia florestal. Entretanto, essas relações entre distribuição espacial da vegetação e solo nessa região nem sempre são tão claras e explicativas, podendo haver influência da interação entre as propriedades químicas e granulométricas quando os ambientes possuem substratos distintos ou o espaço pode atuar como um fator determinante quando as propriedades edáficas são mais homogêneas (MARACAHIPES-SANTOS et al., 2017). Além disso, o fogo nessa região atua como promotor de mudanças na vegetação e pode impulsionar a substituição dos tipos de vegetação (MARACAHIPES-SANTOS et al., 2018).

A diversidade que o solo apresenta nos múltiplos ambientes é promovida pela ação dos fatores que o formam, sendo eles: material de origem, clima, topografia, tempo e organismos. Existe uma grande diversidade de organismos, dentre eles fungos, minhocas, formigas, cupins, besouros etc., que fazem parte da formação do solo, interagem entre si, e modificam os compostos orgânicos e a estrutura do solo (BREVIK et al., 2015; SANTOS, 2017). Esses organismos também integram uma importante condição para uma espécie ocupar um determinado sítio e manter populações no local devido às interações que são estabelecidas entre eles (OLIVEIRA, 2019). Além disso, são influenciados por alterações no tipo de cobertura vegetal (AKER et al., 2022; CALAÇA & BUSTAMANTE, 2022; VASCONCELOS et al., 2020) e no uso do solo, como conversão de áreas com vegetação nativa para cultivos agrícolas. Essa prática pode renovar a comunidade biológica do solo mas também suprimir alguns táxons exclusivos de vegetação nativa (LAMMEL et al., 2021).

Devido à complexidade ambiental que envolve as regiões de transição entre grandes biomas tropicais, estudos são requeridos para investigar a dinâmica da biodiversidade no contexto do funcionamento do ecossistema, ciclos de carbono e nutrientes (OLIVEIRA et al., 2017; PEIXOTO et al., 2017; SANTOS, 2017; MARQUES et al., 2020). Pesquisas sobre as relações da diversidade arbórea com outros componentes da comunidade em um contexto fitogeográfico na transição Cerrado-Amazônia também são necessárias devido à ampla alteração e deterioração ambiental nessa região, de modo a subsidiar medidas de manejo, conservação e preservação da biodiversidade em escala local.

Para tanto, visando contribuir com informações sobre a diversidade biológica do solo e relações solo-planta na região de transição entre Cerrado e Amazônia Mato-Grossense, esta tese foi estruturada em três capítulos, conforme apresentados a seguir:

- Capítulo 01: Como a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares é composta e ordenada em fitofisionomias na transição entre Cerrado e Amazônia?
- Capítulo 02: Macrofauna edáfica relacionada às variáveis do solo e da vegetação em fitofisionomias da Amazônia
- Capítulo 03: Relação entre o estoque de serapilheira e seus nutrientes com parâmetros espectrais da vegetação em área de transição Amazônia-Cerrado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKER, A. M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in the cerrado biome: effects of land use system, soil texture, and seasonality. **Revista Caatinga**. v. 35, n. 1, p. 170 – 180, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252022v35n117rc>
- BREVIK, E. C. et al. The Interdisciplinary nature of soil. **Soil**, v. 1, n. 1, p. 117–29, 2015.
- CALAÇA, F. J. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. Richness of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) along a vegetation gradient of Brazilian Cerrado: responses to seasonality, soil types, and plant communities. **Mycological Progress**. p. 21-27, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11557-022-01785-1>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. ISSN 0103-9598, 271 p., 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências e Mapa Temático - Vegetação do Brasil**, 2018. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> e https://dados.gov.br/dataset/cren_vegetacao_5000.
- LAMMEL, D. R. et al. Soil biota shift with land use change from pristine rainforest and Savannah (Cerrado) to agriculture in southern Amazonia. **Molecular Ecology**, 30:4899–4912, 2021. DOI: 10.1111/mec.16090
- MARACAHIPES-SANTOS, L. et al. Effects of soil and space on the woody species composition and vegetation structure of three Cerrado phytophysiognomies in the Cerrado-Amazon transition. **Brazilian Journal of Biology**. v. 77, 2017.
- MARACAHIPES-SANTOS, L. et al. Temporal changes in species composition, diversity, and woody vegetation structure of savanna in the Cerrado-Amazon transition zone. **Acta Botanica Brasilica**. v. 32, 2018.
- MARIMON-JUNIOR, B. H.; HARIDASAN, M. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerradão e um Cerrado sensu stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**. v.19, n.4, p.913-926, 2005.
- MARQUES, E. Q. et al. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**. v. 29, p. 1501–1517, 2020.
- OLIVEIRA, B. et al. Unraveling the ecosystem functions in the Amazonia– Cerrado transition: evidence of hyperdynamic nutrient cycling. **Plant Ecol**. v. 218, p. 225–239, 2017.
- OLIVEIRA, L. C. **Padrões, conexões e determinantes da vegetação arbórea do Brasil**. Tese (Pós-graduação em Ecologia e Conservação), Universidade do Estado de Mato Grosso, 218 p. 2019.
- PEIXOTO, K. S. et al. Unravelling ecosystem functions at the Amazonia-Cerrado transition: II. Carbon stocks and CO₂ soil efflux in cerradao forest undergoing ecological succession. **Acta Oecologica**. v. 82, p. 23–3, 2017.

ROSSATTO, D. R. Spatial patterns of species richness and phylogenetic diversity of woody plants in the neotropical savannas of Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 37, n. 3, p. 283–92, 2014.

SANTOS, P. M. **Topografia e solo definindo a vegetação em escala local no ecótono cerrado-floresta Amazônica**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação), Universidade Federal do Maranhão, 56 p., 2017.

TORRELLA-RAVENTOS, M. et al. On the delineation of tropical vegetation types with an emphasis on forest/savanna transitions. **Plant Ecol Divers**. v. 6, n. 1, p. 101–137, 2013.

VASCONCELOS, W. L. F. Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44:e0190136, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190136>

ZORTEGA, M. **Determinantes ambientais de vegetação savânica e florestal em enclaves de cerrado na Amazônia mato-grossense**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos), Universidade do Estado de Mato Grosso, 122 p., 2018.

CAPÍTULO I

HOW IS THE COMMUNITY OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI COMPOSED AND ORDERED IN PHYTOPHYSIOGNOMIES IN THE TRANSITION BETWEEN CERRADO AND AMAZON?¹

¹ Formatado conforme as diretrizes do periódico Acta Oecologica, ao qual foi submetido em maio de 2023.

RESUMO

Dada a complexidade ecológica da região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia e a importância dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) como componente biológico do solo, o conhecimento da comunidade desses fungos em diferentes fitofisionomias de um bioma é importante para a conservação da biodiversidade. Este estudo teve como objetivo caracterizar e comparar as comunidades de FMAs entre áreas de Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) na região de transição entre o Cerrado e Amazônia no estado de Mato Grosso (Brasil), que faz parte de uma das mais extensas transições entre savana-floresta do mundo. A composição das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares foi semelhante nas fitofisionomias. No entanto, houve diferença quanto à abundância total de esporos, que foi maior nas SF. A temperatura da superfície terrestre (positivamente) e o teor de silte (negativamente) foram os principais fatores relacionados à abundância total de esporos, enquanto o teor de fósforo da serapilheira (negativamente) foi o fator relacionado com a riqueza de espécies de fungos micorrízicos. Em termos de espécies, observou-se que *Glomus clavisporum*, *Glomus glomerolatum* e *Glomus* sp estão associados a atributos relacionados à vegetação (teor de fósforo da serapilheira e densidade de plantas). Assim, as fitofisionomias influenciam na abundância dos esporos da comunidade de FMAs, que é afetada positivamente pela temperatura do solo na SF, a qual parece ser afetada pela restrição hídrica desde o início da estação seca na região.

Palavras-chave: Região amazônica, Relação solo-planta, Micorrizas, Estresse abiótico.

ABSTRACT

Given the ecological complexity of the transition region between the Cerrado and Amazon biomes and the importance of arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) as a soil biological component, the knowledge of the community of these fungi in different phytophysiognomies of a biome is important for biodiversity conservation. This study aimed to identify and compare the community of AMFs between areas of Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF) in the transition region between Cerrado and Amazon in the state of Mato-Grosso (Brazil), which is part of one of the most extensive savanna-forest transitions in the world. The composition of the arbuscular mycorrhizal fungal communities was similar among the phytophysiognomies. However, there was a difference in the total abundance of spores, which was higher in the DES. Terrestrial surface temperature (positively) and silt content (negatively) were the main factors related to total spore abundance, while litter phosphorus content (negatively) was the factor related to mycorrhizal fungi species richness. In terms of species, it was observed that *Glomus clavisporum*, *Glomus glomerolatum* and *Glomus sp.* are associated with attributes related to vegetation (litter phosphorus content and plant density). Thus, the phytophysiognomies influence the abundance of spores of the AMF community, which is positively affected by soil temperature in SF, which seems to be affected by the water restriction of the region since the beginning of the dry season.

Keywords: Amazon region, Soil-plant relationship, Mycorrhizae, Abiotic stress.

1 INTRODUCTION

The geographical limit of the Cerrado and Amazon biomes was initially established based on data from the RadamBrasil project conducted between 1970 and 1985 (SANO et al., 2020). The area of contact between these biomes in Brazil configures one of the most extensive and complex regions of savanna-forest formations transition in the world (OLIVEIRA et al., 2017; MARQUES et al., 2020). They are not separated by an abrupt ecotone, but rather by a transition zone with meanders and intrusions of savanna and forest that can extend beyond 200 km from the traditional geographical limit (MARQUES et al., 2020). Usually, there is the occurrence of plant formations with high endemism and intrinsic and intermediate characteristics to the two biomes, in these regions, which can encompass greater biodiversity than each biome separately (MARIMON et al.; 2014; ROSSATTO, 2014).

In the state of Mato Grosso, savanna formations occur in enclaves in the Amazon region, as well as forest formations can be observed in enclaves in the Cerrado region under the same climatic conditions (GOMES PESSOA et al., 2021). These conditions are common to be found and significant differences have been reported in soil texture, species composition, dynamics, and vegetation structure of phytophysionomies in this region (ZORTEA, 2018). However, there are still gaps in knowledge about the biodiversity present in the places of occurrence of these formations, especially soil biodiversity.

The arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) are important components of the root mycobiome in natural and agricultural ecosystems (BASIRU et al., 2023). These organisms establish mutualistic relationships with approximately 90% of plant species, acting as an extension of the root system of plants (MEWALAL et al., 2019; KAKOURIDIS et al., 2022). In this symbiosis, the plant supplies the fungus with photosynthates for growth and reproduction (DOWARAH et al., 2022) and the fungi also provides the plant and soil with a range of benefits. This can be related to nutritional improvement, tolerance to abiotic stress, soil structuring related to glomalin, prolongation of root area and volume, stimulation of transformation and cycling of nutrients, and rehabilitation processes, such as the establishment of vegetation, favoring succession processes an plant structure (NOVAIS et al., 2018; DIAGNE et al., 2020; PARIHAR et al., 2020; SINGH et al., 2020; DA SILVA et al., 2021a).

Recent studies have shown that mycorrhizal fungi influence global plant biogeography, including island biogeography (species-isolation relationship) and the latitudinal gradient of species richness (DELAVAUX et al., 2019). Thus, the environmental variables, including soil characteristics, represent key factors in determining the occurrence of species of these fungi in different biomes and phytophysionomies (ARAUJO et al., 2021; PONTES et al., 2024).

Despite the importance of AMFs, there is still little information about these microorganisms in areas of native vegetation in the state of Mato Grosso. This is a pioneering study in the characterization of arbuscular mycorrhizal fungi communities in phytophysionomies in the transition between Cerrado and Amazon biomes in the state of Mato Grosso, a region of ecological importance for biodiversity conservation. Thus, the plant structure and edaphic characteristics of the phytophysionomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF) and their correlations with the variables of arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities were explored, aiming to know if the structure and composition of AMF communities can be significantly influenced by the type of vegetation in the same landscape and which environmental variables would be fundamental to explain the composition of these communities. Due to the floristic and structural differences between the phytophysionomies and the environmental variables that order the occurrence of these types of vegetation, it was expected that the mycorrhizal fungi communities would also be distinct and that edaphic predictors would explain the differences.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Study area

The study comprises fragments of two phytophysiognomies (in three areas – A, B and C), classified as Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF) by the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012; 2018). They are in the Savanna/Seasonal Forest contact region in the Amazon biome and are about 100 km away from the limit between the Amazon and Cerrado biomes, in the state of Mato Grosso (Figure 1), in the midwest region of Brazil.

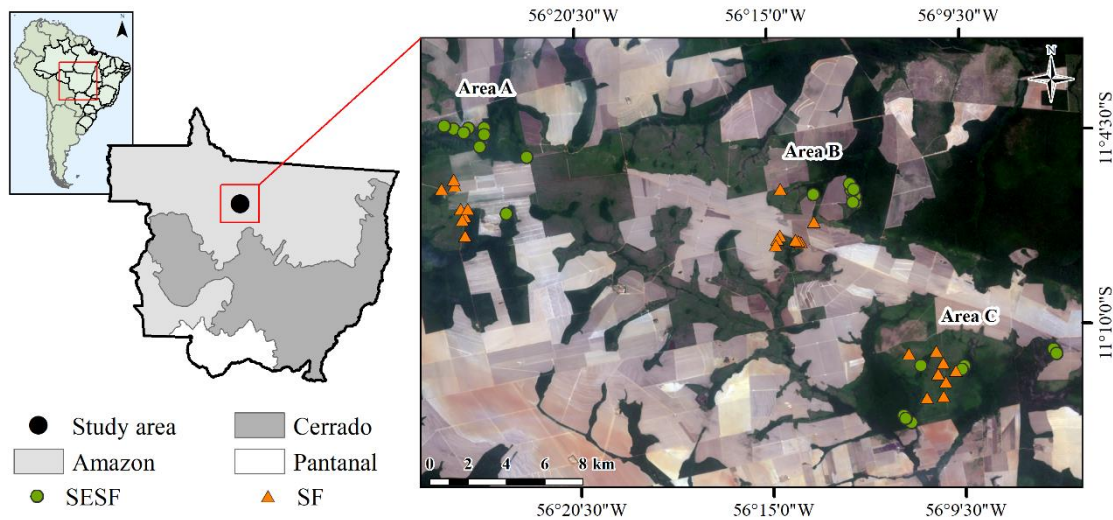


Figure 1. Location of the three sampling areas (A, B and C) with Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF), Savanna/Seasonal Forest contact region in the Amazon biome, the northern state of Mato Grosso. Landsat-8 satellite image, date 2020-10-14, scene 227-068, composition bands 4, 3, 2 (RGB).

The SF areas are characterized by woody shrubby vegetation, tortuous with irregular branching, also provided with perennial or semideciduous trees, with rigid corky exfoliated rhytidome or suberous cortex, with 6 to 8 m in height (IBGE, 2012; BORGES et al., 2017). Through the field survey, in SF areas it was observed that the tree species *Emmotum nitens* (Benth.) Miers, *Roupala montana* Aubl., *Maprounea guianensis* Aubl., *Qualea parviflora* Mart., *Qualea multiflora* Mart., and *Qualea grandiflora* Mart. had higher occurrence. The SESF areas have variations in structure and physiognomy and may present emergent canopy and height greater than 30 m or individuals of thin size, low size, and uniform canopy (IBGE, 2012). The species from SESF are essentially Amazonian maintain greenness even during the dry season and have low or no deciduity (BORGES et al., 2017). In SESF areas there was a higher occurrence of the species *Ocotea matogrossensis* Vattimo-Gil, *Pseudolmedia laevis* (Ruiz & Pav.) J.F.Macbr., *Calophyllum brasiliense* Cambess., *Chrysophyllum sanguinolentum* (Pierre) Baehni, *Hirtella gracilipes* (Hook.f.) Prance, and *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don.

According to the Köppen classification, the climate of the region of the study areas is Am (tropical monsoon). The average temperature is higher than 26 °C and total rainfall is between 2500 and 3100 mm (ALVARES et al., 2013), with two well-defined climatic seasons, being the rainy season from October to April and the dry season from May to September (SOUZA et al., 2013). About the soils, Dystrophic Red-Yellow Latosol and Petric Plinthosol are found in these region with relief area that varies from flat to wavy (IBGE, 2018).

2.2 Sampling

In each of the three sampling area, there is the occurrence of fragments of the two phytophysionomies, Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). For each phytophysionomy, 24 plots of 1000 m² (10 x 100 m) were allocated, with 8 plots for each location (A, B and C), in which the geographical coordinates and altitude were obtained using GPS (*Global Positioning System*) navigation (Garmin 64S).

All individuals with CGL (circumference at ground level, 30 cm from the soil) ≥ 20 cm were measured to quantify the parameters of the vegetation in the plots of the SF phytophysionomy. All shrub/tree individuals with CBH (circumference at breast height, 1.30 cm from the ground) ≥ 30 cm were measured in the SESF. The vegetation sampling was conducted according to Decree-Law n^o 2,365/10 of the state of Mato Grosso, as part of an inventory to characterize the phytophysionomies present in the study areas for environmental adequacy. Other studies considered similar plot size and inclusion criteria (GASPAR et al., 2014; ANDRADE et al., 2015; ROCHA FILHO et al., 2017; GOMES et al., 2017).

Two composite soil samples were collected at a depth of 0 to 20 cm for granulometric and chemical characterization of the soil, in each of the 24 sampling plots of each phytophysionomy. The soil for AMFs analysis followed the same sampling pattern, however, only the root zone soil (from 0 to 5 cm) was collected. Two litter samples were collected, with a gauge (676 cm²), in each plot to estimate the litter stock. The samples were later dried in a forced air circulation oven at 65 °C until constant weight. The dry weight of the samples (g) was converted into Mg ha⁻¹ through the equation:

$$\text{Litter stock (Mg ha}^{-1}\text{)}: \left(\frac{\text{Dry weight of the samples (g)}}{\text{Gauge area (m}^2\text{)}} \right) * 0,01$$

The litter and soil sampling was conducted in early December 2020, when the occurrence of rainfall was still sparse in the region, according to data presented in Figure 2. At the time of collection data, it had rained approximately 108 mm since the end of the dry season. The data about rainfall were obtained from the Hidroweb-National Water Agency platform (stations 1156000 and 1156002).

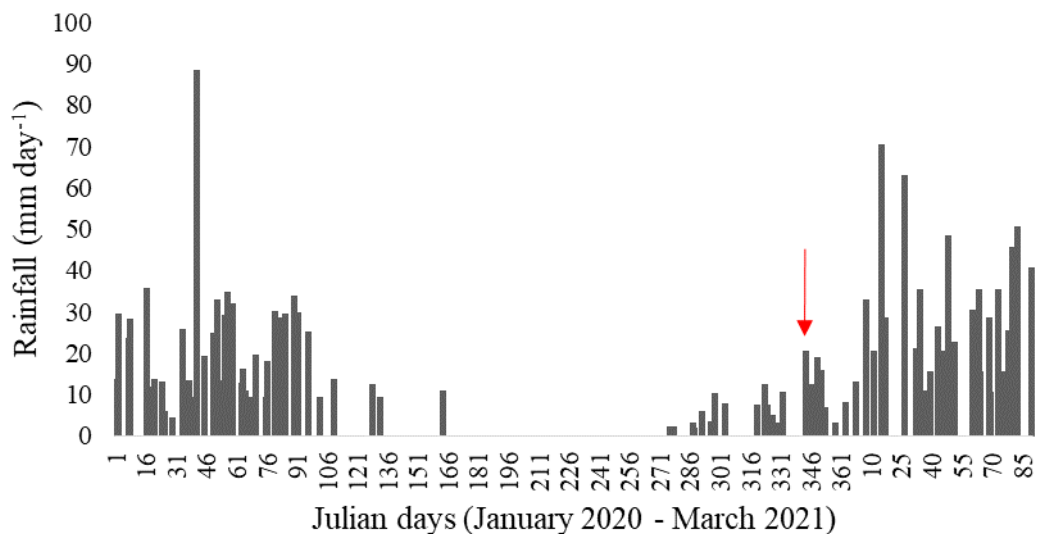


Figure 2. Daily rainfall (mm) in the study areas for the period from January 1, 2020, to March 31, 2021. The arrow represents the period of data collection in the field.

2.3 Soil and litter and fungi analysis

The soil contents as total organic carbon (TOC), phosphorus (P), pH (in water), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), potassium (K^+), sodium (Na^+), and extractable acidity (H+Al) were determined, and the sum of bases (SB) was calculated. The contents of sand, silt, and clay were determined for the granulometric composition. All analyses were performed according to the methods described by Donagema et al. (2011). The litter material was subjected to sulfuric acid digestion to determine the content of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). The N content was obtained by wet oxidation in steam distillation, P by spectrophotometry, and K by flame photometry (TEDESCO et al., 1995).

The AMF spores were extracted from 50 cm³ of soil of each sample, using the wet sieving technique followed by centrifugation, using water and 45% sucrose solution (GERDEMANN & NICOLSON, 1963; JENKINS, 1964). After spores extraction and counting under a stereoscope microscope, slides were mounted with spores in polyvinyl-lacto-glycerol (PVLG) and PVLG and Melzer's reagent mix (1:1). The identification of AMF species was based on spores morphological criteria compared with descriptions of the International Culture Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Blaszkowski (2012) and the original description of each species.

2.4 Remote sensing data

Land Surface Temperature (LST) values were estimated from Landsat-8 TIRS images as an indirect measure of soil temperature. The estimation of this variable by data derived from satellite thermal sensors is a satisfactory method and related to observations of soil temperature in the field (SILVA et al., 2015; MALIK et al., 2021).

Images were obtained throughout the year 2020 so that the variability over a year could be included to obtain the estimate of the land surface temperature. Images with cloud cover less than 5% were selected, returning eight images in this period (06/08/2020, 06/24/2020, 07/10/2020, 07/26/2020, 08/11/2020, 08/27/2020, 09/12/2020, 09/28/2020). The implementation of the algorithm to obtain the estimation of the land surface temperature was conducted on the *Google Earth Engine* platform according to the method described by Yu et al. (2014) and Jesus & Santana (2017). The temperature value (°C) was the result of the average of the incident pixels in each plot among the eight images obtained (Figure 3).

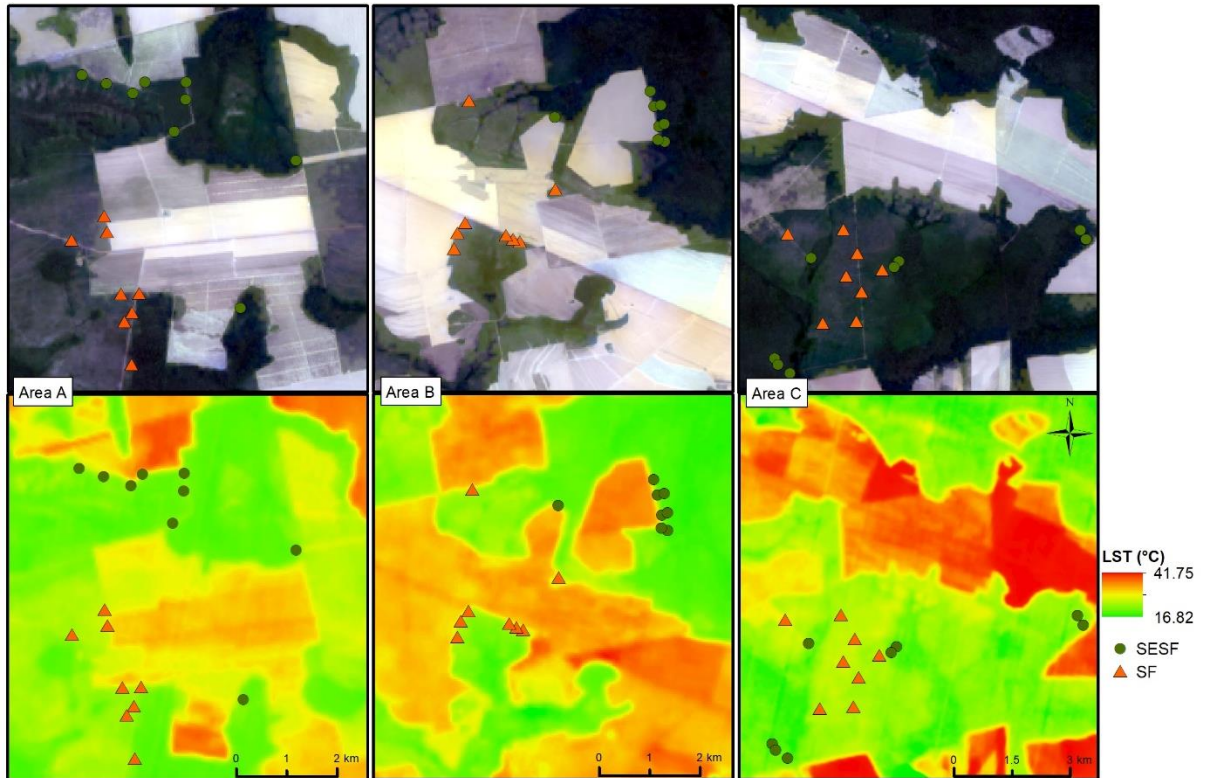


Figure 3. Maps (top) with RGB composition (4, 3, and 2 bands) from Landsat-8 images and maps (bottom) with average land surface temperature data (LST) resulting from Landsat-8 images obtained in A, B, and C areas.

Data from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the product MOD13Q1 (v006) of the MODIS sensor, with a spatial resolution of 250 m, were used to characterize the phytophysiognomies as to the quantity and condition of photosynthetically active vegetation. Data from evapotranspiration (ET) of the product MOD16A2 (v006) of the MODIS sensor, with a spatial resolution of 500 m, were also used. These data were obtained for the year 2020 on NASA's AppEEARS platform. Only good-quality pixels were used, according to the quality layers of the product. The monthly average was calculated in each phytophysiognomy for the NDVI and ET data.

2.5 Ecological and data analysis

The homogeneity of the variance and the data normality of the data were evaluated by the Levene and Shapiro-Wilk test ($\alpha: 0.05$). Once these assumptions were verified, the variables related to AMF, vegetation, and soil were compared by the t test ($\alpha: 0.05$). When normality was not verified, the variables were transformed using the Box-Cox method.

The frequency of occurrence of each AMF species was calculated by determining the percentage of samples in which the spores of a given species occurred. The species were categorized according to their dominance (D_o), based on the frequency of occurrence (FAi) (ZHANG et al., 2004), as dominant species ($FA_i > 50\%$), common species ($10\% < FA_i \leq 50\%$), or rare species ($FA_i \leq 10\%$).

The potential species richness in each phytophysiognomy was determined using the Chao-2 estimator with 999 randomizations ($\alpha: 0.05$) (GOTELLI & COLWELL, 2001) through the EstimateS 9.1 software. The diversity of AMF was estimated by the Margalef index and the similarity in the composition of AMF species between the phytophysiognomies was obtained through the Sorensen index.

The species indicator value (IndVal) was used to assess whether a given AMF species was associated with any of the phytophysiognomies. The IndVal was used to identify "indicator species" using the "multipatt" function of the "indicspecies" (CACERES & LEGENDRE, 2009) package with 999 permutations (α : 0.05) and based on species presence and absence data. The test was conducted in the R software, version 4.2.1. The indicator species are defined as the most characteristic species of each group, found mostly in a particular group of the typology and present in most of the sites belonging to this group (DUFRENE & LEGENDRE, 1997).

The Principal Component Analysis (PCA) was used to order the relationships between biological variables (spore abundance, richness, and diversity index) with environmental attributes (soil composition: fertility, and granulometry, land surface temperature, and vegetation-related variables such as vegetation density, species richness and plant family, basal area, height, and nutrients, and litter stock). The PCA was performed focusing on the correlations between variables using the "FactoMineR" (LE et al., 2008) package in the R software, version 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022).

A hierarchical partitioning analysis was performed to determine the importance of an independent environmental attribute (variables related to soil and vegetation) in the explained variation of spore abundance and AMFs richness (BERTINI et al., 2014). The "rdacca.hp" (LAI et al., 2022) package was used to perform hierarchical partitioning, calculate the individual contributions of each predictor to variation explained in the canonical analysis (Redundancy Analysis), and determine the statistical significance. The multicollinearity between the predictor variables was evaluated using the variance inflation factor ($VIF > 5$).

The Canonical Correspondence Analysis (CCA) was used to determine the proportion of variation in the presence/absence of AMF species explained by soil and vegetation attributes. The rare species ($< 10\%$ of the frequency) were removed from the analysis, as they decrease the ordering power of the data (STÜRMER et al., 2018a). The multicollinearity between the variables was also verified through the variance inflation factor ($VIF > 5$) of the variables. The analysis was performed using the "car" and "vegan" (OKSANEN et al, 2022) packages in the R software, version 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022).

3 RESULTS

3.1 Vegetation and soil characteristics

The SF and SESF differed statistically by the structural parameters of the vegetation (individuals ha⁻¹, basal area, and height) (Table 1). A higher density of individuals per hectare and was observed for the SF phytophysiognomy, while a higher basal area and height, in addition to higher content of N in litter was observed in the SESF phytophysiognomy. Although the average richness of species and families among the phytophysiognomies were similar, only 67 species in common were observed, resulting in a floristic similarity of 21%.

For the attributes related to landscape and soil, it was observed that the SF phytophysiognomy occurs at higher altitudes, and has higher surface temperature, pH values, and clay content. For SESF soils, it was observed higher content of Al³⁺, K, P, and sand (Table 1), however, the soils of both phytophysiognomies can be considered of low natural fertility of sandy loam texture. The difference in the other variables between the phytophysiognomies was not significant.

Table 1. Average (\pm standard deviation) and total attributes related to vegetation and soil in Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF) in the study area. LST: land surface temperature; TOC: total organic carbon; SB: sum of bases.

	SF			SESF		
Vegetation-related attributes						
Individuals ha ⁻¹	1115.83	(\pm 225.46)	a	755.00	(\pm 292.49)	b
Basal area (m ²)	0.95	(\pm 0.26)	b	2.11	(\pm 0.81)	a
Height (m)	4.33	(\pm 0.96)	b	12.74	(\pm 5.41)	a
Richness (average)	24.75	(\pm 4.99)	a	27.92	(\pm 6.45)	a
Richness (total)	130			205		
Families (average)	17.46	(\pm 3.49)	a	18.38	(\pm 2.96)	a
Family (total)	49			58		
Litter (Mg ha ⁻¹)	9.85	(\pm 3.01)	a	8.70	(\pm 1.93)	a
N litter (g kg ⁻¹)	6.23	(\pm 1.49)	b	9.36	(\pm 3.14)	a
P litter (g kg ⁻¹)	1.89	(\pm 0.17)	a	1.97	(\pm 0.24)	a
K litter (g kg ⁻¹)	6.74	(\pm 0.87)	a	7.24	(\pm 1.37)	a
Soil-related attributes						
Altitude (m)	440.21	(\pm 22.66)	a	428.75	(\pm 16.30)	b
LST (°C)	28.42	(\pm 0.71)	a	26.88	(\pm 0.42)	b
pH (H ₂ O)	5.56	(\pm 0.26)	a	5.02	(\pm 0.45)	b
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.35	(\pm 0.23)	a	0.39	(\pm 0.27)	a
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1.91	(\pm 1.04)	a	2.07	(\pm 1.13)	a
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.68	(\pm 0.31)	b	0.91	(\pm 0.35)	a
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	7.94	(\pm 1.91)	a	7.77	(\pm 2.45)	a
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0.12	(\pm 0.01)	a	0.12	(\pm 0.01)	a
K ⁺ (cmol dm ⁻³)	0.08	(\pm 0.03)	a	0.08	(\pm 0.02)	a
P (mg dm ⁻³)	0.96	(\pm 0.71)	b	1.43	(\pm 0.86)	a
TOC (g kg ⁻¹)	18.18	(\pm 3.32)	a	18.52	(\pm 7.31)	a
SB (cmol _c dm ⁻³)	2.45	(\pm 1.09)	a	2.67	(\pm 1.25)	a
Sand (g kg ⁻¹)	524.98	(\pm 173.28)	b	632.55	(\pm 157.13)	a
Clay (g kg ⁻¹)	320.69	(\pm 137.41)	a	191.89	(\pm 111.54)	b
Silt (g kg ⁻¹)	154.33	(\pm 73.63)	a	175.55	(\pm 129.64)	a

Averages followed by the same letter in the line, do not differ in the t test (α : 0.05).

The NDVI values (Figure 4) were higher in SESF areas and lower in SF areas throughout the year. Evapotranspiration showed a reduction in SF throughout the dry season, between June and September, and was also lower than in SESF (Figure 4). The lowest values for NDVI and ET, in the two phytophysiognomies, were observed in September, the last month without rainfall that year.

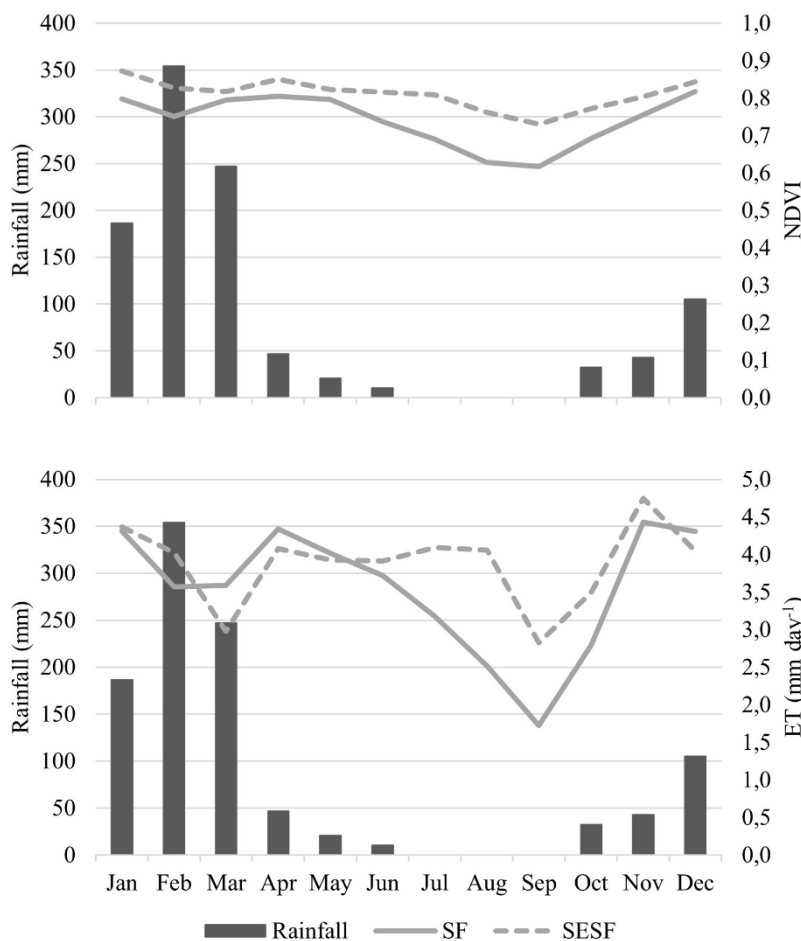


Figure 4. Total monthly precipitation (mm), average evapotranspiration (ET) (mm.day⁻¹), and the average Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the areas of Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).

3.2 Community of arbuscular mycorrhizal fungi

There was no difference between the phytophysiognomies according to the average richness of morphospecies, (Table 2). A total of 21 morphospecies were identified, with 19 morphospecies in each phytophysiognomy, covering six families and 11 genera (considering morphospecies with at least genus-level identification) (Table 3). From the Chao-2 estimator, it was verified that the potential number of AMF species to be observed is 20.09 in SF and 23.59 in SESF. Thus, the richness of 19 morphospecies found in each phytophysiognomy represents 94.6% and 80.5%, respectively, of the potential richness represented by the Chao-2 estimator.

Table 2. Averages (\pm standard deviation) of spore abundance, richness, diversity index and Chao-2 richness estimator of AMF in Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF).

Variable	SF			SESF		
Spores	1207.58	(\pm 574.4)	a	875.92	(\pm 555.74)	b
Richness (average)	7.79	(\pm 1.86)	a	7.08	(\pm 1.72)	a
Margalef	0.97	(\pm 0.26)	a	0.92	(\pm 0.25)	a
Chao-2	20.09	(\pm 3.14)	b	23.59	(\pm 6.34)	a

Averages followed by the same letter in the line, do not differ in the t test (α : 0.05).

Considering the presence/absence of the species, applied to the Margalef index, there was no difference in the diversity of AMF between the phytophysiognomies (Table 2), reflecting a similarity of 89%. The morphospecies related exclusively to a single phytophysiognomy usually occurred in one or two samples, with the morphospecies *Ambispora leptoticha* and *Racocetra* sp. in SF, *Gigaspora* sp. (2), and NID (not identified) in SESF.

The morphospecies classified as dominant represented 26.32% in SF areas, common and rare 36.84% each, relative to total morphospecies observed in this phytophysiognomy. For SESF areas, the morphospecies classified as dominant, common, and rare were 15.79, 47.37 and 36.84%, respectively (Table 3). The morphospecies *Acaulospora mellea*, *Glomus macrocarpum*, and *Rhizoglomus microaggregatum* were classified as dominant in both phytophysiognomies, and the *Glomus macrocarpum* was present in 100% of the samples. The genera *Glomus* and *Acaulospora*, with four species each, represented 42.10% of the sampled richness.

The analysis of indicator species showed that the morphospecies *Cetraspora pellucida*, *Claroideoglomus lamellosum*, and *Glomus clavisporum* had a greater association with SF. A higher average abundance of AMF spores was also observed in the phytophysiognomy (SF) (Table 4). For SESF, were not identified morphospecies with significant values to be considered indicators.

Table 3. List of AMF species observed and their respective frequency of occurrence (FAi) and dominance classes (Do) of the samples of Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). D: dominant occurrence; C: common occurrence; R: rare occurrence; NID: morphospecies not identified at the genus level.

Family/Species	SF		SESF	
	FAi	Do	FAi	Do
Acaulosporaceae				
<i>Acaulospora foveata</i> Trappe & Janos	37.50	C	45.83	C
<i>Acaulospora mellea</i> Spain & Schenck	66.67	D	68.75	D
<i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe	2.08	R	4.17	R
<i>Acaulospora tuberculata</i> Janos & Trappe	2.08	R	2.08	R
Ambisporaceae				
<i>Ambispora leptoticha</i> (Schenck & Sm.) Walker, Vestberg & Schüßler	6.25	R	-	-
Claroideoglomeraceae				
<i>Claroideoglomerum lamellosum</i> (Dalpé, Koske & Tews) Walker & Schüßler	47.92	C	22.92	C
Gigasporaceae				
<i>Cetraspora pellucida</i> (Nicolson & Schenck) Oehl, Souza & Sieverd	62.50	D	37.50	C
<i>Dentiscutata</i> sp. (1)	12.50	C	16.67	C
<i>Dentiscutata</i> sp. (2)	8.33	R	4.17	R
<i>Dentiscutata scutata</i> Walker & Dieder	4.17	R	10.42	C
<i>Gigaspora</i> sp. (1)	56.25	D	35.42	C
<i>Gigaspora</i> sp. (2)	-	-	2.08	R
<i>Racocetra</i> sp.	2.08	R	-	-
<i>Racocetra persica</i> (Koske & Walker) Walker & Sanders	6.25	R	2.08	R
Glomeraceae				
<i>Glomus clavisorum</i> (Trappe) Almeida & Schenck	25.00	C	2.08	R
<i>Glomus glomerulatum</i> Sieverd.	14.58	C	10.42	C
<i>Glomus macrocarpum</i> Tul. & Tul.	100.0	D	100.0	D
<i>Glomus</i> sp.	14.58	C	29.17	C
<i>Rhizoglomerum microaggregatum</i> (Koske, Gemma & Olexia) Sieverd., Silva & Oehl	79.17	D	64.58	D
Diversisporaceae				
<i>Sieverdingia tortuosa</i> (Schenck & Sm.) Błaszk., Niezgodna & Goto	29.17	C	37.50	C
Not identified				
NID	-	-	2.08	R

Table 4. Species indicator values (IndVal) of AMF in Savanna Forested (SF).

Family/Species	IndVal	Area
<i>Claroideoglomerum lamellosum</i>	0.32*	SF
<i>Cetraspora pellucida</i>	0.39*	SF
<i>Glomus clavisorum</i>	0.23*	SF

*IndVal significant with 999 permutations and α : 0.05.

3.3 Ordering community of mycorrhizal fungi about soil and vegetation attributes

The principal component analysis ordered the differences reported by the test of means of soil and vegetation attributes between the phytophysiognomies. The first two components of the ordination diagram explained 41.75% of data variation (Figure 5). The spore abundance showed association with SF, with plots presenting higher surface temperature and vegetation density and lower silt content, species richness, plant families, and nutrient content of litter. The areas of greater richness and diversity of AMF were mainly associated with plots with higher pH and lower content of P, Al^{3+} , and lower basal area, height, richness, and vegetation families, as well as lower litter nutrient content.

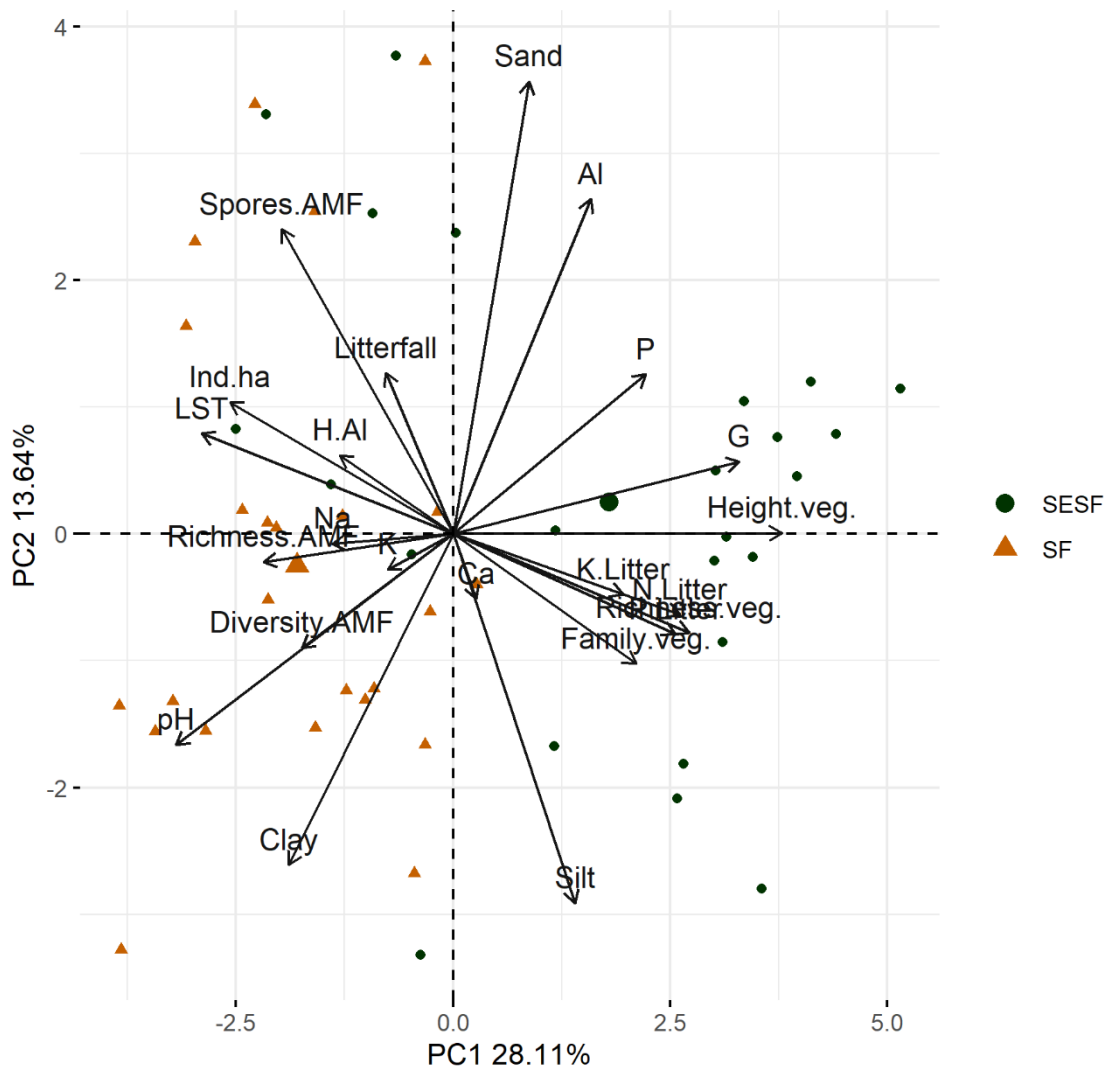


Figure 5. Ordination diagram of the Principal Component Analysis (PCA) of the abundance of spores, AMF richness and diversity with vegetation and soil attributes in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). Al: aluminum; P: phosphorus; G: basal area; K: potassium; Na: sodium; H^+Al : potential acidity; Ind.ha^{-1} : vegetation density; LST: land surface temperature; N.litter, P.litter, K.litter: content of N, P, and K of litter respectively.

Between the predictor variables ($\text{VIF} < 5$), the variables pH, land surface temperature, P and Na (soil), P (litter), sand, silt, density (individuals ha^{-1}) and vegetation richness were

included in the hierarchical partitioning analysis. It was observed that land surface temperature (p -value = 0.0050) and silt (p -value = 0.0197) have a greater effect on the explained variation of spore abundance (Table 5). On the other hand, the P content of litter (p -value = 0.0100) has a greater effect on the explained variation of AMF richness.

Table 5. Percentage of the independent effect of vegetation and soil attributes on the variability of spores abundance and AMF richness in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). P: phosphorus, Na: sodium, LST: land surface temperature.

Predictor variable	Spores abundance		AMF Richness	
	Independent effect (%I)	p -value	Independent effect (%I)	p -value
pH	3.01	0.4303	10.08	0.1788
P (soil)	2.34	0.4765	5.48	0.3510
P (litter)	8.10	0.1795	36.31	0.0100*
Na	0.75	0.7133	19.94	0.0516
LST	33.30	0.0050*	4.23	0.3946
Sand	11.46	0.1056	0.74	0.7725
Silt	21.88	0.0197*	1.58	0.6107
Individuals ha ⁻¹	7.72	0.1741	17.30	0.0749
Richness (veg.)	11.44	0.0946	4.34	0.3696
Total	100		100	
R ²	0.50	0.001	0.38	0.027

*Values significant at the level of 0.05.

The soil and vegetation attributes together were not significant to explain the presence/absence of AMF species in the Canonical Correspondence Analysis. Thus, the soil and vegetation variables were used separately in the analysis. The attributes related to vegetation and litter explained 24.10% (p -value 0.008) of the variance of the common and dominant species, as shown by the CCA ordering diagram in Figure 6. *Glomus clavisporum* and *Glomus glomerolatum* occurred in sites with lower P content of litter, while *Glomus* sp. was associated with sites with higher vegetation density. The explained variance of the presence/absence of AMF species with soil attributes as predictors was not significant (25.94%, p -value 0.198).

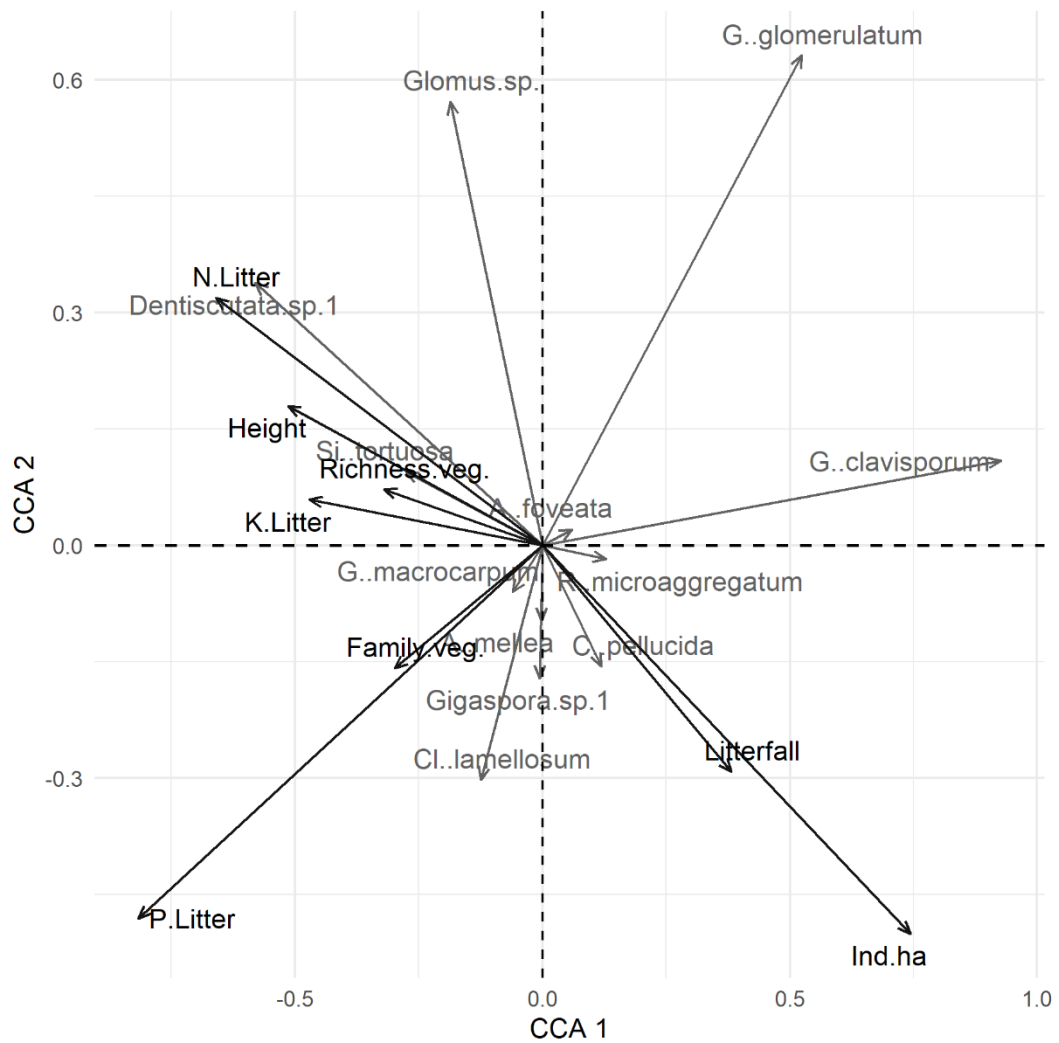


Figure 6. Ordination diagram of the Canonical Correspondence Analysis (CCA) of the presence/absence of AMF species with vegetation/litter attributes in the phytophysiognomies Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF). Ind.ha-1: vegetation density; N.litter, P.litter, K.litter: content of N, P, and K of litter respectively.

4 DISCUSSION

Despite the differences observed in the structure and composition of the vegetation, there was no contrast in the composition, richness and diversity of the AMF community among the phytophysiognomies studied. The spatial proximity of phytophysiognomies allied to the generalist characteristic of AMFs regarding the occurrence in environments (STÜRMEER et al., 2018b) and the apparent lack of specificity of plant species in arbuscular mycorrhizal symbioses (VALYI et al., 2016; GEML, 2017) may explain the similarity found. According to Davison et al. (2015), the variation in the richness of AMF is more influenced by spatial distance than by environmental variables, with greater explanatory power when considering the set of influences.

The similarity in the observed richness and composition of AMF species as a function of phytophysiognomies in the same landscape has diverged between studies, with similarity and dissimilarity in the richness and abundance of species, as well as the presence or absence of specificity of genera or species among phytophysiognomies (VIEIRA JUNIOR et al., 2020; CALAÇA & BUSTAMANTE, 2022). The presence of a species in two locations usually implies that they provide a similar set of minimum conditions that allow the survival of the species (BORCARD et al., 2018). The absence, however, may be related to the occupation of the niche of the species by another species of substitution or non-optimal conditions in any of the important dimensions of its niche. The absence may also be due to the species not yet having arrived at the site, although the conditions were favorable, or the species does not present a regular distribution among the sites under study (BORCARD et al., 2018). Additionally, the non-occurrence of spores from other species does not necessarily mean that they are not present. Other structures, such as hyphae, may be present and just not have the spore formed at the time of field collection.

Even with the similarity in the average richness and species composition between the phytophysiognomies, it was observed that the total richness and diversity may be higher in places where there is higher pH and lower content of P, Al³⁺, and litter nutrients; in addition to the lower basal area, height, richness, and vegetation families. These associations demonstrate that spatial variation of vegetation and soil within the same habitat can also drive the variation in the AMF community in that habitat (OEHL et al. 2017; DUARTE et al., 2019; SOUSA et al., 2018). The litter can also function as a filter in the AMF community, as in natural ecosystems it represents one of the main sources of carbon, phosphorus, and other nutrients to the soil (CALAÇA & BUSTAMANTE, 2022). The addition of nutrients to the soil through litter may involve the selection of AMFs that provide more nutritional benefits to the plant, thereby reducing the abundance and richness of AMF, as nutrients would be more readily available (SHELDRAKE et al., 2018).

The relationship between species richness and soil chemical attributes also has been viewed with divergence in some studies, especially when considering the individual relationships of AMF species. For example, the optimal niche of species of the genus *Acaulospora* was found under low pH conditions (DAVISON et al., 2021) while the higher occurrence of species of other genera such as *Glomus clavisporum* and *Glomus glomerulatum* was related to increased pH (DA SILVA et al., 2021b). The relationship of AMF richness with soil phosphorus is also controversial. Some studies showed a negative relationship (CARBALLAR-HERNÁNDEZ et al., 2017), others a positive relationship (VILCATOMA-MEDINA et al., 2018), and in some cases, it does not seem to influence (DA SILVA et al., 2019). These divergent findings among studies may reflect physiological or ecological aspects of AMF species, also related to adaptability to environments where others were not able to tolerate and establish themselves. Related to these aspects, for example, *Cetraspora pellucida*, *Claroideoglomus lamellosum*, and *Glomus clavisporum* had their occurrences associated with

the areas of SF, *Glomus clavisorum*, and *Glomus glomerolatum*, related to sites with lower P content of litter and *Glomus* sp. to the lower litter stock and vegetation density. In addition, only two exclusive species occurred in each phytophysiognomy, even if in a small frequency, with *Ambispora leptoticha* and *Racocetra* sp. in SF and *Gigaspora* sp. (2) and NID in SESF.

The genera *Glomus* and *Acaulospora*, which dominated the sampled richness, are commonly found in a range of ecosystems (DAVISON et al. 2015; REYES et al., 2018; MOURA et al., 2019; CALAÇA & BUSTAMANTE, 2022). Also, the dominant species *Acaulospora foveata*, *Acaulospora mellea*, *Cetraspora pellucida*, *Rhizoglomus microaggregatum* and, mainly, *Glomus macrocarpum*, which have already been reported to be widely distributed in the Brazilian biomes (SOUSA et al., 2018; STÜRMER et al., 2018b; WINAGRASKI et al., 2019; AKER et al., 2022).

Although the composition of the AMF community was not distinguished between the phytophysiognomies, the abundance of spores of the communities was different, with higher values in SF. The variables that most influenced the abundance of spores were land surface temperature (positive) and silt content (negative). Although the clay content (higher in SF) and silt contribute to water retention, the characteristic of sparse stratum and discontinuous canopy of the SF vegetation can cause the rate of solar radiation that falls on the soil to be higher. Thus, this phytophysiognomy can reach a state of water deficit before the SESF, in which higher levels of sand are observed. Soil with higher water retention also absorbs greater solar radiation, which contributes to its temperature increase (DOBOS, 2020). The temperature of the soil, in this case, acts as a stress-causing agent for mycorrhizal fungi. Also, the period of rainfall restriction before field collection could contribute to this result, as the study region remains for approximately four months without the occurrence of rainfall. The NDVI and evapotranspiration data decreased in this period without rainfall, indicating the deciduity of tree leaves. Tree leaves in areas with savanna characteristics tend to fall or reduce evapotranspiration as a strategy to save water during a period of water stress (CAIONI et al., 2020). These plant stress signals can also be transmitted to AMFs through the exudation of substances by the roots that can stimulate them to form spores (BOYNO & DEMIR, 2022), which are structures of propagation or resistance of fungi in adverse conditions (VAZ SOUSA et al., 2022).

5 CONCLUSIONS

The communities composition of arbuscular mycorrhizal fungal is not significantly influenced by vegetation type, i.e., it was similar between the Savanna Forested and Submontane Evergreen Seasonal Forest phytophysionomies. The phosphorus content of litter was the variable that most explained the species richness of AMF.

Although the composition of the communities did not differ, it was verified, however, that the abundance of AMF spores is influenced by the type of phytophysionomy, being more abundant in the Savanna Forested. In it, attributes related to land surface temperature can be drivers of spore abundance through thermal and water stress, since this phytophysionomy seems to be more affected by the dry period of the region.

The relationships found add knowledge about factors that affect the community of AMF in phytophysionomies in the complex transition region between Cerrado and Amazon, given the little information available on AMF in phytophysionomies in this locality.

6 REFERENCES

- AKER, A. M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in the cerrado biome: effects of land use system, soil texture, and seasonality. **Rev. Caatinga**. v. 35, n. 1, p. 170 – 180, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252022v35n117rc>
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, V. C. L. et al. Amostragem e agrupamento de dados de relação hipsométrica em inventários florestais de Cerrado Tocantinense. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 35, n. 83, p. 227-238, 2015.
- ARAUJO, A. S. F. et al. Arbuscular mycorrhizal community in soil from different Brazilian Cerrado physiognomies. **Rhizosphere**. v. 19, 100375, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100375>
- BASIRU, S. et al. Disentangling arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria at the soil-root interface. **Mycorrhiza**. 2023. <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01107-7>
- BERTINI, S.C.B. et al. Hierarchical partitioning for selection of microbial and chemical indicators of soil quality. **Pedobiologia**. v. 57, p. 293-301, 2014.
- BŁASZKOWSKI, J. Glomeromycota. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Krakow, 2012.
- BORCARD, D. et al. **Numerical ecology with R**. Springer, 444 p., ISSN 2197-5744, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>
- BORGES, H. B. N. et al. **Flora Arbórea de Mato Grosso: tipologias vegetais e suas espécies**. Editora Entrelinhas, ISSN 0103-9598, 259 p., 2017.
- BOYNO, G.; DEMIR, S. Plant-mycorrhiza communication and mycorrhizae in inter-plant communication. **Symbiosis**. v. 86, p. 155–168, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13199-022-00837-0>
- CACERES, M.; LEGENDRE, P. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. **Ecology**, 2009. URL <http://sites.google.com/site/miqueldecaceres/>
- CAIONI, C. et al. Droughts amplify differences between the energy balance components of amazon forests and croplands. **Remote sensing**. v. 12, 2020. doi:10.3390/rs12030525
- CALAÇA, F. J. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. Richness of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) along a vegetation gradient of Brazilian Cerrado: responses to seasonality, soil types, and plant communities. **Mycological Progress**. p. 21-27, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11557-022-01785-1>
- CARBALLAR-HERNÁNDEZ, S. et al. Native communities of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Capsicum annum* L. respond to soil properties and agronomic management under field conditions. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v. 246, p. 43–51, 2017.

- DA SILVA, C. F. et al. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the southeast region of Brazil. **Revista Ambiente Água**. v. 16, n. 4, 2021a. Doi:10.4136/ambi-agua.2632
- DA SILVA, C. F. et al. Arbuscular mycorrhizal fungal communities and soil organic matter in pasture and analog agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.16, n.2, e8942, 2021b.
- DA SILVA, F. S. P. et al. Arbuscular Mycorrhizal fungal diversity in tropical sand dune and restinga at Pero Beach in Rio de Janeiro state, Brazil. **Fungal Ecology**. v. 40, 2019.
- DAVISON, J. et al. Global assessment of arbuscular mycorrhizal fungus diversity reveals very low endemism. **Science**. v. 349, v. 6251, 2015.
- DAVISON, J. et al. Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**. 2021. doi: 10.1111/nph.17240
- DELAVAUX, C. S. et al. Mycorrhizal fungi influence global plant biogeography. **Nature Ecology & Evolution**. v. 3, p. 424–429, 2019.
- DIAGNE, N. et al. Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation. **Diversity**. v. 12, 2020.
- DOBOS, E. Albedo. In: **Atmosphere and Climate**. Wang, Y. (Ed.), CRC Press, 2. ed., 389 p., 2020. <https://doi.org/10.1201/9780429440984>
- DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 230 p., 2011.
- DOWARAH, B. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in conferring tolerance to biotic stresses in plants. **Journal of Plant Growth Regulation**. v. 41, p. 1429–1444, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10392-5>
- DUARTE, L. M. et al. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in soils under three phytophysionomies of the Brazilian Atlantic Forest. **Acta Botanica Brasilica**. v. 33, n. 1, p. 50-60, 2019.
- DUFRENE, M.; LEGENDRE, P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. **Ecological Monographs**. v. 67, n. 3, p. 345-366, 1997.
- GASPAR, R. O. et al. Análise fitossociológica e do estoque de carbono no estrato arbóreo de um fragmento de floresta estacional semidecidual. **Ciência Florestal**. v. 24, n. 2, p. 313-324, 2014.
- GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of British Mycological Society**. Cambridge, v. 46, n. 2, p. 235-244, 1963.

GEML, J. Altitudinal Gradients in Mycorrhizal Symbioses. In: TEDERSOO, L. **Biogeography of mycorrhizal symbiosis, ecological studies**. Springer. v. 230, ISSN 2196-971X, 563 p., 2017. DOI 10.1007/978-3-319-56363-3.

GOMES, F. F. C. et al. Dissimilaridade florística de um cerrado e floresta de transição Cerrado-Amazônia no norte de Mato Grosso. **Brazilian Journal of Ecology. XIII Congresso de Ecologia**, 2017.

GOMES PESSOA, M. J. et al. Floristic composition, diversity and edaphic effects in two rocky savanna communities in the Amazon and Cerrado, Brazil. **Ciência Florestal**. v. 31, n. 3, p. 1383-1406, 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509841937>

GOTELLI, N. J.; COLWELL, R. K. Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. **Ecology Letters**. v. 4, n. 4, p. 379–391, 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. ISSN 0103-9598, 271 p., 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências e Mapa Temático - Vegetação do Brasil**, 2018. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> e https://dados.gov.br/dataset/cren_vegetacao_5000.

JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Report**. Beltsville, v. 48, p. 692, 1964.

JESUS, B. J.; SANTANA, I. D. M. Estimation of land surface temperature in caatinga area using Landsat 8 data. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v.7, n.3, p. 150-157, 2017.

KAKOURIDIS, A. et al. Routes to roots: direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants. **New Phytologist**. v. 236, p. 210–221, 2022. doi: 10.1111/nph.18281

LAI, J. et al. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analysis using the rdacca.hp R package. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 13, n. 4, 782-788, 2022. URL <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13800>

LE, S. et al. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, 2008. 10.18637/jss.v025.i01

MALIK, et al. Effect of Groundwater Level on Soil Moisture, Soil Temperature and Surface Temperature. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**. v. 49, n. 9, p. 2143–2161, 2021.

MARIMON, B. S. et al. Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest-cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**. v. 7, p. 281-292, 2014.

MARQUES, E. Q. et al. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**. v. 29, p. 1501–1517, 2020.

MEWALAL, R. et al. Identification of Populus Small RNAs Responsive to Mutualistic

Interactions With Mycorrhizal Fungi, *Laccaria bicolor* and *Rhizophagus irregularis*. **Frontiers in Microbiology**. v. 10, 2019. doi: 10.3389/fmicb.2019.00515

MOURA, J. B. et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Bamboo Under Cerrado Brazilian Vegetation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. v. 19, p. 954–962, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00093-0>

NOVAIS, C. B. et al. Trophic relationships between the earthworm *Pontoscolex corethrurus* and three tropical arbuscular mycorrhizal fungal species. **Applied Soil Ecology**. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.001>

OEHL, F. et al. Diversity and biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils. **Biol Fertil Soils**. v. 53, p. 777–797, 2017. DOI 10.1007/s00374-017-1217-x

OKSANEN J. et al. `_vegan: Community Ecology Package_`, 2022. R package version 2.6-4, <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

OLIVEIRA, B. et al. Unraveling the ecosystem functions in the Amazonia–Cerrado transition: evidence of hyperdynamic nutrient cycling. **Plant Ecol**. v. 218, p. 225–239, 2017.

PARIHAR, M. et al. The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. **Archives of Microbiology**. v. 202, p. 1581-1596, 2020.

PONTES, J. S. et al. Heterogeneity in Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Plant Communities of the Brazilian Cerrado, Transitional Areas toward the Caatinga, and the Atlantic Forest. **Microbial Ecology**, v. 87, n. 29, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02337-0>.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. URL <https://www.R-project.org/>.

REYES, H. A. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi along secondary forest succession at the eastern periphery of Amazonia: Seasonal variability and impacts of soil fertility. **Applied Soil Ecology**. v. 136, p. 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.013>

ROCHA FILHO, J. A. et al. Composição da vegetação arbórea de diferentes tipologias florestais na região Centro-Norte do Mato Grosso. **Scientific Electronic Archives, XI Encontro de Botânicos do Centro-Oeste**, p. 385-387, 2017.

ROSSATTO, D. R. Spatial patterns of species richness and phylogenetic diversity of woody plants in the neotropical savannas of Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**. v. 37, n. 3, p. 283–92, 2014.

SANO, E. E. et al. Características gerais da paisagem do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 1, p. 21-37.

SHELDRAKE, M. et al. Responses of arbuscular mycorrhizal fungi to long-term inorganic and organic nutrient addition in a lowland tropical forest. **The ISME Journal**. v. 12, p. 2433–2445, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0189-7>

SILVA, A. M. et al. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 6, n. 67, p. 1203-1216, 2015.

SINGH, A.K. et al. The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. v. 50, p. 1-35, 2020.

SOUSA, N. M. et al. Predictors of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in the Brazilian Tropical Dry Forest. **Microb Ecol**. v. 75, p. 447–458, 2018. DOI 10.1007/s00248-017-1042-7

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**. v. 01, n. 01, p. 34-43, 2013.

STURMER, S. L. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota) communities in tropical savannas of Roraima, Brazil. **Mycological Progress**. v. 17, p. 1149–1159, 2018a. <https://doi.org/10.1007/s11557-018-1430-5>

STURMER, S. L. et al. Biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota): a phylogenetic perspective on species distribution patterns. **Mycorrhiza**. v. 28, p. 587–603, 2018b. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0864-6>

TEDESCO, M. J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. Boletim técnico, n. 5, 2 ed., Porto Alegre: UFRS, 174 p., 1995

VALYI, K. et al. Community assembly and coexistence in communities of arbuscular mycorrhizal fungi. **The ISME Journal**. v. 10, p. 2341-2351, 2016.

VAZ SOUSA, A. G. et al. Mycorrhization and microbial respiration in soil under passion fruit and jatropha in different water regimes. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. v. 21, n. 2, 2022. Doi: 10.5965/223811712122022159

VIEIRA JUNIOR, W. et al. Seasonal variation in mycorrhizal community of different cerrado phytophysiomies. **Frontiers in Microbiology**. v. 11, 2020. doi: 10.3389/fmicb.2020.576764

VILCATOMA-MEDINA, C. et al. Colonization and Spore Richness of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Araucaria Nursery Seedlings in Curitiba, Brazil. **International Journal of Agronomy**. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5294295>

WINAGRASKI, E. et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in forest ecosystems of Brazil: a review. **Cerne**. v. 25, n. 1, 2019. DOI:10.1590/01047760201925012592

YU, X. et al. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. **Remote Sensing**. v. 6, p. 9829-9852, 2014. doi:10.3390/rs6109829

ZHANG, Y. et al. Survey of arbuscular mycorrhizal fungi in deforested and natural forest land in the subtropical region of Dujianyan, southwest China. **Plant Soil**. v. 261, p. 257–263, 2004. <https://doi.org/10.1023/B>.

ZORTEA, M. **Determinantes ambientais de vegetação savânica e florestal em enclaves de cerrado na Amazônia mato-grossense.** Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos), Universidade do Estado de Mato Grosso, 122 p., 2018.

CAPÍTULO II

MACROFAUNA EDÁFICA RELACIONADA ÀS VARIÁVEIS DO SOLO E DA VEGETAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS DA AMAZÔNIA

RESUMO

A atividade da macrofauna edáfica pode influenciar em vários processos relacionados à fertilidade e estrutura do solo e também pode ser influenciada por características do ambiente físico e da vegetação. Essa pesquisa objetivou verificar qual o reflexo das diferenças na estrutura e composição da vegetação de Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) e Savana Florestada (SF), em conjunto com características do solo, na composição e estrutura das comunidades da macrofauna edáfica que ocorre nesses tipos de vegetação em uma mesma paisagem na região amazônica do estado de Mato Grosso. Além disso, verificar, também, se há características desses locais que podem ser preferenciais a organismos dessas comunidades. Para isso, a macrofauna de duas fitofisionomias na região amazônica, Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV), foi amostrada, por meio do método do *Tropical Soil Biology and Fertility* (TSBF), para identificar as possíveis relações com variáveis químicas e granulométricas do solo, estoque da serapilheira e informações sobre a diversidade e estrutura da vegetação que compõe as duas fitofisionomias. As fitofisionomias possuem semelhança na composição da macrofauna edáfica, mas diferiram na densidade de indivíduos, com maior quantidade na Savana Florestada. Os grupos Hymenoptera, Isoptera, Chilopoda e Coleoptera foram mais frequentes nas duas fitofisionomias. Hymenoptera (Formicidae) e Isoptera foram grupos dominantes e, em conjunto, representaram mais de 70% dos indivíduos nas comunidades estudadas. Os atributos do solo e da vegetação tiveram baixo efeito na variabilidade dos grupos taxonômicos, entretanto, foram relacionados com a riqueza e abundância. Os resultados deste estudo sugerem que a quantidade de recursos disponíveis influencia positivamente a ocorrência da macrofauna nessas fitofisionomias.

Palavras-chave: Biologia do solo, Fauna do solo, Transição savana-floresta.

ABSTRACT

The activity of edaphic macrofauna can influence several processes related to soil fertility and structure and can also be influenced by characteristics of the physical environment and vegetation. This research aimed to verify the reflection of the differences in the structure and composition of the vegetation of the Seasonal Evergreen Submontane Forest (FESV) and Forested Savanna (SF), together with soil characteristics, in the composition and structure of the communities of the edaphic macrofauna that occurs in these types of vegetation in the same landscape in the Amazon region of the state of Mato Grosso. In addition, it is also necessary to verify whether there are characteristics of these places that may be preferential to organisms of these communities. For this, the macrofauna of two phytophysiognomies in the Amazon region, Forested Savanna (SF) and Seasonal Evergreen Submontane Forest (FESV) was sampled, by means of the Tropical Soil Biology and Fertility method (TSBF), to identify the possible relationships with chemical and granulometric variables of the soil, litter stock and information on the diversity and structure of the vegetation that composes the two phytophysiognomies. The phytophysiognomies have a similar composition to the edaphic macrofauna, but differed in the density of individuals, with greater quantity in the Forested Savanna. The groups Hymenoptera, Isoptera, Chilopoda and Coleoptera were more frequent in both phytophysiognomies. Hymenoptera (Formicidae) and Isoptera were dominant groups and, together, represented more than 70% of the individuals in the communities studied. Soil and vegetation attributes had little effect on the variability of taxonomic groups, however, they were related to richness and abundance. The results of this study suggest that the amount of available resources positively influences the occurrence of macrofauna in these phytophysiognomies.

Keywords: Soil biology, Soil fauna, Savanna-Forest transition.

1 INTRODUÇÃO

A fauna do solo atua em diversos processos dos ecossistemas, como na fragmentação e movimentação do material orgânico no perfil do solo, auxiliando na decomposição do material vegetal em conjunto com fungos e bactérias, e assim tendo efeito na fertilidade do solo (RAFAEL et al., 2024). Esse processo contribui, por sua vez, com a reciclagem e disponibilização de nutrientes para as plantas. A atividade dos organismos da fauna pode afetar também a água disponível no solo e o controle de processos erosivos, por mudanças na estrutura e agregação do solo, além da conservação da biodiversidade, por meio da alteração do solo como habitat para outros organismos, e dispersão de sementes (BROWN et al., 2015).

A fauna edáfica inclui espécies de organismos invertebrados que variam em tamanho, desde alguns micrômetros (microfauna) até centímetros de comprimento (macrofauna), e abrangem ciclos de vida que variam de alguns dias até anos (BROWN et al., 2015). A macrofauna compreende mais de 20 grupos taxonômicos, incluindo Diptera, Heteroptera, Homoptera, Coleoptera, Thysanoptera, Orthoptera, Psocoptera, Blattodea, Dermaptera, Isopoda, Diplopoda, Symphyla, Chilopoda, Araneae, Pseudoscorpionida, Opilionida, Gastropoda, Oligochaeta, Hymenoptera e Isoptera, os quais, de acordo com o hábito alimentar, podem ser consumidores de solo, de partes vivas das plantas, matéria orgânica do solo, serapilheira, madeira, raízes, outros invertebrados e fungos (AQUINO, 2001). Esses grupos podem ser constituídos por animais de grande mobilidade, que exercem importante papel no transporte de materiais, tanto para construção de ninhos, quanto para galerias que alcançam profundidades variáveis no solo (KORASAKI et al., 2017).

Esses organismos podem ser afetados por características da vegetação (cobertura e tipo de vegetação), topografia (inclinação e posição fisiográfica), clima (temperatura, umidade relativa do ar, vento e precipitação) e fatores edáficos (minerais predominantes, matéria orgânica, umidade, estrutura, textura e tipo de solo) (MELO et al., 2009; PIEDADE et al., 2015; BUSSINGER, 2018). Devido sua sensibilidade às mudanças ambientais, sejam por atividades antrópicas e/ou fatores naturais, que podem alterar a disponibilidade de recurso alimentar e, consequentemente, as interações intra e interespecíficas, as populações e a diversidade da macrofauna têm sido comumente usadas como bioindicadoras do uso do solo ou da sua fertilidade (MELO et al., 2009). As formigas, por exemplo, são consideradas bioindicadoras pelo fato da presença ou ausência de alguns grupos ser relacionada com características do ambiente, como temperatura e disponibilidade de recursos (FRANCO & FEITOSA, 2018). Já as minhocas, grupo Oligochaeta, são frequentemente observadas no monitoramento da fertilidade dos solos e em processos de reabilitação de solos degradados ou contaminados (DÁVILA et al., 2022).

Neste contexto, as diferenças nas comunidades de plantas que recobrem o solo podem influenciar a composição e estrutura das comunidades da fauna do solo (PEÑA-PEÑA & IRMLER, 2016; VASCONCELOS et al., 2020). E isso ocorre porque a diversidade de espécies vegetais e densidade da vegetação reflete em heterogeneidade da serapilheira e consequentemente implica em maior variedade e quantidade de recursos para a fauna do solo (OLIVEIRA-FILHO et al., 2018). Em geral, coberturas vegetais menos complexas e diversas quando comparadas às formações vegetais tropicais, por exemplo, apresentam a comunidade da fauna do solo com menos grupos taxonômicos, o que favorece os organismos mais competitivos (BARETTA et al., 2014; GUTIÉRREZ et al., 2017). Frente a isso, as análises desse trabalho tiveram como objetivo verificar qual o reflexo das diferenças de estrutura e composição da vegetação de Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) e Savana Florestada (SF), em conjunto com características do solo, na estrutura e composição das comunidades da macrofauna edáfica que ocorre nesses tipos de vegetação em uma mesma paisagem na região amazônica do estado de Mato Grosso. Partindo do pressuposto que esses

organismos são sensíveis às variações ambientais abruptas, também buscou-se identificar se havia características desses locais que pudessem ser preferenciais a organismos dessas comunidades.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma região de transição entre dois biomas onde foram utilizadas duas fitofisionomias, uma de Cerrado, a Savana Florestada (SF), e a outra da Floresta Amazônica, a Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) (IBGE, 2012; 2021), no norte do estado de Mato Grosso (Figura 7). A região compreende uma paisagem com áreas agrícolas e remanescentes de vegetação nativa e apresenta domínio climático Am (tropical de monção), segundo a classificação de Köppen-Geiger para o Brasil, com temperatura média anual atingindo valores superiores a 26 °C e precipitação anual entre 2500 e 3100 mm (ALVARES et al., 2013). É caracterizada por duas estações climáticas bem definidas, com chuvas abrangendo os meses de outubro a abril e a seca de maio a setembro (SOUZA et al., 2013). Há predominância de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Plintossolo Pétrico com relevo que varia de plano a ondulado (IBGE, 2021).

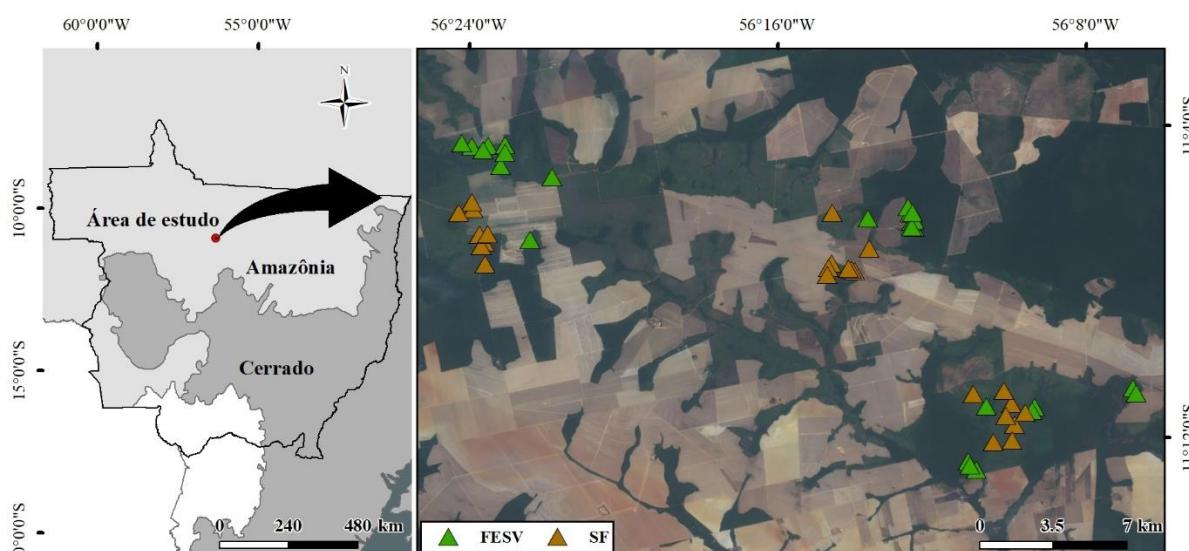


Figura 7. Áreas de Savana Florestada (SF), e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) na região de contato Savana/Floresta Estacional no bioma Amazônia, norte do estado de Mato Grosso. Imagem do satélite Landsat-8, data 14-10-2020, cena 227-068, composição das bandas 4, 3, 2 (RGB).

2.2 Amostragem da vegetação, solo e macrofauna

Em cada fitofisionomia foram alocadas 24 parcelas de 1000 m² (10 x 100 m), nas quais foram obtidas informações sobre vegetação, solo e macrofauna. Para análise da vegetação, nas parcelas de Savana Florestada foram mensurados e identificados todos os indivíduos com circunferência à altura do solo (CAS, 30 cm do solo) \geq 20 cm e na Floresta Estacional Sempre Verde Submontana todos os indivíduos arbustivos/arbóreos com circunferência à altura do peito (CAP, 1,30 cm do solo) \geq 30 cm (ROCHA FILHO et al., 2017). Com esses dados, foi determinada a densidade (ind ha⁻¹), área basal (m² ha⁻¹) e riqueza de espécies. Além disso, em cada parcela também foram coletadas duas amostras de serapilheira, com auxílio de um gabarito (26 x 26 cm). Posteriormente, o material foi seco em estufa (65 °C) para determinação do estoque de serapilheira (Mg ha⁻¹), utilizando a equação abaixo.

$$\text{Estoque de serapilheira (Mg ha}^{-1}\text{)}: \left(\frac{\text{Peso das amostras secas (g)}}{\text{Área gabarito (m}^2\text{)}} \right) * 0,01$$

Para caracterização do solo foram coletadas duas amostras de solo compostas, por parcela, na profundidade de 0 a 20 cm, com as quais, segundo os métodos descritos por Donagema et al. (2011), determinou-se os teores de carbono orgânico total (COT), fósforo (P), pH (em água), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), sódio (Na^+), acidez extraível (H^+Al^{3+}), soma de bases (SB), teores de areia (fina e grossa), silte e argila.

Para caracterização da macrofauna foi utilizado o método de amostragem de monólitos de solo baseado no recomendado pelo Programa Tropical Soil Biology and Fertility – TSBF (ANDERSON & INGRAM, 1993). Em cada parcela amostral foram coletados dois monólitos de solo (20 x 20 cm) na profundidade de 0-10 cm. A triagem das amostras foi realizada manualmente com a coleta e contagem de todos os indivíduos com mais de 10 mm de comprimento ou com diâmetro corporal superior a 2 mm (AQUINO, 2001). Os indivíduos foram armazenados em álcool 70% para posterior classificação taxonômica em nível de ordem, subordem e classe (RAFAEL et al., 2024). Todas as amostragens de solo foram realizadas no início da estação chuvosa, quando a ocorrência de chuva na região ainda era esparsa.

2.3 Análise de dados

A estrutura da comunidade da macrofauna foi comparada entre as fitofisionomias amostradas por meio da contribuição dos grupos taxonômicos (%) em cada comunidade e sua frequência de ocorrência (%). A abundância e riqueza média que foram analisadas pelo teste de Mann-Whitney ($\alpha:0,05$), conforme condição dos pressupostos estatísticos (normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias). A diversidade da macrofauna foi avaliada por meio de rarefação utilizando a série de Hill (ordem $q=0$, riqueza de espécies) (CHAO et al., 2014) com o pacote “iNEXT” (HSIEH et al., 2024) no software R versão 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022).

Para testar a similaridade na composição da macrofauna entre as fitofisionomias, foi realizada uma análise multidimensional não métrica (nMDS), com dados de abundância dos grupos taxonômicos e utilizando o índice de Bray-Curtis, seguida pelo teste estatístico ANOSIM (9999 permutações), os quais foram realizados por meio do pacote “vegan” (OKSANEN et al., 2022) no software R versão 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022).

Com intuito de verificar se há relações entre a macrofauna e variáveis do solo e vegetação, aplicou-se a análise de correlação de Spearman ($\alpha:0,05$) para os dados de abundância e riqueza da macrofauna. Além disso, foi aplicada uma Análise de Componentes Principais (PCA) utilizando a abundância de grupos taxonômicos. Para essas análises foram utilizados os pacotes “Hmisc” (HARRELL, 2023) e “FactoMineR”(LE et al., 2008) no software R versão 4.2.1(R CORE TEAM, 2022).

3 RESULTADOS

Com a análise da ocorrência da macrofauna, identificou-se diferença desse componente entre as fitofisionomias. Observou-se diferença significativa (p-valor: 0,002) na abundância média de indivíduos da macrofauna entre as fitofisionomias, com maior abundância na SF (14,66 indivíduos), e menor na FESV (4,29 indivíduos). Já a riqueza média não apresentou diferença significativa (p-valor= 0.132), de modo que SF e FESV apresentaram, respectivamente 1,73 e 1,46 grupos. Não houve ocorrência de indivíduos da macrofauna em 27,08% dos monólitos amostrados na FESV (13 monólitos) e 14,58% na SF (sete monólitos).

Os indivíduos amostrados foram distribuídos em 15 grupos taxonômicos, refletindo a semelhança na riqueza total entre as fitofisionomias. Na FESV foram observados 14 grupos, com indivíduos dos grupos Orthoptera e Pseudoscorpionida ocorrendo exclusivamente nessa fitofisionomia; já na SF ocorreram 13 grupos, com ocorrência de Blattodea exclusiva à essa fitofisionomia. Tanto na SF quanto na FESV, Hymenoptera (Formicidae) e Isoptera representaram, em conjunto, mais de 70% do indivíduos da comunidade (Tabela 6). Já com relação à ocorrência, Hymenoptera, Isoptera, Chilopoda e Coleoptera (larvas e adultos) foram os grupos observados com maior frequência nas duas fitofisionomias (Tabela 6).

Tabela 6. Contribuição relativa (%) na composição e Frequência absoluta-FA (%) dos grupos taxonômicos da macrofauna do solo em Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).

Grupos taxonômicos	SF		FESV	
	Contribuição (%)	FA (%)	Contribuição (%)	FA (%)
Aranae	0,85	8,33	0,97	4,17
Auchenorrhyncha	0,14	2,08	1,46	6,25
Blattodea	0,43	6,25	0,00	0,00
Chilopoda	3,84	16,67	4,85	20,83
Coleoptera - adulto	1,85	16,67	7,77	22,92
Coleoptera - larva	2,98	35,42	4,85	18,75
Diptera - adulto	0,43	4,17	0,49	2,08
Diptera - larva	0,28	4,17	1,46	6,25
Gastropoda	0,14	2,08	0,49	2,08
Heteroptera	0,71	2,08	0,49	2,08
Hymenoptera	48,15	41,67	47,57	31,25
Isoptera	40,06	25,00	24,27	12,50
Oligochaeta	0,14	2,08	2,43	6,25
Orthoptera	0,00	0,00	0,97	4,17
Pseudoscorpionida	0,00	0,00	1,94	6,25

O nMDS (Figura 8) indicou que as fitofisionomias são semelhantes na composição da macrofauna, o que foi confirmado pela análise de similaridade (ANOSIM – R= 0,0245, p-valor= 0,1861). No diagrama de ordenação resultante do nMDS, é possível observar quase total intersecção dos grupos taxonômicos entre as fitofisionomias. Contudo, as curvas de rarefação indicaram que a diversidade de espécies da macrofauna da FESV era maior que a diversidade da SF (Figura 9).

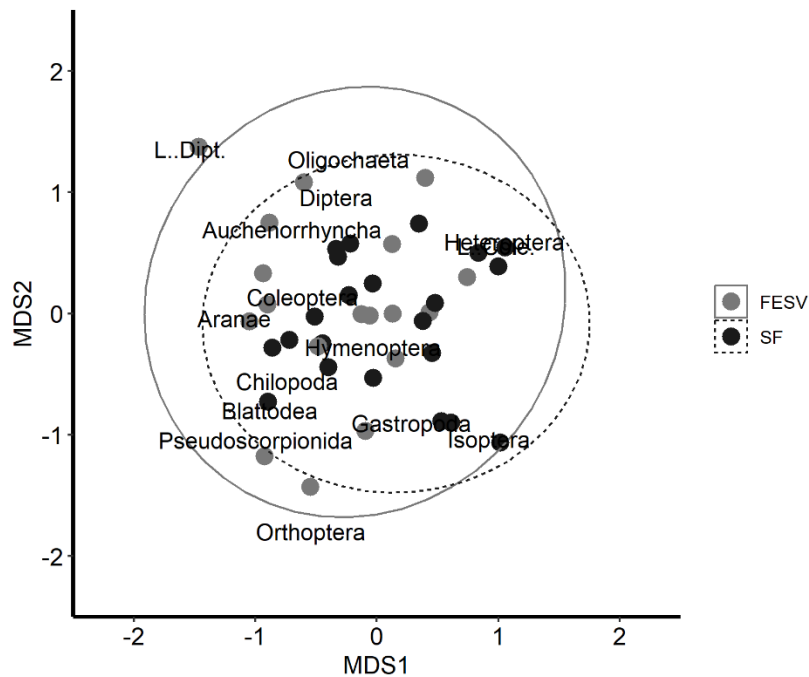


Figura 8. Ordenação de escala multidimensional não métrica (nMDS) baseada nas dissimilaridades de Bray-Curtis para a comunidade da macrofauna em Savana Florestada e (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV). Stress: 0,1142. L..Dipt.: Larva de Diptera; L. Cole. (sobreposto a Heteroptera na figura): Larva de Coleoptera.

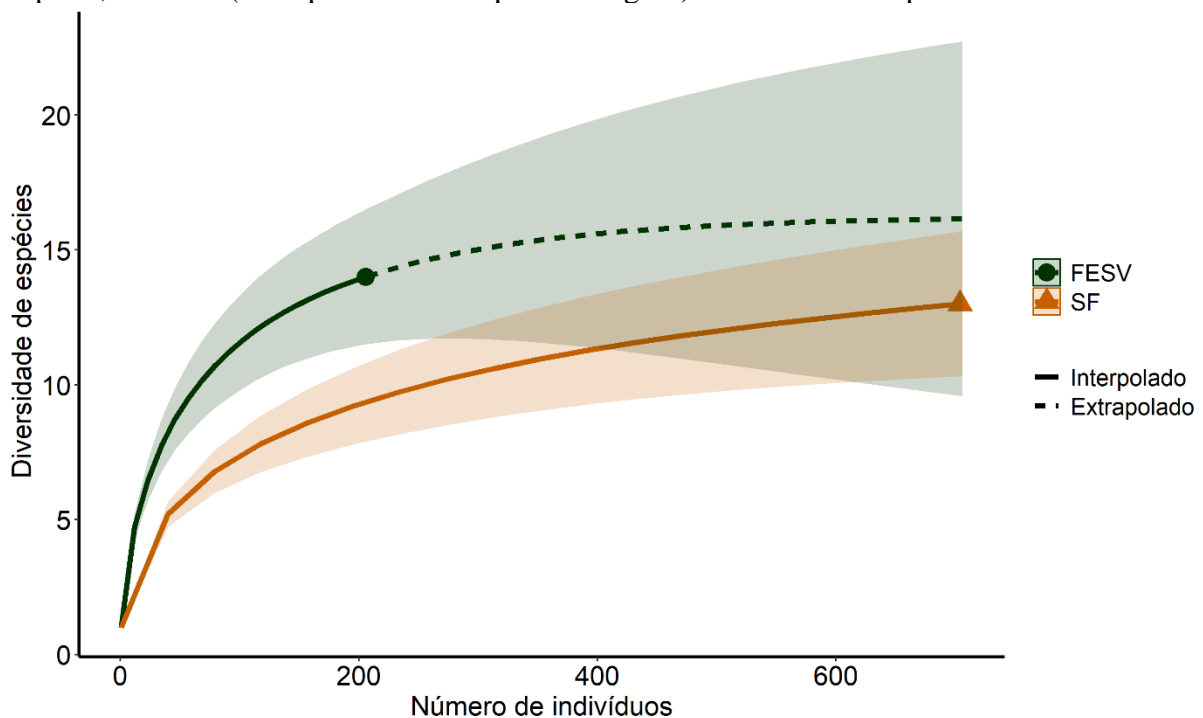


Figura 9. Número de espécies (curvas de rarefação e intervalo de confiança de 95%) para a comunidade da macrofauna edáfica na Savana Florestada e (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).

Foram verificadas correlações significativas ($p < 0,05$) da riqueza e abundância total da macrofauna com variáveis do solo e da vegetação (Figura 10). A riqueza da macrofauna

apresentou correlação, positiva ($r= 0,42$), com a densidade da vegetação, enquanto a abundância foi correlacionada positivamente com pH ($r= 0,45$), argila ($r= 0,35$) e densidade da vegetação ($r= 0,60$) e negativa com areia fina ($r= -0,38$), riqueza e área basal da vegetação ($r= -0,33$, $r= -0,46$, respectivamente).

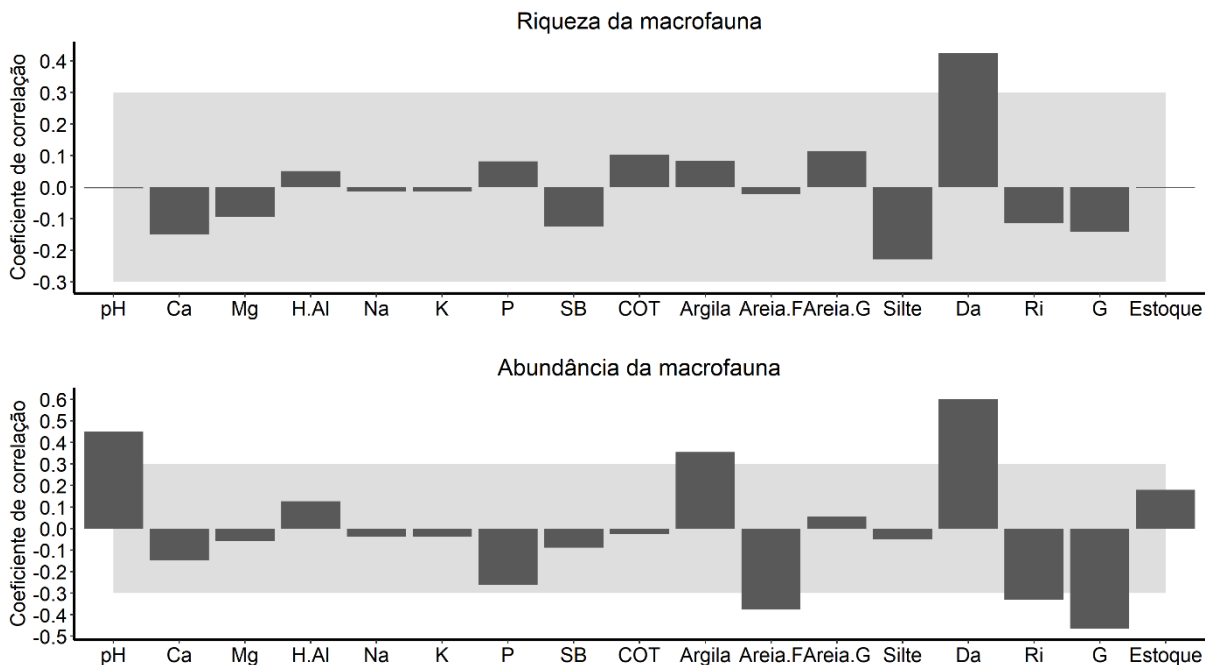


Figura 10. Coeficientes de correlação se Spearman entre riqueza, abundância e variáveis do solo e da vegetação das fitofisionomias. Areia.F: areia fina; Areia.G: areia grossa; Da: densidade da vegetação; Ri: riqueza da vegetação; G: área basal; Estoque: estoque da serapilheira. Polígono na cor cinza claro indica a região de não significância das correlações.

Quando considerado os grupos taxonômicos, a análise de componentes principais ordenou 24,59% da variabilidade dos grupos associada à vegetação e 22,93% com o solo, considerando os dois eixos principais. Para a vegetação, observou-se, principalmente, relação positiva entre densidade da vegetação, estoque da serapilheira e os grupos Hymenoptera, Isoptera e Coleoptera (larvas) e negativa do estoque de serapilheira e Diptera (larvas) (Figura 11-A), associadas principalmente à SF. Já em relação às variáveis do solo (Figura 11-B), cálcio e magnésio, e conseqüentemente a soma de bases, relacionaram-se negativamente com a ocorrência de coleopteras, larvas de Diptera e Aranae; enquanto pH e teor de argila relacionaram-se positivamente com Isoptera e Gastropoda. Os locais onde não ocorreram grupos da macrofauna foram associados positivamente à riqueza da vegetação e à soma de bases, e negativamente à densidade da vegetação.

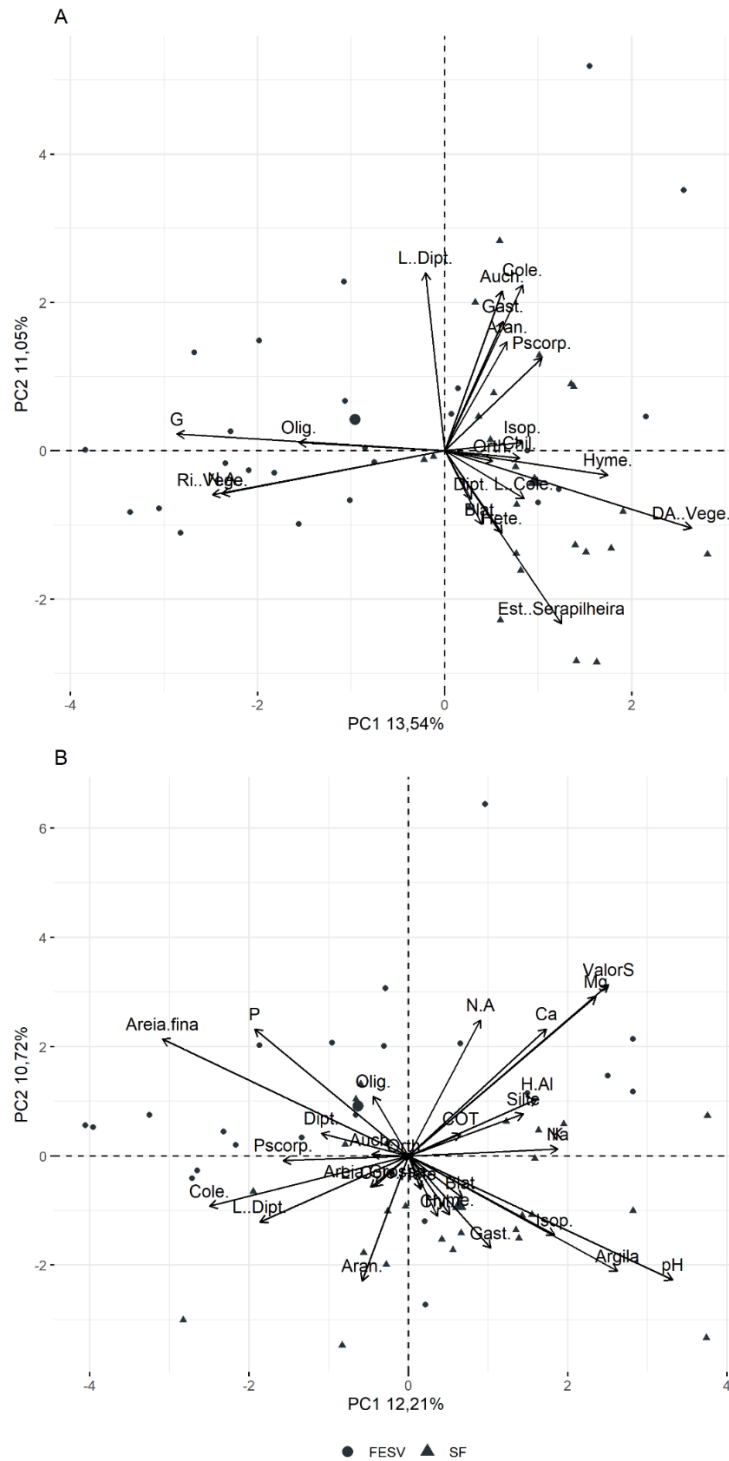


Figura 11. Diagrama de ordenação da Análise de Componentes Principais dos grupos taxonômicos da macrofauna com variáveis da vegetação (A) e do solo (B) nas fitofisionomias. N.A: Locais de não ocorrência da macrofauna., Aran.=araneae, Auch.= auchenorrhyncha, Blat.= blattodea, Chil.=chilopoda, Cole.=coleoptera, Dipt.= díptera, Gast.= gastropoda, Hete.= heteroptera, Hyme.=himenoptera, Isop.=isoptera, L. Cole.= larva de coleoptera, L. Dipt.=larva de díptera, Olig.= oligochaeta, Orth.= orthoptera, Pscorp.=pseudoescorpionida, DA. Vege.=densidade da vegetação, Ri. Vege.=riqueza da vegetação, G= área basal, Est. Serapilheira=estoque de serapilheira.

4 DISCUSSÃO

A análise da macrofauna edáfica amostrada nas fitofisionomias Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) indicou que as fitofisionomias compartilham similaridade na composição de grupos da fauna do solo. Quando considerada a diversidade, apesar da riqueza de espécies ter sido semelhante, na Floresta Estacional Sempre Verde Submontana verificou-se maior diversidade, que foi reflexo, principalmente, da ocorrência exclusiva dos grupos Orthoptera e Pseudoscorpionida.

Nas duas fitofisionomias pode-se constatar a influência da dominância dos grupos Hymenoptera e Isoptera. O grupo Hymenoptera, nessas áreas representado essencialmente pelas formigas (Formicidae), é frequentemente reportado como um dos grupos taxonômicos mais abundantes em solos de diversas formações vegetais (CAMARA et al., 2018). A família Formicidae é considerada como importante bioindicadora por sua ocorrência ser correlacionada com diversas características ambientais, incluindo temperatura e disponibilidade de recursos (FRANCO & FEITOSA, 2018). A infraordem Isoptera também é considerada como um grupo particularmente abundante e diversificado em florestas e savanas tropicais, com capacidade de digerir celulose e influenciar, assim, na decomposição, reciclagem de nutrientes minerais e formação do solo (RAFAEL et al., 2024). Os indivíduos desse grupo cavam túneis, movimentam material verticalmente e cimentam partículas, acelerando a mineralização da matéria orgânica e melhorando a estrutura do solo, além de auxiliar na atividade dos microrganismos (RAFAEL et al., 2024). Os grupos Hymenoptera (Formicidae) e Isoptera caracterizam-se, também, por seu hábito social, sendo altamente ativos no solo e que se locomovem em grupos (SANTOS et al., 2021; RAFAEL et al., 2024), destacando-se assim sua predominância na comunidade nas fitofisionomias. O destaque desses grupos, em detrimento dos demais que ocorreram, já foi relatado na região amazônica em local próximo ao deste estudo, como verificado por Gonçalves e Garlet (2024).

Observou-se baixa relação da variabilidade dos grupos taxonômicos com a variabilidade das características do solo e da vegetação, já que somente cerca de 22,93 e 24,59% das associações foram explicadas pela PCA. Isso pode ser devido ao fato de a maior parte dessas variáveis estar correlacionada com as fitofisionomias, e, portanto, como houve semelhança na composição da macrofauna entre SF e FESV, o efeito dessas variáveis na distribuição dos grupos taxonômicos da macrofauna não foi evidente. Contudo, identificou-se que há relação da vegetação com a abundância e riqueza da comunidade da macrofauna, de modo que locais com maior densidade de indivíduos vegetais apresentaram maior abundância e maior riqueza da macrofauna; por outro lado, onde a vegetação é mais diversa ocorreu menor abundância da macrofauna, inclusive com os locais onde não houve ocorrência de macrofauna. Ou seja, pode-se dizer que a ocorrência da macrofauna, nessas fitofisionomias, é influenciada positivamente pela quantidade de recursos disponível e não pela diversidade de recursos. A maior densidade da vegetação disponibiliza recursos em maior quantidade para serem utilizados pela macrofauna, como maior estoque de serapilheira e até mesmo maior densidade de raízes no solo, o que favorece o aumento da abundância de indivíduos e a diversidade de grupos taxonômicos (BATISTA et al., 2023). Por outro lado, o aumento da diversidade de grupos contribui com o aumento de interações tróficas, como a competição, e pode favorecer grupos mais competitivos (VASCONCELOS et al., 2020) e/ou com característica de predadores, como Hymenoptera, Isoptera que foram grupos numerosos, e larvas de Coleoptera (CAMARA et al., 2018). Esses três grupos ocorreram em locais com mais disponibilidade de recursos, ou seja, maior abundância de vegetação e estoque de serapilheira.

As variáveis do solo apresentaram efeitos significativos somente na abundância da macrofauna e não na riqueza, com os valores de pH e teor de argila correlacionados positivamente com a quantidade de indivíduos. O grupo Isoptera, por exemplo, um dos mais

abundantes e associado positivamente à argila, utiliza a argila como principal elemento estrutural de seus ninhos, da mesma forma com que algumas espécies de formigas dependem desse componente do solo para estruturação de seus formigueiros (GIESEL, 2014; OBERST et al., 2016). Além disso, a argila favorece a manutenção da umidade do solo, o que já foi relatado influenciar positivamente a atividade de diversos grupos, como Isoptera e Hymenoptera (Formicidae) (SANTOS et al., 2021). O pH do solo também já foi relatado como uma variável que favorece a comunidade da fauna do solo, ou seja, há uma correlação positiva entre essas variáveis (GIÁCOMO et al., 2017).

5 CONCLUSÕES

As diferenças de estrutura e composição da vegetação não refletiram em diferenças na riqueza dos grupos taxonômicos das comunidades da macrofauna do solo, de modo que em ambas as fitofisionomias houve semelhança até quanto a dominância dos grupos Hymenoptera e Isoptera. Contudo, foi possível constatar que isso não acontece com a abundância de indivíduos, pois houve maior quantidade de indivíduos da comunidade na Savana Florestada.

Quanto à ocorrência dos grupos taxonômicos, as variáveis estudadas relacionadas ao solo e vegetação não foram preditoras com elevado poder de explicação. Em relação à vegetação, a ocorrência e riqueza da macrofauna, bem como os grupos dominantes, Hymenoptera e Isoptera, relacionaram-se com a quantidade de recursos (densidade da vegetação e estoque da serapilheira) e não à diversidade de recursos (riqueza da vegetação). Além disso, a abundância da macrofauna, na qual se inclui o grupo Isoptera, um dos mais abundantes das comunidades, foi relacionada positivamente com pH e teor de argila do solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2 ed. Wallingford: CAB International, 221 p., 1993.
- AQUINO, A. M. **Manual para coleta de macrofauna do Solo**, Documento Nº 130 ISSN 1517-8498, Embrapa Agrobiologia, 2001.
- BARETTA, D., et al. Soil fauna and its relation with environmental variables in soil management systems. **Revista Ciência Agronômica**. v. 45:871-9, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500002>
- BATISTA, I. et al. Soil macrofauna correlations with soil chemical and physical properties and crop sequences under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47:e0230006, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20230006>
- BROWN, G. G. et al. **Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais**. In: PARRON, L. M. et al. *Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica*, Embrapa Florestas, 2015.
- BUSSINGER, A. P. **Efeito de diferentes usos do solo no cerrado sobre a composição da fauna edáfica**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, 119 p., 2018.
- CAMARA, R. et al. Effects of Natural Atlantic Forest Regeneration on Soil Fauna, Brazil. **Floresta e Ambiente**. v. 25: e20160017, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.001716>
- CHAO, A. et al. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. **Ecological Monographs**, v. 84, n.1, 2014.
- DÁVILA, G. C. C. et al. Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. **Acta Botánica Cubana**. v. 221, 2022.
- DONAGEMMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 230 p., 2011.
- FRANCO, W.; FEITOSA, R. M. First standardized inventory of ants (Hymenoptera: Formicidae) in the natural grasslands of Paraná: New records for Southern Brazil. **Papéis Avulsos de Zoologia**. v. 58:e20185812, 2018. <http://doi.org/10.11606/1807-0205/2018.58.12>
- GEISEL, A. **Espécies, hábitos e manejo ecológico de formigas cortadeiras dos campos de Lages**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Universidade do Estado de Santa Catarina, 147 p., 2014.
- GIÀCOMO, R.G. et al. Soil fauna: Bioindicator of soil recovery in Brazilian savannah. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**. v. 12, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i2a5443>

GONÇALVES, P. P.; GARLET, J. Fauna edáfica em diferentes ambientes na Amazônia meridional. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 2, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-030>

GUTIÉRREZ, J. A. M., et al. Taxones superiores de hormigas como substitutos de la riqueza de especies, en una cronosecuencia de bosques secundarios, bosque primário y sistemas agroforestales en la Amazonía Oriental, Brasil. *Revista de Biología Tropical*. v. 65:279-91, 2017. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i1.23526>

HARRELL Jr., F. Hmisc: Harrell Miscellaneous, 2023. R package version 5.1-1, <<https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>>.

HSIEH, T. C. et al. iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity. R package version 3.0.1, 2024. URL: <http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software-download/>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências - Mapa Temático e Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil**, 2021. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> e <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/24252-macrocaracterizacao-dos-recursos-naturais-do-brasil.html?=&t=downloads>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. ISSN 0103-9598, 271 p., 2012.

KORAKASI, V. et al. **Macrofauna - Conhecendo a vida do solo**. Ed. UFLA, 32 p., ISBN: 978-85-8127-066-1, 2017.

LE, S. et al. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, v. 25, n. 1, 1-18, 2008. 10.18637/jss.v025.i01

MELO, F. V. et al. A importância da meso e macrofauna do solo na fertilidade e como bioindicadores. *Boletim Informativo da SBCS*. p. 38-43, 2009.

OBERST, S. et al. Termites utilise clay to build structural supports and so increase foraging resources. *Scientific Reports*. v. 8, n. 6, e20990, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/srep20990>

OLIVEIRA FILHO, L.C.I. **Fauna edáfica em ecossistemas florestais**. In: FORTES, L. P.; NETO, P. F. (Org.). *Ciências Ambientais*. 1ed. Taubaté: Editora da UNITAU, v. II, p. 10-48, 2018.

OKSANEN, J. et al. vegan: Community Ecology Package, 2022. R package version 2.6-4, <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

PEÑA-PEÑA, K.; IRMLER, U. Moisture seasonality, soil fauna, litter quality and land use as drivers of decomposition in Cerrado soils in SE-Mato Grosso, Brazil. *Applied Soil Ecology*. v. 107, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.007>.

PIEDADE, A. R. et al. Sazonalidade da comunidade de macrofauna do solo em florestas ripárias da Amazônia Oriental. **Anais...** V Congresso Latinoamericano de Agroecología, ISBN 978-950-34-1265-7, 2015.

RAFAEL, J. A. et al. **Insetos do Brasil: Diversidade e Taxonomia**. Editora INPA, 880 p., ISBN: 978-65-5633-046-4, 2024.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. URL <https://www.R-project.org/>.

ROCHA FILHO, J. A. et al. Composição da vegetação arbórea de diferentes tipologias florestais na região Centro-Norte do Mato Grosso. **Scientific Electronic Archives**. XI Encontro de Botânicos do Centro-Oeste, p. 385-387, 2017.

SANTOS, R. N. et al. Community ecology of soil fauna under periodically flooded forest and anthropic fields. **Floresta e Ambiente**. v. 28: e20200052, 2021. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0052>

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**. v. 01, n. 01, p. 34-43, 2013.

VASCONCELOS, W. L. F. Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 44:e0190136, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190136>

CAPÍTULO III

RELAÇÕES ENTRE O ESTOQUE DE SERAPILHEIRA E SEUS NUTRIENTES COM PARÂMETROS ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO EM ÁREA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA-CERRADO

RESUMO

A serapilheira tem significativa contribuição na manutenção da fertilidade de ecossistemas ao transferir nutrientes da vegetação de volta ao solo. Neste estudo utilizou-se o modelo de aprendizado de máquina, *Random Forest*, para testar a potencialidade de dados do satélite Sentinel-2 na modelagem do estoque de serapilheira e teor de nutrientes (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) da vegetação de duas fitofisionomias, Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV), na região de transição entre Amazônia e Cerrado no estado de Mato Grosso. As coletas de serapilheira foram realizadas no mês de dezembro de 2020 e a partir desse material foi determinado o estoque de serapilheira e os teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio. Para verificar a potencialidade do uso de dados derivados de satélite na estimativa das variáveis da serapilheira, foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 (A e B) de maio a outubro do mesmo ano de coleta, meses em que não havia incidência de nuvens nos locais de amostragem. Para implementação da *Random Forest* foram utilizadas as reflectâncias das bandas espectrais (2-8, 8A, 11 e 12) e índices derivados das bandas, sendo eles *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Leaf Area Index* (IAF) e *Sentinel-2 Red-edge-position* (S2REP). Observou-se que o nitrogênio apresentou correlação significativa (ora positiva, ora negativa) com todas as bandas espectrais e índices. Já o fósforo e potássio apresentaram, em menor magnitude, correlação significativa negativa com a reflectância na região das bandas B2 a B5, B11 e B12, e positiva com a banda B8A e com os índices NDVI e S2REP. A variável estoque da serapilheira não demonstrou correlação significativa com os dados do Sentinel-2. Observou-se melhor desempenho da *Random Forest* na modelagem do teor de nitrogênio, com menores erros quando se utilizou as bandas espectrais, comparado ao uso dos índices. Os preditores com maior importância para modelagem do teor de nitrogênio foram as bandas espectrais B4, B2, B3 e B5 e os índices S2REP e NDVI nos meses de maio e junho, respectivamente. Assim, conclui-se que o conteúdo de nitrogênio presente na serapilheira se relaciona, principalmente, à absorção da radiação no espectro visível pelos pigmentos contidos nas folhas do dossel da vegetação.

Palavras-chave: Sentinel-2, nitrogênio, *Random Forest*

ABSTRACT

Litter has a significant contribution to maintaining the fertility of ecosystems by transferring nutrients from vegetation back to the soil. In this study, the machine learning model, Random Forest, was used to test the potential of data from the Sentinel-2 satellite in modeling litter stock and nutrient content (Nitrogen, Phosphorus and Potassium) in two phytophysiognomies, Savanna Forested (SF) and Submontane Evergreen Seasonal Forest (SESF), in the transition region between the Amazon and Cerrado in the state of Mato Grosso. Litter collections were carried out in December 2020 and from this material the litter stock and the content of the macronutrients nitrogen, phosphorus and potassium were determined. To verify the potential of using data derived from satellites in estimating litter variables, were used images from the Sentinel-2 satellite (A and B) from May to October of the same collection year, months in which there was no incidence of clouds in the sampling locations. To implement Random Forest, the reflectances of the spectral bands (2-8, 8A, 11 and 12) and indices derived from the bands were used, namely Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Leaf Area Index (IAF) and Sentinel-2 Red-edge-position (S2REP). It was observed that nitrogen showed a significant correlation (sometimes positive, sometimes negative) with all spectral bands and indices. Phosphorus and potassium showed, to a lesser extent, a significant negative correlation with reflectance in the region of bands B2 to B5, B11 and B12, and positive with band B8A and with the NDVI and S2REP indices. The litter stock variable did not demonstrate a significant correlation with the Sentinel-2 data. With Random Forest, better performance was observed in modeling nitrogen content, with lower errors when using spectral bands, compared to using indices. The most important predictors for modeling nitrogen content were the spectral bands B4, B2, B3 and B5 and the S2REP and NDVI indices in the months of May and June, respectively. Thus, it is concluded that the nitrogen content present in the litter is mainly related to the absorption in visible spectrum radiation by the pigments contained in the leaves of the vegetation canopy.

Keywords: Sentinel-2, Nitrogen, *Random Forest*

1 INTRODUÇÃO

A região de transição entre o Cerrado e a Amazônia é caracterizada por um mosaico de fitofisionomias, que são condicionadas por uma combinação de fatores bióticos e abióticos. Os fatores locais relacionados à físico-química do solo, principalmente fertilidade e textura, podem funcionar como filtros ambientais nessas áreas ao relacionar essas características com a formação dos diferentes tipos de vegetação (ZORTEA, 2018; ELIAS et al., 2019). Nessa região, a maior parte da vegetação apresenta maiores taxas de recrutamento e mortalidade, quando comparada à região central desses biomas, além de maior aporte de nutrientes, aspectos intimamente relacionados à camada de serapilheira e sistema radicular (MARIMON et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2017a; VALADÃO et al., 2021). Isso fornece fortes evidências de que a entrada de biomassa e liberação de nutrientes por meio da produção de serapilheira, associada aos ciclos biogeoquímicos, podem impulsionar a distribuição das fitofisionomias em solos distróficos dessa região (OLIVEIRA et al., 2017a).

A serapilheira tem significativa contribuição na transferência e incorporação de carbono e elementos minerais da vegetação para o solo. A sua deposição, bem como o estoque de nutrientes, podem ser influenciadas por diversos fatores relacionados à sazonalidade climática, como precipitação e temperatura, e aos ciclos e características da vegetação, como a fenologia, estrutura, composição, estágio sucessional, entre outros (FREIRE et al., 2020; ARAUJO et al., 2021; MACHADO et al., 2021; WINK et al., 2022). Há relatos de efeitos positivos mais intensos de espécies de árvores fixadoras de nitrogênio e espécies decíduas na produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes (WINBOURNE et al., 2018; MACHADO et al., 2021), da sazonalidade de deposição da serapilheira em função da precipitação, com maior contribuição do período de seca (SALES et al., 2020; WINK et al., 2022), além de maior deposição em função da estrutura mais densa da vegetação (SALES et al., 2020).

Fatores relacionados à idade, a sinais ambientais, a estresses bióticos ou abióticos, que refletem em estratégias fisiológicas das plantas, como a caducifolia para evitar a perda de água através da transpiração (TAIZ et al., 2017; SALES et al., 2020), fazem com que as plantas depositem parte ou o total de suas folhas no solo. A fração foliar tem sido relatada como o componente de maior proporção na composição da serapilheira e, conseqüentemente, de maior contribuição na quantidade de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2017a; FREIRE et al., 2020; SALES et al., 2020). Esses nutrientes que são transferidos para o solo, posteriormente, são reabsorvidos pela vegetação e realocam-se em diferentes compartimentos das plantas. Há, inclusive relato que indica que diversas espécies arbóreas destinam a maior parte dos nutrientes reabsorvidos para atender a demanda nutricional da copa (SCALON et al., 2022).

Alguns estudos têm elucidado as relações nutricionais entre folhas que compõem a copa e folhas que passaram por abscisão, mostrando que, em geral, nas folhas que passam por abscisão, e que integrarão a serapilheira, a concentração nutricional é menor (BAMBI et al., 2011; TAIZ et al., 2017; MENEZES et al., 2021). Outros estudos relacionaram a composição de nutrientes e pigmentos de folhas do dossel à reflectância derivada do sensoriamento remoto (OMER et al., 2017; CHEMURA et al., 2018; LI et al., 2021; AGUIRRE-GUTIÉRREZ et al., 2021). Porém, poucos ainda são os estudos que procuraram verificar relações da serapilheira, ou de folhas senescentes, com as características espectrais das copas (RAHMAN et al., 2020; GAVRILYUK et al., 2021), principalmente em locais com vegetação heterogênea.

Imagens de satélite de acesso aberto, como do Sentinel-2, têm sido usadas para modelar e mapear propriedades químicas e morfológicas das folhas (RAHMAN et al., 2020; LI et al., 2021; AGUIRRE-GUTIÉRREZ et al., 2021), devido suas resoluções espacial e espectral. A melhoria dessas resoluções nos satélites tem tornado possível obter essas informações mesmo em áreas de vegetação com alta biodiversidade (CHEMURA et al., 2018; GARA et al., 2019; AGUIRRE-GUTIÉRREZ et al., 2021). A identificação de possíveis relações entre

características da serapilheira e dados espectrais pode servir como complemento para amostragens de campo e análises laboratoriais, principalmente em grandes áreas, e assim reduzir tempo e custos dos estudos, já que imagens de sensoriamento remoto fornecem múltiplas variáveis espaciais e temporais para simular relações solo-planta. Diante disso, este capítulo objetiva caracterizar a resposta espectral de duas fitofisionomias predominantes na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, no estado de Mato Grosso, visando verificar a potencialidade do uso do satélite Sentinel-2 para modelagem do conteúdo de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) e estoque da serapilheira dessas vegetações. Além disso, especificamente, saber se há um melhor período de aquisição de imagens para essa finalidade e qual preditor relacionado ao sensoriamento remoto é mais relevante para modelagem dessas variáveis. Como as propriedades da serapilheira são diretamente relacionadas à estrutura e composição da vegetação, esse componente deve potencialmente demonstrar relações indiretas com características espectrais da copa das árvores (GAVRILYUK et al., 2021). Assim, acredita-se que o uso de imagens de satélite possui potencial para avaliar indiretamente as propriedades da serapilheira, uma vez que as bandas espectrais de imagens de satélite e/ou seus derivados podem ser capazes de descrever a variabilidade da cobertura vegetal (GAVRILYUK et al., 2021).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no bioma Amazônia, em região de contato florístico entre as fitofisionomias Savana e Floresta Estacional (IBGE, 2012; 2021) que se localiza há cerca de 100 km do limite com o bioma Cerrado, na região norte do estado de Mato Grosso, Brasil (Figura 12). Essa região é composta por um mosaico de áreas agrícolas e remanescentes de vegetação nativa de fitofisionomias distintas.

Foi estudada a serapilheira coletada em duas fitofisionomias, a saber: Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV), que são as fitofisionomias predominantes na região (IBGE, 2021). A região apresenta o domínio climático Am (tropical de monção), segundo a classificação de Köppen-Geiger para o Brasil, com temperatura média anual atingindo valores superiores a 26 °C e precipitação anual entre 2500 e 3100 mm (ALVARES et al., 2013), existindo duas estações climáticas bem definidas, sendo a chuvosa de outubro a abril e a seca de maio a setembro (SOUZA et al., 2013). Com relação aos solos, são encontrados Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Plintossolo Pétrico localizados em área de relevo que varia de plano a ondulado (IBGE, 2021).

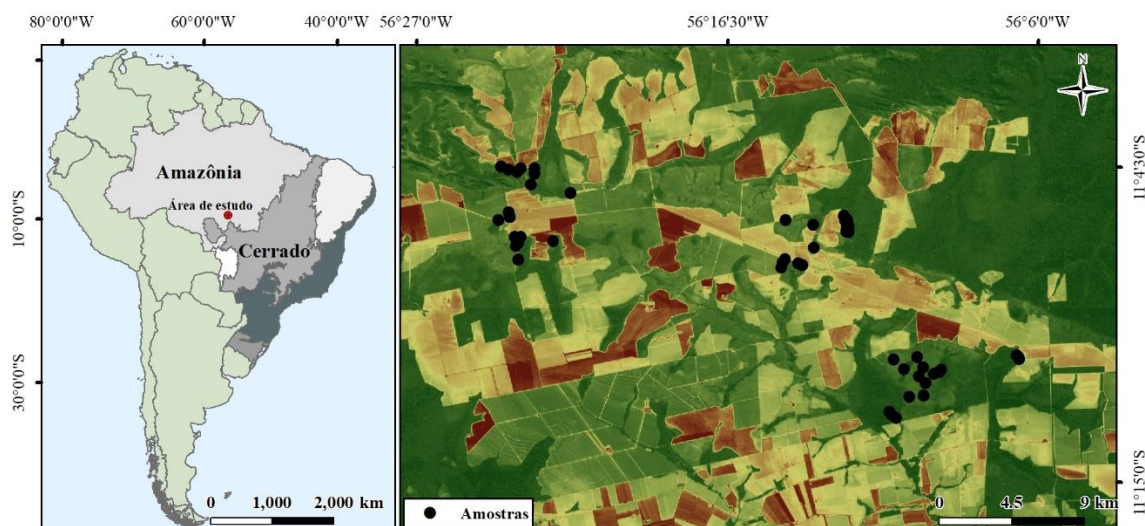


Figura 12. Locais de amostragem da serapilheira na região de contato Savana/Floresta Estacional no bioma Amazônia, norte do estado de Mato Grosso.

2.2 Dados de campo e processamento

O total de 48 parcelas amostrais de 1000 m² (10 x 100 m) foi distribuído em remanescentes de vegetação, sendo 24 parcelas em Savana Florestada e 24 em Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (ROCHA FILHO et al., 2017). Durante o trabalho de campo, no início de dezembro do ano de 2020, foram coletadas aleatoriamente 2 amostras de serapilheira, com um gabarito de 26 x 26 cm, em cada parcela. Em condições de laboratório, essas amostras foram secas em estufa (65 °C) para determinação do peso do material seco. O peso do material seco amostrado (g) por parcela foi convertido em estoque de serapilheira (Mg ha⁻¹).

Para determinação dos teores de N, P e K da serapilheira o material foi submetido à digestão com ácido sulfúrico. O conteúdo de N foi obtido por oxidação úmida em destilação a vapor, P por espectrofotometria e K por fotometria de chama (TEDESCO et al., 1995). Como foram coletadas duas amostras de serapilheira por parcela, foi obtido um valor médio do teor de N, P e K e do estoque de serapilheira por parcela.

2.3 Dados de sensoriamento remoto

Foram obtidos dados de imagens dos satélites Sentinel-2 (A e B), no nível de processamento 2A, do Programa de Observação da Terra da União Europeia – Copernicus por meio da plataforma Google Earth Engine, dos quais dez bandas espectrais foram utilizadas, sendo essas 2 a 8, 8A, 11 e 12 (Tabela 7).

Imagens foram obtidas ao longo do ano 2020, até a data da coleta em campo em dezembro daquele ano. Esse procedimento foi realizado de modo a avaliar se haveria uma melhor época relacionada ao conteúdo de nutrientes e estoque de serapilheira. Para evitar a influência de nuvens nos dados, foram selecionadas as imagens com menos de 20% de cobertura de nuvens. Para obter os dados de reflectância de cada parcela amostral utilizou-se o polígono correspondente à localização geográfica de cada parcela de forma a se verificar a reflectância dos pixels incidentes na área da parcela e, posteriormente, calcular a reflectância média desses pixels. Os dados de reflectância utilizados expressam as propriedades intrínsecas dos objetos em refletir a radiação eletromagnética incidente sobre eles (PONZONI et al., 2012).

Após esse primeiro filtro, foi realizada a inspeção de cada imagem selecionada com intuito de verificar a possível presença de nuvens em alguma parcela amostral. Quando houve a incidência de nuvem em pelo menos uma parcela, a respectiva imagem foi descartada. Assim, foram consideradas aptas (sem nuvens) as imagens dos meses de maio (16 e 26/05), junho (10, 20 e 30/06), julho (10, 20 e 30/07), agosto (09 e 19/08), setembro (08/09) e outubro (03/10), as quais compreendem todo o período de seca na região. Para os meses em que mais de uma imagem estava apta foi realizada uma média mensal dos valores da reflectância. Ao final, havia disponível o valor da reflectância média de cada parcela por banda espectral por mês.

Tabela 7. Características das bandas espectrais dos satélites Sentinel 2A e 2B.

Banda espectral	Tamanho do pixel (m)	Comprimento de onda central (nm)		Descrição
		2A	2B	
B2	10	492,7	492,3	Azul
B3	10	559,8	558,9	Verde
B4	10	664,6	664,9	Vermelho
B5	20	704,1	703,8	Borda vermelha
B6	20	740,5	739,1	Borda vermelha
B7	20	782,8	779,7	Borda vermelha
B8	10	832,8	832,9	Infravermelho próximo
B8A	20	864,7	864,0	Borda vermelha
B11	20	1613,7	1610,4	Infravermelho ondas curtas
B12	20	2202,4	2185,7	Infravermelho ondas curtas

Além dos dados de reflectância em cada banda espectral do Sentinel-2, foram também utilizados índices derivados desses dados, sendo eles *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al. 1974); *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (HUETE, 1988); *Leaf Area Index* (IAF) (ALLEN et al., 2002); e *Sentinel-2 Red-edge-position* (S2REP) (FRAMPTON et al., 2013). O NDVI é matematicamente definido como a razão da diferença do valor da reflectância do infravermelho próximo e do vermelho e a soma dessas reflectâncias (ROUSE et al. 1974). O SAVI também utiliza informações da reflectância do infravermelho próximo e do vermelho, mas busca amenizar os efeitos de “background” do solo por meio da inclusão de um fator de ajuste que permite melhoria na interpretação das variáveis da vegetação (HUETE, 1988). Já o IAF é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação e a unidade de área utilizada por essa vegetação, sendo esse um indicador da biomassa de cada pixel da imagem (ALLEN et al., 2002). O S2REP (nm) corresponde à posição da borda

vermelha na refletância espectral da vegetação e é utilizado como uma medida substituta do conteúdo de clorofila da vegetação (FRAMPTON et al., 2013).

2.4 Análise de dados

A resposta espectral das fitofisionomias foi determinada com base no valor médio da refletância de cada banda espectral ao longo dos meses. Foi atribuído o teste Mann-Whitney ($\alpha= 0,05$) para testar diferenças na refletância das fitofisionomias em cada banda espectral. Para caracterizar a serapilheira amostrada nas fitofisionomias, as variáveis foram comparadas pelo teste Mann-Whitney ($\alpha= 0,05$). Aplicou-se a correlação de Spearman ($\alpha:0,05$) entre a média da refletância de cada banda espectral e o teor dos nutrientes e do estoque da serapilheira para identificar as relações existentes.

Uma análise de regressão utilizando o algoritmo *Random Forest* (BREIMAN, 2001) foi utilizada na modelagem do teor dos nutrientes (N, P e K) e estoque de serapilheira. Esse algoritmo prevê uma resposta a partir de um conjunto de preditores do sensoriamento remoto, aumentando o número de árvores de decisão e calculando a média dos valores previstos por todas as árvores como resultado. A *Random Forest*, método não paramétrico, é insensível à multicolinearidade, ruído de dados, *outliers* e *overfitting* e produz modelos preditivos mais precisos (ALMEIDA et al., 2019; FORKUOR et al., 2020; GAVRILYUKA et al., 2021). A refletância oriunda das imagens espectrais, sem distinção da fitofisionomia, foi aleatoriamente dividida em 60% para formar os dados de treinamento e 40% para o controle do método de regressão. O número de variáveis preditoras selecionadas aleatoriamente em cada nó (*mtry*) foi definido usando o método de busca em grade no pacote “caret” (KUHN, 2008), no software R (R CORE TEAM, 2022), com validação cruzada de dez vezes. Já o parâmetro do número de árvores que crescem na floresta (*ntree*) foi fixado em 200. A *Random Forest* foi implementada para os dados de refletância de cada mês para cada variável preditora (N, P, K e estoque da serapilheira). Em cada mês os procedimentos foram repetidos 20 vezes para verificação da estatística dos resultados. Foram realizados dois grupos de experimentos, um utilizando as 10 bandas individuais do Sentinel-2 e outro com os índices derivados como preditores. A precisão das modelagens foi avaliada usando os dados de controle, não incluídos na construção do modelo, por meio de três indicadores de desempenho: o erro absoluto médio (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2) (FORKUOR et al., 2020; GAVRILYUKA et al., 2021).

Os indicadores de desempenho da *Random Forest* (MAE, RMSE, R^2) foram comparados entre os meses (maio a outubro) e entre os experimentos (bandas x índices) de forma a determinar qual melhor período de aquisição de imagens e qual grupo de preditores é mais relevante. Conforme condições das pressuposições, utilizou-se análise de variância sucedida pelo teste de Tukey ($\alpha:0,05$) e Kruskal-Wallis seguido do teste de Nemenyi ($\alpha:0,05$) para comparação dos indicadores entre os meses e os testes t e Mann-Whitney ($\alpha:0,05$) para comparação entre os experimentos (bandas x índices).

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização da serapilheira e resposta espectral da vegetação

Apesar de não ter sido feita distinção entre as fitofisionomias nas análises estatísticas posteriores, aqui as informações sobre a serapilheira são apresentadas individualmente de forma a conhecer as variações em relação ao tipo de vegetação. Assim, observou-se que a serapilheira das fitofisionomias se diferiu somente quanto ao teor de nitrogênio, que foi maior na FESV (Tabela 8).

Tabela 8. Características da serapilheira em Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).

	SF		FESV	
Estoque (Mg ha ⁻¹)	9,85	(± 3,01) a	8,70	(± 1,93) a
N (g kg ⁻¹)	6,23	(± 1,49) b	9,36	(± 3,14) a
P (g kg ⁻¹)	1,89	(± 0,17) a	1,97	(± 0,24) a
K (g kg ⁻¹)	6,74	(± 0,87) a	7,24	(± 1,37) a

Letras na horizontal representam o teste Mann-Whitney de cada variável entre as fitofisionomias.

Com relação à resposta espectral da vegetação, as fitofisionomias apresentaram a mesma resposta ao longo do espectro (Figura 13), com menos reflectância (maior absorção) na região do visível (B2, B3 e B4), aumentando na borda vermelha (B5) e infravermelho de ondas curtas-2 (B12) e atingindo a reflectância mais evidente na região entre borda vermelha (B6) e infravermelho de ondas curtas (B11).

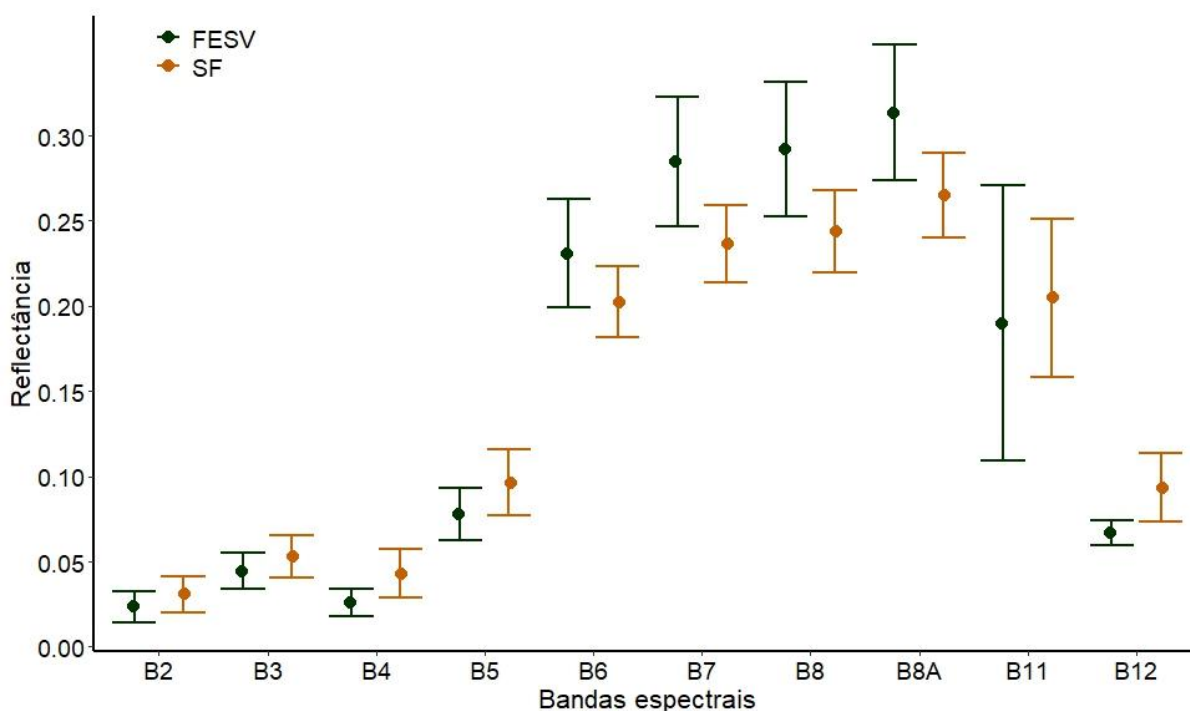


Figura 13. Resposta espectral da Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV) nas bandas espectrais B2 a B8, B8A, B11 e B12 do satélite Sentinel-2 (A e B).

Em relação à reflectância da vegetação nos meses analisados, observou-se uma tendência significativa (p -valor $<0,05$) de aumento da reflectância (Tabela 9) ao longo do período de seca na região do estudo (Figura 14), que se inicia em maio e termina no fim de setembro. Para todas as bandas espectrais do Sentinel-2 obteve-se o coeficiente positivo do teste de Mann-Kendall.

Tabela 9. Estatísticas de tendência de Mann-Kendall e inclinação de Sen para reflectância da vegetação entre os meses de maio a outubro.

Parâmetros	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12
Tau	0,870	1,000	0,870	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sen's slope	0,005	0,006	0,006	0,010	0,013	0,016	0,015	0,018	0,010	0,007
p-valor	0,024	0,008	0,024	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008

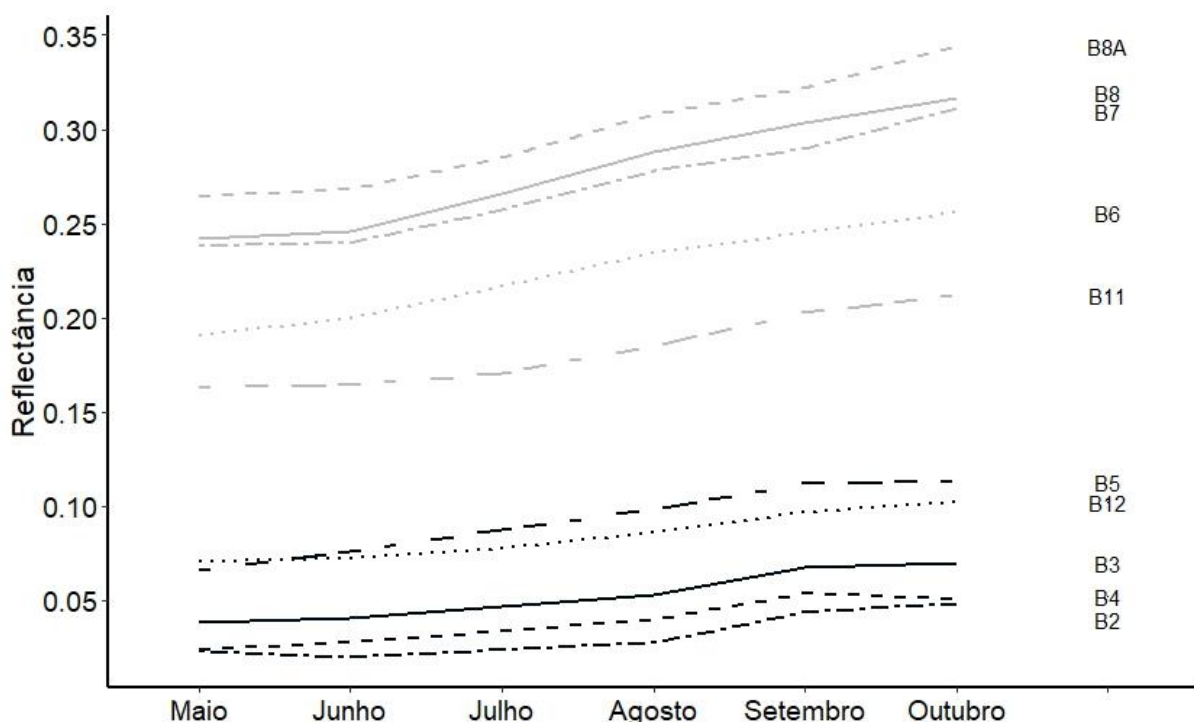


Figura 14. Reflectância da vegetação nas bandas espectrais do satélite Sentinel-2 (A e B) ao longo do período de maio a outubro.

As análises de correlação das variáveis da serapilheira com as reflectâncias observadas em cada banda espectral, mostraram que a variável estoque da serapilheira não foi correlacionada significativamente com os índices e reflectância da vegetação nas bandas ao longo do espectro analisado (Figura 15). Já os teores de Fósforo e Potássio apresentaram correlação significativa negativa com a reflectância na região do visível e borda vermelha (B2 a B5) e infravermelho de ondas curtas (B11 e B12), e positiva com borda vermelha (B8A) e índices NDVI e S2REP.

O teor de nitrogênio foi a variável que apresentou correlação significativa com todas as bandas espectrais, sendo esta correlação negativa na região entre bandas B2 a B5, B11 e B12 e positiva entre B6 e B8A, e positiva também com todos os índices.

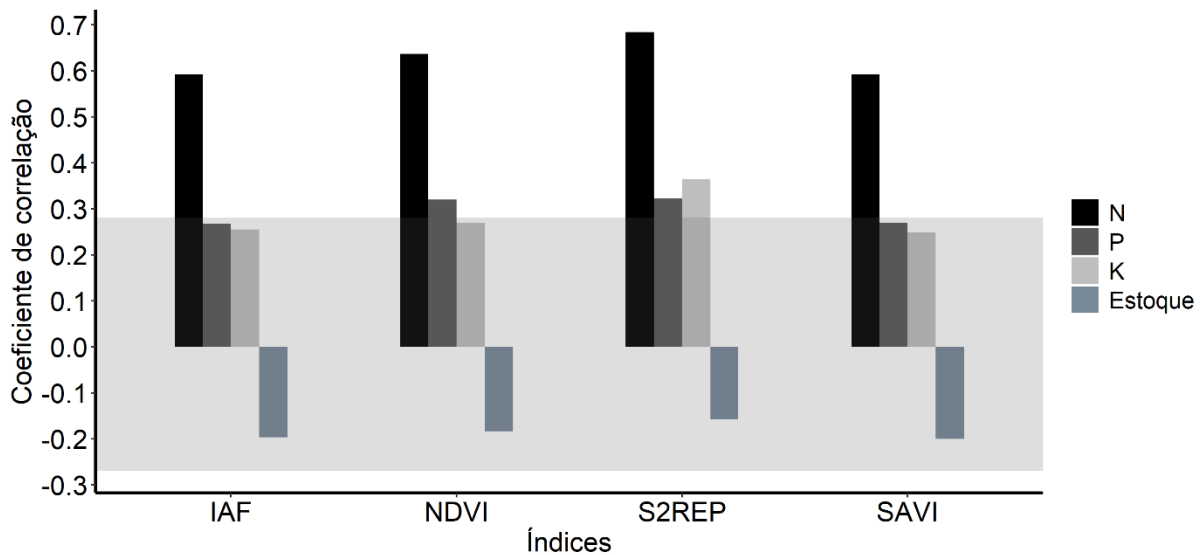
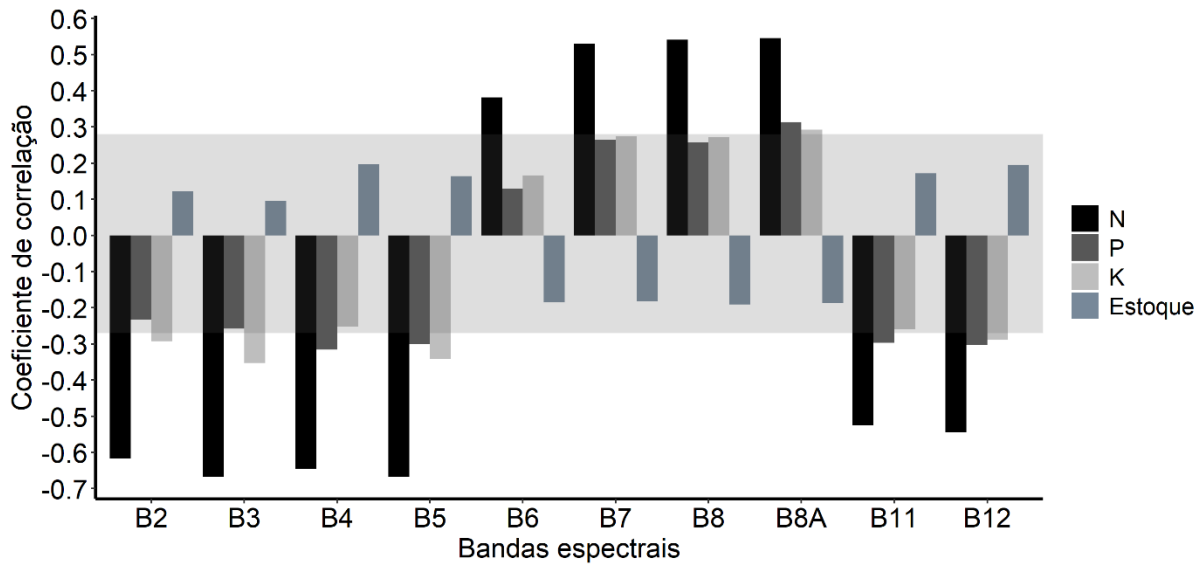


Figura 15. Análise de correlação de Spearman entre a reflectância das bandas espectrais e índices derivados e variáveis da serapilheira. Retângulo na horizontal na cor cinza indica a região de não significância das correlações ($p > 0,05$).

3.2 Performance da modelagem

Na Tabela 10 são apresentados os resultados de validação da modelagem dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio e estoque da serapilheira utilizando dados do Sentinel-2 (bandas e índices). Observou-se que a reflectância da vegetação captada pelo Sentinel-2 teve melhor desempenho na modelagem de nitrogênio, em todos os meses, quando comparado aos demais nutrientes e ao estoque da serapilheira.

Considerando as bandas espectrais na modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira, os menores erros (RMSE: 1,533; MAE: 1,223) e maior coeficiente de determinação (R^2 : 0,608) ocorreram com os dados do mês de maio (Tabela 10). Já para fósforo, potássio e o estoque da serapilheira, a ocorrência de coeficientes de determinação negativos indica que a modelagem não teve bom desempenho, principalmente para o estoque de serapilheira, já que foi negativo em todos os meses. Apesar disso, nos meses de junho e julho houve os maiores coeficientes de determinação, porém não expressivos, para fósforo (0,218) e potássio (0,177), respectivamente (Tabela 10).

Quando os índices foram usados, o melhor desempenho também foi para modelagem de nitrogênio, com os menores erros (RMSE: 1,583; MAE: 1,333) e maior coeficiente de determinação (R^2 : 0,616) para o mês de junho. Para as demais variáveis o desempenho da modelagem não foi satisfatório, com maiores coeficientes de determinação para fósforo no mês de agosto (R^2 : 0,008) e para potássio em setembro (R^2 : 0,108). A variável estoque, utilizando os índices, também apresentou coeficientes de determinação negativos.

Comparando os parâmetros de validação utilizando as bandas espectrais e índices na modelagem, nota-se que, quando encontrada diferença significativa, de forma geral, os erros foram menores e o coeficiente de determinação maior quando utilizado as bandas espectrais. Observou-se também redução da predição do nitrogênio entre maio (R^2 : 0,608-bandas e 0,511-índices) e agosto (R^2 : 0,454 e 0,403), aumentando a partir de setembro (R^2 : 0,535 e 0,442).

Tabela 10. Resultados de validação da modelagem de N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio) e do estoque da serapilheira em áreas de Savana Florestada (SF) e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana (FESV).

N							
Mês	RMSE (b)	RMSE (i)	MAE (b)	MAE (i)	R2 (b)	R2 (i)	
M	1,533 b	1,633 bc	1,223 c	1,303 b	0,608 a	0,511 ab	
Jn	1,550 b	1,583 c	1,264 bc	1,333 b	0,580 a	0,616 a	
Jl	1,720 ab	1,826 ab	1,428 ab	1,466 ab	0,508 ab	0,476 b	
A	1,873 a	1,878 a	1,543 a	1,536 a	0,454 b	0,403 b	
S	1,641 b	1,846 ab*	1,308 bc	1,491 ab*	0,535 ab	0,442 b*	
O	1,581 b	1,708 abc	1,256 bc	1,405 ab*	0,572 a	0,530 ab*	
P							
M	0,171 a	0,195 a*	0,147 b	0,163 a*	0,137 ab	-0,165 a*	
Jn	0,165 a	0,185 a*	0,142 b	0,154 a	0,218 a	0,004 a*	
Jl	0,175 a	0,183 a	0,168 a	0,156 a*	-0,012 b	-0,032 a	
A	0,174 a	0,187 a*	0,150 b	0,161 a*	0,129 ab	0,008 a	
S	0,177 a	0,195 a*	0,144 b	0,172 a*	0,149 ab	-0,120 a*	
O	0,176 a	0,195 a*	0,148 b	0,166 a*	0,066 ab	-0,077 a*	
K							
M	0,856 a	0,863 a	0,594 a	0,624 a	-0,049 b	0,000 ab	
Jn	0,829 a	0,880 a	0,569 a	0,608 a	-0,012 b	-0,071 b	
Jl	0,800 a	0,855 a	0,535 a	0,586 a	0,177 a	0,040 ab*	
A	0,756 a	0,813 a	0,513 a	0,588 a*	0,091 ab	0,096 ab	
S	0,819 a	0,848 a	0,586 a	0,593 a	-0,006 ab	0,108 a*	
O	0,764 a	0,807 a	0,535 a	0,560 a	0,057 ab	0,021 ab	
Estoque							
M	2,319 a	2,587 a*	1,898 a	2,156 a*	-0,320 a	-0,266 a	
Jn	2,347 a	2,378 a	1,878 a	1,983 ab	-0,137 ab	-0,361 a*	
Jl	2,315 a	2,418 a	1,840 a	1,998 ab	-0,105 ab	-0,320 a*	
A	2,289 a	2,533 a*	1,767 a	2,028 ab*	-0,118 ab	-0,329 a*	
S	2,175 a	2,443 a*	1,742 a	1,927 b*	-0,004 b	-0,256 a*	
O	2,367 a	2,420 a	1,928 a	1,880 b	-0,234 a	-0,146 a	

RMSE: raiz do erro quadrático médio; MAE: erro absoluto médio; R^2 : coeficiente de determinação. M: maio; Jn: Junho; Jl: julho, A: Agosto; S: Setembro; O: Outubro. Letras na vertical representam teste de média de cada parâmetro de validação entre os meses para cada variável. O (*) representa diferença significativa entre os parâmetros de validação para os dados com as bandas espectrais (b) e índices (i).

Dado o melhor desempenho de estimativa para o nitrogênio, a figura 16 exibe a dispersão do teor desse elemento medido e previsto com dados das bandas espectrais e índices nos meses de melhor modelagem, ou seja, maio e junho, respectivamente. Como pode ser visto, a tendência de superestimar valores baixos e subestimar valores altos é expressa em graus variados para todas as variáveis (bandas espectrais e índices). Tanto para a modelagem com dados das bandas espectrais quanto com índices, observou-se que os erros foram mais relacionados à subestimativa do teor de nitrogênio.

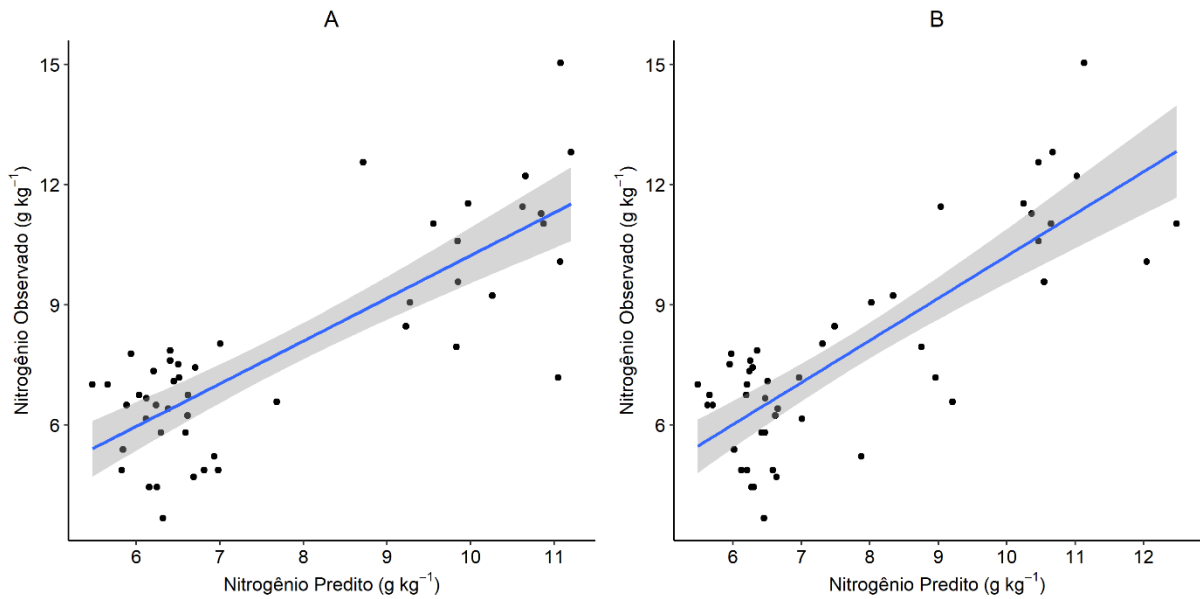


Figura 16. Valores observados versus preditos para os teores de nitrogênio utilizando os dados de entrada dos meses de melhor previsão, sendo maio o mês de melhor previsão para N utilizando as bandas espectrais (A) e junho quando utilizado os índices (B).

A identificação dos preditores ideais para nitrogênio foi derivada da importância das bandas espectrais e índices na modelagem (Figura 17). Nos meses com melhor previsão, observou-se que as bandas espectrais B4, B2, B3 e B5 e os índices S2REP e NDVI apresentaram-se como os preditores de maior importância (> 50%) para nitrogênio. Os nutrientes fósforo e potássio apresentaram baixos coeficientes de determinação, portando não sendo possível identificar os preditores ideais.

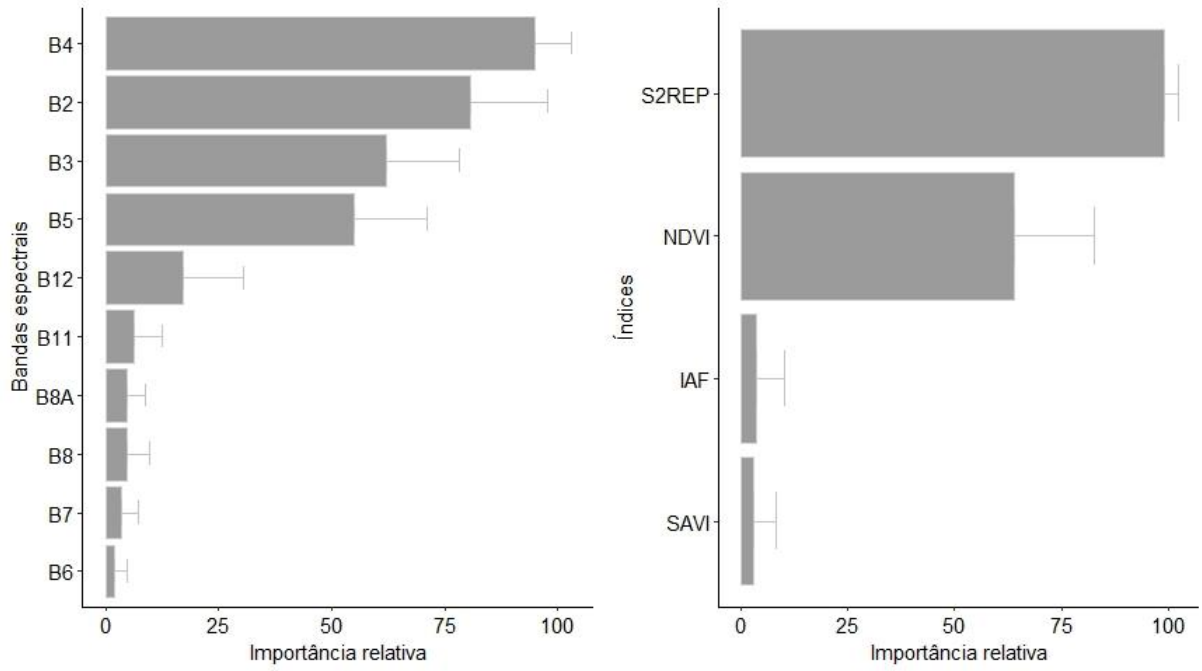


Figura 17. Importância relativa das bandas espectrais, no mês de maio, e índices, no mês de junho, na modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira.

4 DISCUSSÃO

As folhas que compõem a copa das árvores representam o compartimento da vegetação que mais interage com a energia radiante. Em condições adequadas de nutrientes e água, a vegetação manifesta pouca reflectância na região visível do espectro devido, principalmente, devido à absorção da energia pela clorofila para realização da fotossíntese (ZURITA et al., 2020). Quando ocorre redução da quantidade de água, algumas proteínas e pigmentos fotossintetizantes podem ser degradados, tornando as folhas menos aptas a absorver radiação e resultando em aumento da reflectância (PONZONI et al., 2012), como observado entre os meses de maio e outubro, que compreende o período entre o início e o término da seca na região.

Também foi observado respostas espectrais semelhantes, mas com magnitudes diferentes, ao longo das bandas espectrais entre as fitofisionomias estudadas, com menor reflectância no visível e maior no infravermelho próximo na FESV, que apresenta maior densidade do dossel, e o contrário acontecendo na SF, ou seja, maior reflectância no visível e menor no infravermelho próximo. A estrutura do dossel influencia na reflectância da vegetação, de modo que, em geral, na região do visível a reflectância diminui com o aumento de camadas de folhas, já que compreende maior concentração de pigmentos fotossintetizantes por unidade de área para absorção da energia, e na região do infravermelho próximo a reflectância aumenta pelo espalhamento múltiplo da radiação nas diferentes camadas do dossel (PONZONI et al., 2012).

Uma vez que se encontram na mesma unidade fisiográfica, sob condições equivalentes de clima, as características da serapilheira, estoque e nutrientes, que foram observadas na Savana Florestada e Floresta Estacional Sempre Verde Submontana podem ser reflexos de aspectos da vegetação que diferenciam essas fitofisionomias, como estrutura da vegetação e composição de espécies. A Savana Florestada é composta por árvores semidecíduas, em geral com folhas grandes e coriáceas, enquanto a Floresta Estacional Sempre Verde por árvores com baixa ou nenhuma decíduidade durante o período de estiagem (IBGE, 2012; BORGES et al., 2017). Essa característica de decíduidade das árvores seria um dos aspectos a influenciar na quantidade de material depositado ao solo, ou seja, no estoque da serapilheira dessas duas fitofisionomias, contribuindo com a maior quantidade de serapilheira na Savana Florestada.

Outro aspecto a influenciar o resultado encontrado, além também do solo, é o tempo para decomposição da serapilheira. Sales et al. (2021) relataram que para decomposição de aproximadamente 50% da serapilheira são necessários cerca de 240 dias em área de floresta e cerca de 300 dias em vegetação semelhante à savana florestada, indicando maior velocidade de decomposição em área de floresta, fazendo com que esta fitofisionomia apresente um menor estoque de serapilheira. Isso pode ser relacionado ao microclima gerado pela maior cobertura do dossel e umidade do solo em áreas de floresta, uma vez que, em região com sazonalidade, o aumento da umidade favorece o processo de decomposição da serapilheira (CARNEIRO et al., 2019; BELLO et al., 2021).

O teor de nutriente da serapilheira apresentou uma ordem de magnitude na qual nitrogênio foi o elemento com maior concentração, logo seguido do potássio e ao final o fósforo com menor quantidade. Essa sequência também já foi identificada em outros estudos, incluindo fitofisionomias como a abordada nessa pesquisa (FREIRE et al., 2020; REBELO et al., 2022; ARAÚJO et al., 2023). Esses elementos são essenciais para as plantas, sendo componentes intrínsecos da sua estrutura ou metabolismo. O nitrogênio faz parte de compostos de carbono, o fósforo é componente importante na armazenagem de energia e o potássio permanece na forma iônica, sendo requerido como cofatores de muitas enzimas e relacionado ao turgor da célula (TAIZ et al., 2017)

Apesar da quantidade de nutrientes disponíveis na serapilheira ser dependente de diversos fatores, como o grau de decomposição, além das características relativas à vegetação

que a originou, por meio do sensoriamento remoto foi possível identificar relações entre os nutrientes e a reflectância da vegetação, principalmente para nitrogênio. Fósforo e potássio não demonstraram relações expressivas com os dados de sensoriamento, o que refletiu em desempenho não significativo da modelagem por meio da *Random Forest*. Um dos motivos para essa relação, por exemplo, pode estar associado ao declínio significativo nas concentrações de fósforo e potássio nas folhas em períodos antes da senescência e abscisão foliar ao serem mobilizados para folhas em desenvolvimento e órgãos reprodutivos (MENEZES et al., 2021; REBELO et al., 2022). Essa estratégia de reter fósforo e potássio disponíveis na planta pode ter afetado na definição da relação entre a concentração que restou no material da serapilheira e a reflectância das folhas do dossel, ou ainda esses nutrientes podem estar associados a compostos que não expressam influência na reflectância da vegetação ao longo do espectro.

A relação do nitrogênio com a reflectância ao longo do espectro indicou que o maior teor desse nutriente está associado à menor reflectância na região do visível, borda vermelha da B5 e infravermelho de ondas curtas (correlação negativa). Na região compreendida entre borda vermelha da B6 e borda vermelha da B8A, incluindo o infravermelho próximo, o maior teor de nitrogênio associou-se à maior reflectância (correlação positiva). Cada componente e compartimento das folhas interage com determinada região do espectro eletromagnético, como por exemplo as estruturas e componentes relacionados à fotossíntese que se associam à região do visível e borda vermelha. O nitrogênio é um componente importante para várias enzimas, proteínas e pigmentos fundamentais para fixação do CO₂ durante o processo fotossintético (MENEZES et al., 2021; PLACIDO, 2023). Esse processo é fundamentado na absorção da radiação da região visível do espectro por pigmentos fotossintetizantes, como as clorofilas e os carotenoides (STREIT et al., 2005; PONZONI et al., 2012). As clorofilas absorvem energia incidente mais eficientemente nas regiões do azul (400-500 nm) e vermelho (600-700 nm), enquanto os carotenoides absorvem energia predominantemente na região do azul (OLIVEIRA et al., 2017b). Na região do infravermelho próximo ocorre pouca absorção da radiação e considerável espalhamento interno da radiação por interação com a estrutura do mesófilo, de modo que quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno e, assim, maior será a reflectância (PONZONI et al., 2012; ZURITA et al., 2020). Já na região do infravermelho de ondas curtas a reflectância é influenciada pela absorção da água, que absorve consideravelmente a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1300 e 2000 nm (JENSEN, 2011; PONZONI et al., 2012).

Assim sendo, o nitrogênio presente na serapilheira relaciona-se principalmente aos pigmentos que absorvem radiação na região do visível e borda vermelha, pois as bandas 4, 2, 3 e 5, foram indicadas, nessa ordem, como as variáveis com maior importância preditiva. A região do espectro abrangida por essas bandas também já foi relacionada como importante na predição do nitrogênio foliar (CHEMURA et al., 2018; ELY et al., 2019; BARROS et al., 2022). Os índices S2REP e NDVI são derivados de bandas dessa região, por isso também apresentaram importância preditiva para teor de nitrogênio. Eles representam os efeitos combinados da elevada absorção de energia pelo conteúdo de clorofila nas bandas vermelha e de bordas vermelhas e da dispersão interna das folhas na região do infravermelho próximo (ALI et al., 2022). A significativa modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira com preditores obtidos com base em imagens do satélite Sentinel-2 refletiu indiretamente a correlação já relatada entre características espectrais, estrutura e composição química de folhas das espécies que compõem o dossel da vegetação, como o conteúdo de nitrogênio e clorofila (OMER et al., 2017; CHEMURA et al., 2018; BARROS et al., 2022; LI et al., 2021).

Ao longo dos meses analisados observou-se redução da predição do nitrogênio, com menor determinação em agosto, quarto mês da estação seca na região. A restrição hídrica pode acarretar, por exemplo, amadurecimento e senescência de folhas, com redução na quantidade de clorofila, além de abscisão para evitar a transpiração (JENSEN, 2011; TAIZ et al., 2017;

ALBERT et al., 2018; SALES et al., 2020), o que influencia a resposta espectral da planta, resultando em maior reflectância. Os meses de maio e junho foram considerados os ideais, ao longo do período de seca, para aquisição de imagens pois apresentaram menor reflectância que os demais meses, indicando que nesses meses pode haver maior conteúdo de pigmentos e, indiretamente, maior conteúdo de nitrogênio foliar. O conhecimento da época ideal para aquisição de imagens para essa finalidade pode reduzir os esforços de processamento de imagens, bem como os custos para aquisição, caso sejam utilizados sensores comerciais (FORQUOR et al., 2020).

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que o uso de dados derivados de satélite tem potencial para modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira estocada sem a necessidade de incorporar dados relativos às espécies que compõem a vegetação, permitindo abordar áreas com alta diversidade de espécies, como o caso das fitofisionomias na transição Cerrado-Amazônia. Essa potencialidade não foi observada para modelagem do teor de fósforo e potássio e do estoque da serapilheira utilizando a abordagem da *Random Forest*.

Os meses entre maio e outubro, que compreendem o período da estação seca, foram promissores para aquisição de imagens e utilização na modelagem do teor de nitrogênio da serapilheira, entretanto os meses iniciais desse período mostraram-se melhores.

O teor de nitrogênio da serapilheira apresentou maior relação com a região do visível e borda vermelha do espectro eletromagnético, que correspondem às bandas 2 a 5 do satélite Sentinel-2.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J. et al. Pantropical modelling of canopy functional traits using Sentinel-2 remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**. v. 252, 112122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112122>
- ALBERT, L. P. et al. Age-dependent leaf physiology and consequences for crown-scale carbon uptake during the dry season in an Amazon evergreen forest. **New Phytologist**. v. 2019, 2018. doi: 10.1111/nph.15056
- ALI, A. et al. Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. v. 26, 100719, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100719>
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W.; WATERS, R. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land** - Advanced Training and User's Manual. v.01, 98 p., 2002.
- ALMEIDA, C. T. et al. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. **Remote Sensing of Environment**. v. 232, 111323, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111323>
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAUJO, I. et al. Morpho-anatomical traits and leaf nutrient concentrations vary between plant communities in the Cerrado–Amazonia transition? **Flor.**, v. 306, 152366, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152366>
- ARAUJO, N. N. A. et al. Estoque de nutrientes e retenção hídrica da liteira em três ecossistemas florestais da Amazônia oriental brasileira. **Research, Society and Development**. v. 10, n. 1, e52510112083, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12083>
- BAMBI, P. et al. Decomposição e redistribuição de nutrientes das folhas de espécies da floresta de transição Amazônia - Cerrado, MT. **Ciência e Natura**. v. 33, n. 1, 2011.
- BARROS, P. P. S. et al. Estimation of leaf nitrogen levels in sugarcane using hyperspectral models. **Ciência Rural**. v. 52, e20200630, 2022. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200630>
- BELLO, O. C. et al. Produção e decomposição de serapilheira em áreas de reflorestamento e floresta nativa no sul do Amazonas. **Ciência Florestal**. v. 32, n. 4, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509843526>
- BORGES, H. B. N. et al. **Flora Arbórea de Mato Grosso: tipologias vegetais e suas espécies**. Editora Entrelinhas, ISSN 0103-9598, 259 p., 2017.
- BREIMAN, L. **Random forests**, **Machine Learning**. v. 45, n. 1, p. 5–32, 2001.

CARNEIRO, K. M. S. et al. Estoque e perda de necromassa da vegetação lenhosa em um gradiente fitofisionômico na transição Amazônia-Cerrado. **Rodriguésia**. v. 70, e02892017, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-7860201970060>

CHEMURA, A. et al. Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004>

ELIAS, F. et al. Soil and topographic variation as a key factor driving the distribution of tree flora in the Amazonia/Cerrado transition. **Acta Oecologica**. v. 100, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103467>

ELY, K. S. et al. Spectroscopy can predict key leaf traits associated with source–sink balance and carbon–nitrogen status. **Journal of Experimental Botany**. v 70, n. 6, 2019. doi:10.1093/jxb/erz061

FORKUOR, G. et al. Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets - A case study. **Remote Sensing of Environment**. v. 236, 2020.

FRAMPTON, W. J. et al. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 82, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>

FREIRE, G. A. P. et al. Dinâmica de serapilheira em uma área de floresta de terra firme, Amazônia Ocidental. **Nativa**. v. 8, n. 3, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i3.9155>

GARA, T. W. et al. Accurate modelling of canopy traits from seasonal Sentinel-2 imagery based on the vertical distribution of leaf traits. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 157, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.005>

GAVRILYUK, E. A. et al. Geospatial Modeling of Nitrogen and Carbon Content and Stock in the Forest Litter Horizons Based on Sentinel-2 Multi-Seasonal Satellite Imagery. Genesis and geography of soils, **Eurasian Soil Science**. v. 54, n. 2, pp. 176–188, 2021.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**. v. 25, p. 295-309, 1988.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências - Mapa Temático e Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil**, 2021. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> e <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/24252-macrocaracterizacao-dos-recursos-naturais-do-brasil.html?=&t=downloads>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. ISSN 0103-9598, 271 p., 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Parênteses, 2ª ed. Traduzida, ISBN 978-85-60507-06-1, 663 p., 2011.

KUHN, M. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, v. 28, n. 5, 1–26, 2008. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>

LI, Y. et al. Fine-scale leaf chlorophyll distribution across a deciduous forest through two-step model inversion from Sentinel-2 data. **Remote Sensing of Environment**. v. 264, 112618, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112618>

MACHADO, D. L. et al. Site and plant community parameters drive the effect of vegetation on litter and nutrient inputs in restored tropical forests. **Plant Soil**. v. 464, p. 405–421, 2021.

MARIMON, B. S. et al. Disequilibrium and hyperdynamic tree turnover at the forest-cerrado transition zone in southern Amazonia. **Plant Ecology & Diversity**. v. 7, p. 281-292, 2014.

MENEZES, J. et al. Changes in leaf functional traits with leaf age: when do leaves decrease their photosynthetic capacity in Amazonian trees? **Tree Physiology**. v. 42, 2021. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab042>

OLIVEIRA, B. et al. Unraveling the ecosystem functions in the Amazonia– Cerrado transition: evidence of hyperdynamic nutrient cycling. **Plant Ecology**. v. 218, p. 225–239, 2017a.

OLIVEIRA, L. F. R. et al. Estimating foliar nitrogen in Eucalyptus using vegetation indexes. **Scientia Agricola**. v.74, n.2, 2017b. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0477>

OMER, G. et al. Mapping leaf nitrogen and carbon concentrations of intact and fragmented indigenous forest ecosystems using empirical modeling techniques and WorldView-2 data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 131, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.005>

PLACIDO, A. D. L. **Padrões espectrais de reflectância foliar e sua relação com o status hídrico em uma floresta de terra firme na Amazônia Central**. Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 68 p., 2023.

PONZONI, J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de textos, 2ª ed., eISBN 978-85-7975-211-7, 98 p., 2012.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. URL <https://www.R-project.org/>.

RAHMAN, M. M. et al. Remote sensing-based mapping of senescent leaf c:n ratio in the sundarbans reserved forest using machine learning techniques. **Remote Sensing**. v. 12, 1375, 2020. doi:10.3390/rs12091375

REBELO, A. G. M. et al. Estoque de nutrientes e decomposição da serapilheira em sistemas agroflorestais no município de Belterra – Pará. **Ciência Florestal**. v. 32, n. 4, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509846854>

ROCHA FILHO, J. A. et al. Composição da vegetação arbórea de diferentes tipologias florestais na região Centro-Norte do Mato Grosso. **Scientific Electronic Archives**. XI Encontro de Botânicos do Centro-Oeste, p. 385-387, 2017.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, v.01, p. 48-62, 1974.

SALES, M. C. G. et al. Decomposition of leaf litter in the brazilian cerrado, cerradão and forest environments in the amazon, Brazil. **Floresta**. v. 51, n. 4, 2021. DOI: 10.5380/rf.v51i3.69592

SALES, M. C. G. et al. Litter input in cerrado, cerradão and forest environments in Amazon, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.15, n.2, e7383, 2020. DOI:10.5039/agraria.v15i2a7383

SCALON, M. C. et al. Contrasting strategies of nutrient demand and use between savanna and forest ecosystems in a neotropical transition zone. **Biogeosciences**. v. 19, 2022. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3649-2022>

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**. v. 01, n. 01, p. 34-43, 2013.

STREIT, N. M. et al. The Chlorophylls. **Ciência Rural**. v.35, n.3, 2005.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed, 6ª ed., ISBN 978-85-8271-367-9, 888 p., 2017.

TEDESCO, M. J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. **Boletim técnico**. n. 5, 2 ed., Porto Alegre: UFRS, 174 p. 1995

VALADÃO, M. B. X. et al. Savannas can Functionally Turn into Forests in the Amazonia/Cerrado Transition. **Biodiversidade Brasileira**. v. 11, n.3, 2021. DOI: 10.37002/biobrasil.v11i3.1764

WINBOURNE, J.B. et al. Nitrogen cycling during secondary succession in Atlantic Forest of Bahia, Brazil. **Scientific Reports**. v. 8, 2018.

WINK, C. et al. Influência de fatores climáticos e espaciais na produção de serapilheira do eucalipto em sistemas integrados. **Advances Forestry Science**. v. 9, n. 2, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v9i2.99844>

ZORTEA, M. **Determinantes ambientais de vegetação savânica e florestal em enclaves de cerrado na Amazônia mato-grossense**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos), Universidade do Estado de Mato Grosso, 122 p., 2018.

ZURITA, N. R. et al. Modeling potential C, N, H content in aboveground biomass with spectral data from Sentinel-2A. **Preprints**. 2020. doi:10.20944/preprints202003.0187.v1

2 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados observados neste estudo confirmam a complexidade ambiental da região de contato entre biomas, demonstrando que as diferenças na estrutura da vegetação das fitofisionomias estudadas e em alguns atributos do solo têm influência na abundância das comunidades biológicas dos fungos micorrízicos arbusculares e macrofauna, mas não influenciam significativamente a composição dessas comunidades. A fitofisionomia Savana Florestada apresentou características que favoreceram a maior esporulação dos fungos micorrízicos e também a maior quantidade de indivíduos da macrofauna edáfica quando comparada à Floresta Estacional Sempre Verde Submontana.

Quando foi considerada a possibilidade da utilização de sensores de satélites de acesso aberto para estimativa de variáveis da serapilheira, concluiu-se que dados dessa natureza podem ter potencial de uso a depender da variável considerada. O teor de nitrogênio da serapilheira, por exemplo, foi a variável que respondeu às propriedades espectrais da vegetação pois constitui importantes estruturas das folhas do dossel. Portanto, o sensoriamento remoto é uma ferramenta potencial para auxiliar em estudos sobre a serapilheira em áreas extensas, mesmo com variabilidade de ambientes e de coberturas vegetais como na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado.