Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
Departamento de Biodiversidade, Evolução e Meio Ambiente
Laboratório de Ecofisiologia Vegetal

Yasmin Alvim Cardoso

Assinatura espectral de três espécies vegetais em campo rupestre ferruginoso

OURO PRETO
2023

Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
Departamento de Biodiversidade, Evolução e Meio Ambiente
Laboratório de Ecofisiologia Vegetal

Assinatura espectral de três espécies vegetais em campo rupestre ferruginoso

Monografia apresentada ao Departamento de Biodiversidade, Evolução e Meio Ambiente do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Aluno: Yasmin Alvim Cardoso
Orientador: Alessandra Rodrigues Kozovits
Co-orientador: Maria Augusta Gonçalves Fujaco

OURO PRETO
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268a Cardoso, Yasmin Alvim.
Assinatura espectral de três espécies vegetais em campo rupestre ferruginoso. [manuscrito] / Yasmin Alvim Cardoso. - 2023.
27 f.: il.: color., gráf., tab.. + quadro.

Orientadora: Profa. Dra. Alessandra Kozovits.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Graduação em Ciências Biológicas .

1. Ecossistema. 2. Biodiversidade. 3. Sensoriamento remoto. I. Kozovits, Alessandra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 574.1

Bibliotecário(a) Responsável: Luciana De Oliveira - SIAPE: 1.937.800

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E BIOLOGICAS
DEPARTAMENTO DE BIODIVERSIDADE, EVOLUCAO E MEIO AMBIENTE

FOLHA DE APROVAÇÃO

Yasmin Alvim Cardoso

Assinatura espectral de três espécies vegetais em campo rupestre ferruginoso

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas

Aprovada em 28 de setembro de 2023

Membros da banca

Dra. Alessandra Rodrigues Kozovits – Presidente da banca - Universidade Federal de Ouro Preto

Dra. Daniela Boanares – Instituto Tecnológico Vale

Dr. Diniz Carvalho de Arruda - Instituto Tecnológico Vale

Alessandra Rodrigues Kozovits, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/09/2023

Documento assinado eletronicamente por **Alessandra Rodrigues Kozovits**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/09/2023, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0584238** e o código CRC **BEF955A6**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591747 - www.ufop.br

Dedico este trabalho às minhas avós Sophia e Leontina,
as mulheres mais incríveis que tive a honra de conviver
e que vão me inspirar para sempre.

"Lembre-se de que onde quer que o seu coração esteja, encontrará o seu tesouro."

O Alquimista (Paulo Coelho)

Resumo

Os campos rupestres ferruginosos são áreas de alto valor biológico devido a sua grande biodiversidade e endemismo. Apesar disso, crescentes ameaças se dão sobre esse ecossistema, ao passo que estudos sobre ele ainda são relativamente escassos. Através deste trabalho buscamos iniciar a caracterização espectral da fitofisionomia das áreas de campo rupestre ferruginoso para embasar estratégias futuras de conservação. A pesquisa teve o intuito de investigar se há um padrão de resposta espectral e/ou índices espectrais que identifique e defina a vegetação desse ecossistema, e assim, contribua para a construção de uma biblioteca espectral da vegetação. Para isso, comparamos e investigamos as diferenças entre as assinaturas espectrais de três espécies vegetais dominantes no campo rupestre ferruginoso: *Eremanthus erythropappus, Pleroma heteromallum* e *Senna reniformis*. Com o aparelho FieldSpec 4 ASD realizamos dois tipos de medições (central e lateral) nas folhas, em campo e, posteriormente, em laboratório. As medições foram feitas em uma folha por indivíduo, sendo três indivíduos por espécie. As comparações foram realizadas entre as espécies, e na mesma espécie em campo e laboratório, e com as medidas centrais e laterais. Os resultados obtidos foram relacionados às características anatômicas e morfológicas de cada espécie para auxiliar no entendimento de como refletem as condições ambientais e lidam com elas. As espécies apresentaram variações em alguns pontos do perfil espectral, sobretudo na região do infravermelho próximo, e nos índices vegetacionais (NDVI e MSI), porém, no geral essas variações não foram significativas. Este fato corrobora para a construção da biblioteca espectral da vegetação de campo rupestre ferruginoso, porém mais estudos ainda são necessários.

Palavras-chave: campo rupestre ferruginoso; biblioteca espectral; sensoriamento remoto; *Eremanthus erythropappus; Pleroma heteromallum; Senna reniformis.*

Abstract

Spectral signature of three plant species in ferruginous rupestrian fields

The ferruginous rupestrian fields are areas of high biological value due to their great biodiversity and endemism. Despite this, growing threats hang over this ecosystem, while studies on it are still relatively scarce. Through this work, we seek to initiate the spectral characterization of the phyto physiognomy of the areas of ferruginous rupestrian fields to support future conservation strategies. The research aimed to investigate whether there is a pattern in the curve and in the spectral indices that identifies and defines the vegetation of this ecosystem, and thus contributes to the construction of a spectral library of this vegetation. For this, we compared and investigated the differences between the spectral signatures of three dominant plant species in the ferruginous rupestrian field: *Eremanthus erythropappus, Pleroma heteromallum* and *Senna reniformis*. With the FieldSpec 4 ASD device, we carried out two types of measurements (central and lateral) on the leaves, in the field and, later, in the laboratory. Measurements were made on one leaf per individual, three individuals per species. Comparisons were performed between species, and within the same species in the field and laboratory, and with central and lateral measurements. The results obtained were related to the anatomical and morphological characteristics of each species to help understand how they reflect environmental conditions and how to deal with them The species showed variations in some points of the spectral profile, especially in the near infrared region, and in the vegetation indices (NDVI and MSI), however, in general these variations were not significant. This fact subsidizes the construction of the spectral library of the ferruginous rupestrian fields, but further studies are still necessary.

Keywords: ferruginous rupestrian fields; spectral library; remote sensing; *Eremanthus erythropappus; Pleroma heteromallum; Senna reniformis.*

Sumário

Introdução **5**
Materiais e métodos **8**
Área de estudo e espécies vegetais 8
Coleta e tratamento de dados para a biblioteca espectral 10
Análises estatísticas 12
Resultados **13**
Comparação entre as espécies 13
Comparação das medidas centrais e laterais no campo 13
Comparação entre as medidas centrais no campo e no laboratório 14
Discussão **16**
Conclusão **19**
Agradecimentos **20**
Referências **20**

Introdução

O Brasil está entre os maiores produtores e exportadores de minério de ferro do mundo (USGS, 2017), sendo o estado de Minas Gerais o segundo maior exportador do país (ANM, 2022). A projeção para os próximos anos é de expansão mais rápida consonante ao capital investido nas mineradoras para aprimorar a produção a médio e longo prazo (MME, 2022). Em Minas Gerais, as jazidas estão concentradas no Quadrilátero Ferrífero, coincidindo com a ocorrência de campos rupestres ferruginosos, considerados ecossistemas de grande riqueza biológica e endemismo (Silveira *et al.* 2016). É indubitável que proporcionalmente à tal expansão minerária, ocorrerá a degradação destes ecossistemas, em virtude da supressão da vegetação e do solo, seguida da perda completa da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, essenciais ao bem-estar humano e à sobrevivência de outras espécies circunspectas ao local (IBRAM, 2007, Fernandes *et al*. 2020).

Reconhecendo a ameaça crescente sobre essas áreas e sua grande relevância biológica (Silveira *et al.* 2016), estudos acerca de sua evolução (Pontara, Bueno, Rezende *et al.* 2018) e ecologia funcional, biogeografia vegetal (Neto *et al.* 2007) e interações interespecíficas (Queiroz *et al.* 2019) têm aumentado especialmente na última década, entretanto o funcionamento desse ecossistema mega diverso e peculiar está ainda a ser elucidado. É crucial e urgente que se avancem os estudos nestas áreas, a fim de caracterizá-las em múltiplas feições e escalas para aquilatá-las e, portanto, promover medidas efetivas de conservação ou restauração neste ecossistema.

Até o momento, a maioria dos estudos realizados em campos rupestres restringe-se ao levantamento de flora ou à fitossociologia (Messias *et al.* 2012, Rech *et al.* 2017, Colli-Silva, Vasconcelos e Pirani, 2019), utilizando-se de métodos propostos ainda no século XIX. O reconhecimento da vegetação de uma determinada área é feito *in situ* a partir da identificação das espécies vegetais por profissionais qualificados. A vegetação é amplamente descrita embasada pelas características morfológicas e estruturais da comunidade, considerando-se sobretudo as espécies dominantes. As etapas da caracterização fitofisionômica feitas dessa forma dispendem de muito tempo e recursos, o que limita, muitas vezes, a escala das áreas estudadas (Braz *et al.* 2013). Apesar disso, esse método permanece como essencial e o mais preciso para a identificação das espécies e estudos de sucessão ecológica e biogeografia. Porém, em se tratando da ecofisiologia e do conhecimento dos processos ecossistêmicos, como as trocas gasosas, outras ferramentas são necessárias, uma vez que as medições *in loco* ao nível do indivíduo, não retratam toda a comunidade. Dentre as opções, métodos baseados no sensoriamento remoto têm se revelado valiosos para a determinação das funcionalidades

das espécies e dos ecossistemas, compondo as informações de forma mais rápida e integrada (Cavender-Bares *et al.* 2020).

O avanço da tecnologia vem contribuindo para tal, permitindo-nos conhecer, por meio de tecnologias hiperespectrais e métodos de sensoriamento remoto, o espectro de reflectância das folhas. A partir disso é possível estimar índices vegetacionais como o de estresse hídrico (MSI), índice de profundidade relativa da copa (RDI), índice infravermelho de diferença normalizada (NDVI), entre outros que ainda estão sendo desenvolvidos e testados a fim de descobrir e caracterizar mais informações contidas na fisiologia foliar. A caracterização da assinatura espectral da vegetação é produzida por meio do espectrorradiômetro, ferramenta capaz de fornecer dados foliares gerados pela reflectância da luz (Novo, 2010).

A curva espectral corresponde a um padrão de resposta do alvo vegetal. Ainda assim, sua reflectância varia dentro do espectro de acordo com a espécie e com as condições em que se encontram, em virtude de suas adaptações fisiológicas e anatômicas (Novo, 2010). A combinação das informações espectrais e anatômicas atua de maneira sinérgica para o conhecimento do comportamento e das estratégias da planta. As assinaturas espectrais das espécies obtidas em diversas feições e condições sazonais de um mesmo ecossistema constituem a biblioteca espectral daquele tipo de vegetação. O conjunto de dados da biblioteca é utilizado como referência para calibrar e validar informações obtidas por sensoriamento remoto (Dudley *et al.* 2015). Ao comparar as assinaturas da vegetação adquiridas nas imagens de satélites com a biblioteca, torna-se viável a identificação, caracterização e o mapeamento da vegetação estudada, avaliando suas condições fenológicas, suas funções ecofisiológicas e monitorando possíveis mudanças ao longo do tempo (Xiao, Tao, Xiao *et al.* 2017).

Em termos práticos, essas informações têm sido usadas para a avaliação de culturas agrícolas (Houborg e McCabe, 2016) e desenvolvimento florestal (Ramos *et al*. 2023), e tem trazido crescentes contribuições para os estudos das respostas ecossistêmicas de florestas e outros tipos vegetacionais tropicais à variação climática e ações antrópicas, incluindo avaliação da degradação e restauração de áreas degradadas (Hott *et al*. 2019, Berveglieri *et al*. 2021, Gonçalves *et al.* 2021, Boulton, Lenton e Boers, 2022). Por outro lado, essa abordagem metodológica ainda é escassa em estudos em ambientes campestres. Com raras exceções, normalmente relacionadas a estimativas de perda de área de vegetação de "canga" em séries temporais, ou recuperação de áreas mineradas na Amazônia (Souza-Filho *et al.* 2019, Gastauer *et al.* 2022), bibliotecas espectrais dos campos rupestres nacionais, até onde sabemos, não estão disponíveis na literatura. A construção da biblioteca espectral dos campos

rupestres ferruginosos, assim como dos quartzíticos, poderá ajudar na demarcação mais precisa de suas áreas de ocorrência (Fernandes-Filho *et al.* 2022), e abrirá caminho para análises de suas funcionalidades ao nível do ecossistema. As previsões de alteração climática projetadas para as zonas de ocorrência de ambientes tropicais de altitude (IPCC 2013, Assis e de Mattos, 2016, Fernandes *et al.* 2020), em adição às pressões exercidas pela mineração sobre tais paisagens, tornam essa abordagem metodológica extremamente importante. No caso dos campos rupestres a construção da biblioteca espectral deverá abarcar espécies representativas dos estratos herbáceo e arbustivo. No presente estudo buscamos caracterizar, comparar e descrever as curvas de assinatura espectral de três espécies vegetais dos campos rupestres ferruginosos: *Pleroma heteromallum* (D.Don) D.Don, *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeishe e *Senna reniformis* (G.Don) HSIrwin e Barneby.

Estudos anteriores demonstraram que estas espécies diferem em suas características anatômicas foliares e em parâmetros ecofisiológicos, o que possivelmente pode gerar respostas espectrais diferenciadas (Boanares *et al.* 2018a, b, Boanares *et al.* 2021). Por outro lado, mesmo considerando-se a diversidade de estratégias funcionais presentes nos campos rupestres, as severas condições edafoclimáticas desse ecossistema devem limitar a amplitude de variação interespecífica das respostas espectrais, posicionando os valores das curvas de reflectância em faixa típica de ecossistemas de baixa produtividade (Fernandes, Nunes, Moura *et al.* 2015).

Através do estudo e da comparação do perfil da assinatura espectral e dos índices NDVI e MSI obtidos através da medição da reflectância de três espécies nativas e dominantes no campo rupestre ferruginoso, esperamos que estes primeiros dados espectrais relacionados à ecofisiologia do ecossistema no Quadrilátero Ferrífero, contribuam para estratégias futuras de conservação e restauração. Haja vista que os padrões de resposta da planta refletem diretamente as condições do ambiente ao qual está submetida, o que significa que a partir destes dados e conforme a escolha dos índices, é possível estimar a disponibilidade de nutrientes no solo e a oferta de recursos hídricos no ambiente, essencialmente responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento vegetal.

Materiais e métodos

Área de estudo e espécies vegetais

O estudo foi conduzido em uma área de campo rupestre ferruginoso localizada na serra da Brígida, a altitude de 1.492m, dentro da área de preservação ambiental (APA) Cachoeira das Andorinhas em Ouro Preto, MG (Figura 1). O clima predominante no local, segundo a classificação de Köppen, é Cwb (Alvares *et al*. 2013), caracterizado por verões brandos, invernos secos e elevada

amplitude térmica. O solo da área de estudo foi avaliado anteriormente como Neossolo litólico, rico em ferro (EMBRAPA 1999, Schettini *et al*. 2018).

Figura 1. Localização da área de estudo na serra da Brígida, Ouro Preto, MG. À direita, a linha amarela delimita o fragmento de campo rupestre ferruginoso, próximo à área minerada (sem cobertura vegetal à esquerda na mesma imagem). Imagens cedidas por A.R. Kozovits.

E. erythropappus é árvore endêmica do Brasil, com ocorrência frequente em solos rochosos do Sudeste e de Goiás (REFLORA, 2016); *P. heteromallum* é arbusto, também nativa, e além dos locais de ocorrência compartilhados com a anterior, está distribuída pelo Nordeste brasileiro (REFLORA, 2020); por fim, *S. reniformis,* é considerada arbórea ou arbustiva, endêmica, e com a distribuição restrita aos Estados: Sergipe, Bahia, Minas Gerais e São Paulo (REFLORA, 2019). As três espécies vegetais selecionadas (Figura 2) estão amplamente distribuídas pela área de estudo e já foram alvo de várias outras investigações ecofisiológicas, inclusive anatômicas, diferindo em diversas características que podem ser relevantes para a compreensão dos resultados aqui apresentados (Schettini *et al*. 2018, Boanares *et al.* 2018a, b, Boanares *et al*. 2021). Um resumo das principais características anatômicas e fisiológicas é apresentado no Quadro 1. Esses dados já foram publicados e foram gentilmente cedidos pela autora principal, Dra. Daniela Boanares, para compor as análises do presente estudo.

Figura 2. A, D) *Pleroma heteromallum*; B, E) *Eremanthus erythropappus*; C, F) *Senna reniformis.* Fontes: A: Mauricio Mercadante[1], B: Leonardo Correa[2], C: Ignez Motta[3], D, E e F (Daniela Paiola, tiradas no dia da coleta em campo).

Quadro 1. Características anatômicas e implicações fisiológicas relacionadas à absorção e armazenamento de água pelas folhas das três espécies estudadas (Boanares *et al.* 2018a, b).

	Anatomia	Fisiologia
P. heteromallum	Parede celular abundante em celulose	absorve água em baixa velocidade
	Parênquima esponjoso com 3-4 camadas	altas taxas de absorção de água
	Grande número de células vacuolizadas	auxilia na retenção de alto conteúdo de água
E. erythropappus	Parede celular abundante em celulose	absorve água em baixa velocidade
	Tricomas não lignificados	altas taxas de absorção de água
	Traqueídes grandes nas terminações vasculares	auxilia na retenção de alto conteúdo de água
S. reniformis	Terminações vasculares com muitas fibras e parede espessada	absorve água em alta velocidade
	Tricomas não lignificados	altas taxas de absorção de água
	Células mucilaginosas	absorção e armazenamento de água

Coleta e tratamento de dados

No campo, utilizamos meios auxiliares para minimizar desvios indevidos passíveis de ocorrer. O acessório *leaf clip* foi usado para garantir a integração da folha na superfície do sensor, e a pesquisadora vestiu roupa preta para evitar reflexo próximo à medição. A coleta de dados espectrais (espectrorradiômetro FieldSpec 4) das folhas das três espécies foi realizada no fim do verão (16/03/2023) entre 9 e 10h em campo, e entre 11 e 12:30h no laboratório. O espectrorradiômetro era calibrado sempre que necessário.

Em ambos os casos, as mensurações foram feitas em folhas maduras, bem verdes e sem danificação aparente, em três indivíduos por espécie e em triplicata por folha. Após as medidas em campo, com as folhas atachadas à planta mãe, estas foram destacadas, identificadas e devidamente ensacadas, mas sem nenhum artifício para evitar a perda de água. No laboratório, a coleta de dados foi realizada nas mesmas folhas.

Tanto em campo como no laboratório, realizamos dois tipos de medição por folha, os quais chamamos de “central”, que centralizava a leitura sobre a nervura central, e “lateral” no limbo foliar, que evitava a nervura central. A aquisição das medidas laterais, entretanto, foi mais trabalhosa nas folhas de *S. reniformis*, devido à sua pequena área. Por isso, no laboratório foram coletadas apenas suas medidas centrais.

A média da reflectância de cada folha medida em triplicata foi gerada por meio do software ViewSpec Pro 6.2, e o gráfico da curva com o programa ENVI 5.6.1.

O espectrorradiômetro mede a intensidade do comprimento de onda refletido pelo alvo. Para tanto, a energia eletromagnética da luz emitida pelo aparelho interage com a folha, produzindo a reflectância. Uma vez que ocorre a interação, a reflectância, formada por bandas espectrais, é transformada em um gráfico de linha que expressa os comprimentos de onda refletidos. Tal gráfico é chamado de “assinatura espectral” porque cada alvo (vegetação, solo, água, p.ex.) possui um comportamento padronizado, ainda que haja diferenciação dentro das categorias (Novo, 2010). No caso das plantas, espera-se haver alteração na curva de acordo com o tipo vegetacional, a disponibilidade de água e nutrientes, e a fase do ciclo vegetativo em que se encontra (Curran, 1989).

No gráfico gerado (cf. resultados), o eixo x representa o comprimento de onda em nanômetros e o eixo y, a porcentagem da radiação refletida. No eixo x há três regiões com os comprimentos de onda correspondentes à luz visível (0,4-0,7 nm), infravermelho próximo (0,7-1,3 nm) e infravermelho médio (1,3-2,5 nm). Na primeira, predomina a absorção da radiação incidente sobre os pigmentos fotossintetizantes da planta, carotenoides e clorofila. O pico de reflectância presente entre os vales desta região é referente à percepção da cor verde. No infravermelho próximo, a reflectância sofre influência da anatomia do mesofilo, podendo variar entre 30 e 40% no eixo y, aproximadamente. Na última região, o aspecto de absorção demonstrado por dois vales refere-se ao conteúdo de água foliar, isto é, quanto maior for a absorção, menor será a porcentagem refletida, significando elevado conteúdo de água (Dutra *et al.* 2011).

A figura 3 representa o comportamento espectral geral da vegetação (curva verde) e as três regiões de diferentes comprimentos de onda no espectro (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio) são indicadas na parte superior. As setas A, B, C, D e E (indicadas em roxo), representam o ponto na curva onde coletamos os valores do eixo y para testar estatisticamente se haveria diferença significativa entre as médias das medições centrais e laterais; em campo ou no laboratório; e entre as espécies. Os pontos B e C são referentes à maior e menor reflectância no topo de reflexão do infravermelho próximo.

Foram calculados os índices NDVI (Kriegler *et al.* 1969) e MSI (Hunt e Rock, 1989) no excel, a partir dos comprimentos de onda extraídos do arquivo em ".txt", gerado pelo ENVI. Utilizamos o primeiro índice como parâmetro para investigar a atividade fotossintética, e o segundo, estresse hídrico.

Análises de significâncias estatísticas

As análises estatísticas foram feitas no software SPSS. Para as comparações entre as médias obtidas em cada espécies em cada ponto da curva (A, B, C, D e E) e índices vegetacionais foram realizadas OneWay ANOVAs e com post-hoc Scheffé (confiança de 90%). Este último compara simultaneamente as combinações entre pares possíveis de médias lineares (IBM, 2023) e permite obter resultados representativos com intervalo de confiança menor ($p<0,1$) e baixo n amostral (Freire, S. 2021). Para a comparação dentro de cada espécie entre as medidas centrais e laterais no campo, e entre as medidas centrais no campo e no laboratório, foi utilizado o teste Mann-Whitney (dados não-paramétricos) com intervalo de confiança de 90% ($p<0,1$).

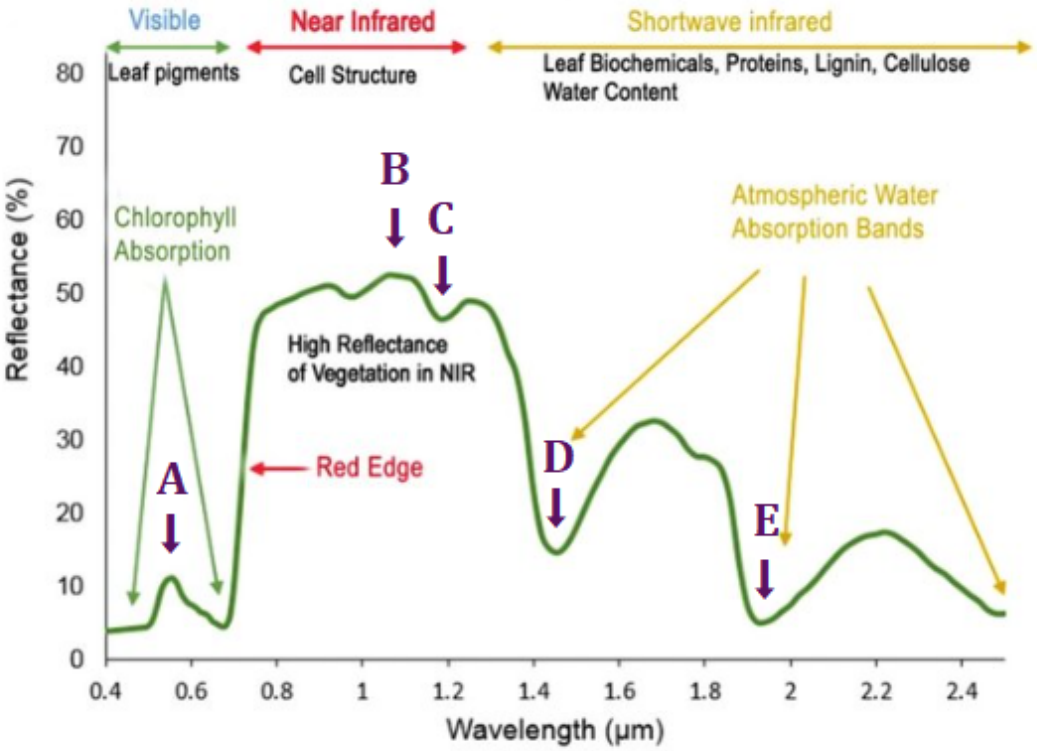

Figura 3. Curva representativa do comportamento espectral da vegetação. Os valores do eixo y para comparar estatisticamente as médias foram extraídos dos pontos A, B, C, D e E de todas as medições das espécies vegetais do estudo. (Modificado de Roman, 2016).

Resultados

Comparação entre as espécies

As médias dos pontos da curva analisados (Figuras 3 e 4, Quadro 1) e dos índices vegetacionais (Tabela 1) não variaram significativamente entre as espécies quanto às medidas centrais nas folhas, exceto pela RefA. Tal reflectância foi maior em *S. reniformis* que em *P. heteromallum*, enquanto *E. erythropappus* não diferiu das outras espécies.

Senna reniformis também apresentou valores significativamente mais elevados de RefA que as demais espécies nas medidas laterais da folha no campo. Quanto às reflectâncias nos pontos B, C e D, *E. erythropappus* apresentou os menores valores. Essa espécie também apresentou a menor RefE, mas diferiu significativamente apenas de *P. heteromallum*. Nas medidas centrais em laboratório, *S. reniformis* se diferenciou das demais espécies em função de suas reflectâncias mais baixas nos pontos RefB e RefC.

Não foram encontradas diferenças interespecíficas significativas de NDVI e MSI nas medições centrais no campo (Tabela 1). Nas medidas laterais da folha, entretanto, menores valores de NDVI foram medidos em *E. erythropappus* que nas outras espécies. Já em laboratório, menores valores de NDVI foram mensurados em *S. reniformis*. Essa espécie também apresentou maiores valores de MSI que *P. heteromallum*, enquanto *E. erythropappus* não se diferenciou das demais.

Comparação das medidas centrais e laterais no campo

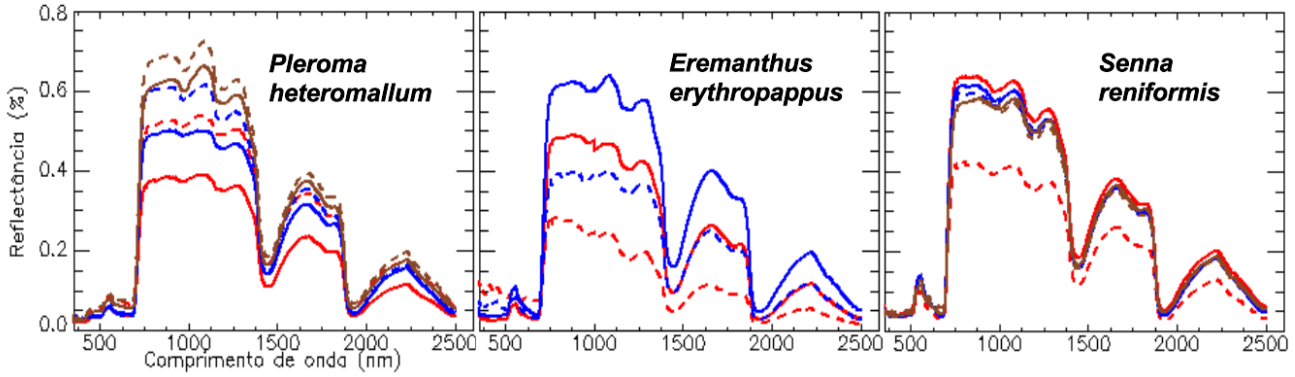

Figura 4. Espectro de reflectância das folhas de *P. heteromallum*, *E. erythropappus* e *S. reniformis* obtidos das medidas centrais e laterais em campo. Cada par de cor é referente a um indivíduo. A linha contínua representa a medição central e a tracejada da mesma cor, sua respectiva medida lateral. Devido à erro experimental na medição lateral em campo do primeiro indivíduo de *E. erythropappus*, tal curva foi retirada da análise.

Na comparação intraespecífica entre as medições centrais e laterais feitas em campo, observamos que em *P. heteromallum* a reflectância aumentou significativamente na medida lateral no

infravermelho próximo (RefB, C; ver fig. 3 e 4, Tabela 1), enquanto em *E. erythropappus* diminuiu aproximadamente 20% no infravermelho próximo e médio (RefB, C, D). Já em *S. reniformis*, apesar da diferença na curva de uma das folhas, com diminuição de 20% na reflectância na medição lateral no infravermelho próximo e médio até 1.800 nm (RefB, C, D), não houve diferença significativa (Tabela 1). Para *S. reniformis* houve variação significativa para MSI, que foi maior nas medidas laterais da folha.

Comparação entre as medidas centrais no campo e no laboratório

De maneira geral, a variação intraespecífica das três curvas de reflectância espectral das medidas centrais foliares em campo foi maior que aquela observada nas medidas centrais em laboratório (Figura 5). A variação foi maior na faixa do infravermelho próximo, correspondente aos efeitos da anatomia do mesófilo, especialmente em *P. heteromallum*, em menor grau em *E. erythropappus* e quase imperceptível em *S. reniformis*. No entanto, conforme já descrito, diferenças significativas entre as espécies nas RefB e RefC foram encontradas apenas nas medidas em laboratório.

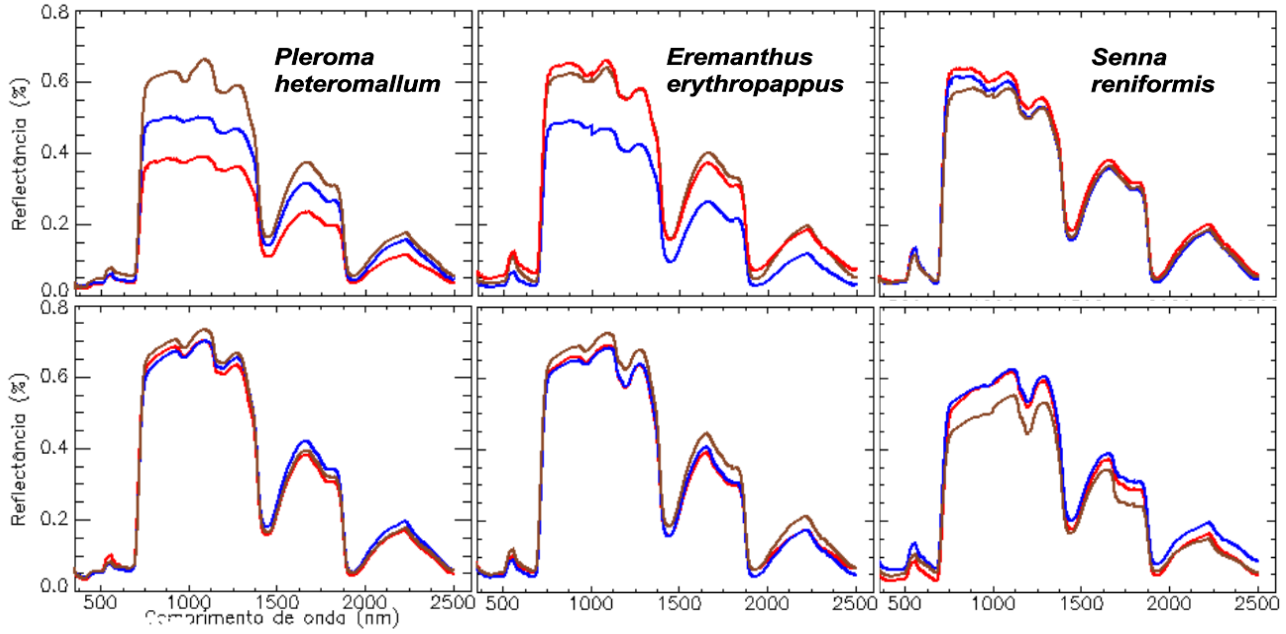

Figura 5. Reflectância espectral das folhas de *P. heteromallum*, *E. erythropappus* e *S. reniformis* obtidas com as medições centrais realizadas em campo (gráficos superiores) e em laboratório (gráficos inferiores).

De fato, as medições em laboratório revelaram aumento significativo na reflectância dos pontos RefB e RefC em comparação com os valores obtidos em campo, exceto em *S. reniformis*, enquanto os outros pontos da curva não sofreram alterações.

Quanto ao NDVI, valores médios mais elevados foram mensurados em laboratório em relação ao campo em *P. heteromallum* e em *S. reniformis*. Essa espécie também apresentou elevação de MSI no laboratório (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios de reflectância (%) em diferentes pontos da curva (A, B, C, D e E; ver fig. 3) e índices de vegetação NDVI e MSI mensurados em folhas maduras de *Pleroma heteromallum*, *Eremanthus erythropappus* e *Senna reniformis* no final da estação chuvosa. Em campo as medidas foram realizadas incluindo a nervura central (central) ou a evitando (lateral), enquanto no laboratório apenas medidas centrais foram feitas.

Local da medida	Espécie	RefA	RefB	RefC	RefD	RefE	NDVI	MSI
Campo – Central	*E. erythropappus*	10,6ab	59,6a*	50,5a*	14,0a	4,7a	0,55a	0,59a
	P. heteromallum	7,5a	51,6a*	45,8a*	15,0a	5,0a	0,45a*	0,62a
	S. reniformis	12,8b	60,8a	51,5a	17,1a	4,7a	0,58a*	0,60a*
Campo – Lateral	*E. erythropappus*	8,9a	34,1a&	26a&	7,3a	2,4a	0,21a	0,53a
	P. heteromallum	7,9a	62,4b&	54b&	16,6b	5,5b	0,56b&	0,61a
	S. reniformis	12,5b	53,4b	44,1b	14,4b	3,8ab	0,49b&	0,61a&
Lab – Central	*E. erythropappus*	10,6a	69,9b	59,0b	16,7a	5,8a	0,61b	0,64ab
	P. heteromallum	8,7a	71,0b	62,3b	13,0a	4,9a	0,62b	0,60a
	S. reniformis	11,1a	59,6a	49,8a	18,1a	6,1a	0,46a	0,70b

Letras diferentes na mesma coluna e local de medida indicam diferença significativa entre as espécies ($p<0,1$). * indica diferença significativa ($p<0,1$) entre as medidas centrais realizadas no campo e no laboratório para cada espécie. & indica diferença significativa ($p<0,1$) entre as medidas centrais e laterais realizadas no campo para cada espécie.

Discussão

As espécies estudadas diferiram em alguns pontos das curvas de reflectância e em índices vegetacionais especialmente quando as medidas em campo evitaram a nervura central ou após período de dessecamento até o transporte para o laboratório. A única diferença significativa encontrada entre as espécies na medida centralizada nas folhas em campo indicou menor absorção de radiação pelos pigmentos fotossintéticos em *S. reniformes* em contraste com *P. heteromallum*.

Os valores de reflectância nesta região do visível (RefA; ver tab. 1), entretanto, variaram pouco (de 7,5 a 12,8%) entre as espécies, e encontram-se dentro da faixa considerada como indicadora de plantas saudáveis, que refletem de 10 a 30% (Roman e Ursu 2016). Diferenças de absorção de radiação fotossinteticamente ativa de e reflectância podem se dever a inúmeros fatores de natureza morfológica, anatômica, fisiológica (bioquímica) e estruturais da vegetação e em resposta à variação das condições edafoclimáticas dentro de um mesmo ambiente, tanto ao nível do indivíduo quanto de grupos funcionais de espécies (Asner, Levick e Smit 2011).

De fato, *S. reniformis* pertence a um grupo funcional de espécies dos campos rupestres ferruginosos que apresenta alta velocidade de absorção de água pelas folhas, porém baixo conteúdo total de água na turgidez, enquanto o contrário é observado em *E. erythropappus* e *P. heteromallum* (Boanares *et al.* 2018a, b). Em grande parte, tais diferenças são explicadas por atributos anatômicos foliares (Quadro 1) que podem também afetar o espectro de reflectância, como a espessura da folha, constituição do mesofilo, lignina, entre outros. Na região do visível (RefA), entretanto, espera-se que o efeito dos pigmentos fotossintéticos se destaque. Leguminosas, em geral, tendem a apresentar maiores concentrações foliares de nitrogênio e clorofilas e altas taxas fotossintéticas, o que deveria ser expresso por menores valores de RefA em *S. reniformis*. Por outro lado, não há ainda estudos que tenham abordado a existência da relação simbiótica dessa espécie com organismos fixadores de nitrogênio. Além disso, Boanares *et al.* (2019, 2021) demonstraram relação inversa entre a velocidade de absorção de água pela folha e a assimilação de carbono, condutância estomática, transpiração, fotoinibição e termotolerância (em folhas menos hidratadas) nos campos rupestres. Assim, comparativamente, *E. erythropappus* e *P. heteromallum*, que compõem o grupo funcional de lenta absorção de água pela folha, mas maior conteúdo total na turgidez, deveriam apresentar maiores valores fotossintéticos e menor fotoinibição, mantendo maior absorção de radiação fotossinteticamente ativa.

Senna reniformis também se diferenciou das demais espécies quanto às reflectâncias estimadas nas medidas centrais foliares em laboratório, mas nos pontos B e C da curva, NDVI e MSI (diferença significativa somente em relação à *P. heteromallum*). A desidratação das folhas

elevou significativamente a reflectância nos pontos B e C em *E. erythropappus* e *P. heteromallum*, mas não afetou os valores em *S. reniformis*. Esses resultados parecem refletir os achados de Boanares *et al.* (2021) que demonstram que as espécies como *P. heteromallum* e *E. erythropappus* dessecam as folhas mais rapidamente que espécies do outro grupo funcional, como *S. reniformis*. Se por um lado a perda de água ocorre mais lentamente em *S. reniformis*, afetando pouco a RefB e RefC, por outro lado, mesmo essa menor perda pode ter desencadeado o aumento do MSI e a redução do NDVI, uma vez que o conteúdo total de água capaz de ser estocado nas folhas dessa espécie é menor que nas outras duas (Boanares *et al.* 2018a,b). Curiosamente o NDVI em *P. heteromallum* foi elevado nas medidas em laboratório em relação àquelas em campo.

A reflectância na região do infravermelho próximo relaciona-se à estrutura do mesofilo, sendo influenciadas pelas cavidades do interior da folha e pelo colapso das paredes celulares (Campbell, 2006). Como alterações anatômicas ocorrem naturalmente ao longo do tempo em resposta à variação dos fatores ambientais, espera-se que diferenças foliares entre espécies e grupos funcionais sejam refletidas na assinatura espectral (Cavender-Bares *et al.* 2020). No processo de transpiração, a água sai pela folha através da superfície das células do mesofilo que estão em contato com os estômatos, o que significa que a reflectância nesta região também é afetada pelo conteúdo de água. Em folhas maduras e saudáveis, 40-60% é refletido nesta faixa, como observado nas três espécies em campo. Em geral, parênquimas mais compactos, menos lacunosos, como o de *P. heteromallum*, apresentam menores valores de reflectância (Ponzoni *et al.* 2012). Na medida no laboratório, exceto por *S. reniformis*, os valores se elevam acima dessa faixa. As propriedades da luz transmitida, absorvida e refletida, são influenciadas pela estrutura e bioquímica da folha e sabe-se que o aumento da reflectância nesta faixa ocorre devido ao espalhamento interno no mesofilo, e pode ser resultado da espessura da folha, ou de alterações epidérmicas (Serbin e Townsend, 2020). Com o dessecamento da folha, as células podem se tornar mais prismáticas e aumentar a reflectância. *E. erythropappus* e *P. heteromallum* possuem folhas mais grossas e saliências epidérmicas mais abundantes que *S. reniformis*.

As medidas realizadas na lateral do limbo foliar mostraram maiores valores de RefA em *S. reniformis* comparativamente às demais espécies, não diferindo dos resultados medidos na parte central da folha. *Eremanthus erythropappus* apresentou os menores valores de reflectância em RefB, RefC e Ref D, além do NDVI, dentre as espécies. Além da faixa do infravermelho próximo, o conteúdo de água também afeta fortemente o espectro de reflectância na região do infravermelho médio. Quanto maior o conteúdo de água, menor a reflectância (Ponzoni *et al.* 2012). Os largos traqueídes nas terminações vasculares de *E. erythropappus* podem funcionar como tanques de água, reduzindo a reflectância nesses pontos da curva. De fato, essa espécie

apresentou a maior capacidade de absorção de água em suas folhas, até mesmo que *P. heteromallum* (Boanares *et al.* 2021), o que está de acordo com os resultados aqui encontrados. Entretanto, não se sabe porque a espécie apresentou o menor valor de NDVI.

Comparando-se as médias das medidas centrais com as laterais da folha em campo, *E. erythropappus* apresentou valores significativamente menores nos pontos RefB e RefC na lateral, enquanto o oposto foi verificado em *P. heteromallum*. Diferenças no padrão de inervação das folhas talvez possam trazer alguma luz a tal diferença entre as espécies. A nervura central de *E. erythropappus* é visivelmente mais calibrosa que as nervuras na lateral da folha. Em *P. heteromallum*, assim como na maioria das melastomatáceas, a nervação curvinérvea com 3 a 8 nervuras que divergem da base e convergem no ápice, sendo fortemente unidas por nervuras secundárias, pode minimizar as diferenças do conteúdo de água do xilema entre o centro e a lateral das folhas, eventualmente até mesmo elevando o conteúdo na lateral. Entretanto, tal explicação é especulativa, devendo ser testada em estudos futuros. Além disso, como demonstrado por Ball *et al.* (2015) e Santo *et al.* (2017), partes diferentes da folha podem variar amplamente em suas curvas espectrais. Não houve diferença significativa entre as medidas centrais e laterais nas folhas de *S. reniformis*. Sua pequena área foliar dificulta a eliminação do efeito da nervura central.

S. reniformis se diferenciou significativamente de *P. heteromallum* (RefD) na medida lateral, talvez pela modificação anatômica existente a respeito do menor conteúdo de celulose em sua parede e quantidade reduzida de tricomas, comparativamente, que resultaram em menor reflectância.

Os valores dos índices vegetacionais refletem as condições às quais as plantas estão submetidas, e nos dão pistas sobre sua ecofisiologia (Cavender-Bares *et al.* 2020). Os resultados obtidos de NDVI e MSI foram expectáveis, levando-se em consideração as condições ambientais do campo rupestre em estudo, como solos rasos e pobres em nutrientes e com baixa capacidade de retenção de água, altitude elevada, invernos secos (apesar da presença de neblina) e ambiente altamente exposto ao intemperismo, à amplitude térmica e aos ventos constantes.

O NDVI, como índice indicador de vigor vegetativo, é popularmente interpretado para a medição de densidade vegetal (sensoriamento remoto) ou de atividade fotossintética. No caso deste estudo, ele foi calculado individualmente a partir do espectro de cada folha, e por isso interpretado como indicador de atividade fotossintética. Os resultados variaram de 0,45 a 0,62, com exceção do 0,21 na lateral de *E. erythropappus*. Estes valores se equiparam aos de estudos anteriores em áreas de Cerrado e Savana (Ratana *et al*. 2005; Bayma e Sano, 2015; Bento *et al.* 2018), demonstrando similaridade entre ecossistemas sazonais e de baixa produtividade. Em

sistemas tropicais mais produtivos, como a Mata Atlântica, valores de NDVI variaram de 0,54 a 0,92 ao longo de 12 anos de monitoramento (Ballejo e Guasselli 2017), e em diferentes ambientes na Amazônia brasileira, Silva e Baptista (2015) obtiveram resultados variando de 0,73–0,91 em floresta primária; 0,72–0,88 em local de exploração madeireira seletiva; 0,29–0,31 em área de pastagem, e 0,85 em floresta de transição Amazônia-Cerrado.

Já o MSI, é um índice que responde à indisponibilidade hídrica, que tem como consequência primária a diminuição do conteúdo de água das folhas (Taiz, Zeiger e Møller *et al.* 2021). Por isso, sua interpretação é inversa à do NDVI, pois quanto mais alto o valor, maior o estresse hídrico sofrido pela planta. Os resultados variaram de 0,53 a 0,7, indicando estresse (Fernandes, Nunes, Moura *et al.* 2015). As amostras apresentaram valores próximos de MSI entre si, que corroboram o fato da baixa disponibilidade de água na área de estudo e, consequentemente, a baixa produtividade do ecossistema (Taiz, Zeiger e Møller *et al.* 2021, Valim *et al.* 2013).

O baixo número de indivíduos amostrados contribuiu para uma faixa de variação muito estreita nas comparações intra e interespecíficas. Uma caracterização bem-feita da curva espectral de espécies vegetais de campos rupestres ferruginosos demandaria um delineamento amostral mais completo, com a possibilidade de observar as variações em mais indivíduos e ao longo dos períodos seco e chuvoso. Envolvendo uma área de amostragem mais ampla, com mais espécies amostradas e mais indivíduos por espécie, os resultados possivelmente representem melhor o ambiente. Ainda assim, pudemos observar que as diferenças estatisticamente significativas não exprimem grandes variações dentro do ecossistema, e isso corrobora para a construção da biblioteca espectral do campo rupestre ferruginoso.

Conclusão

A assinatura espectral das três espécies vegetais foi obtida, analisada e comparada. Os parâmetros de variação estudados corresponderam com o resultado esperado para campo rupestre, e não apresentaram grandes diferenças entre si, por mais que as espécies se diferenciem anatomicamente, o que é favorável para a proposta da construção de uma biblioteca espectral.

As diferenças entre as medições centrais e laterais não são relevantes de modo a justificar a coleta das folhas para medi-las em laboratório. Por isso, a medição em campo é suficiente para analisar e comparar os padrões desejáveis, além de ser um método não-invasivo.

Foi observado que nas medições centrais, onde a nervura está presente, é que se obtém maior amplitude de variação. Logo, a medição lateral na folha pode ser mais interessante para estudos de caracterização. No entanto, assim como foi feito com *Senna reniformis,* concluímos

que cada espécie, conforme a morfologia da folha, necessitará de uma estratégia particular de medição.

Sendo este o estudo com os primeiros dados espectrais de vegetação do campo rupestre ferruginoso do Quadrilátero Ferrífero e tendo em vista as inúmeras aplicações e interpretações possíveis através do cálculo de índices hiperespectrais, reiteramos a importância do nosso trabalho na contribuição com a caracterização do ecossistema, na padronização do método de mensuração e no desenho de estratégias futuras que visem a conservação ou mesmo a recuperação ao redor do ambiente de estudo. Além do mais, o ecossistema estudado necessita ainda de investigações sobre a flora, visto sua riqueza biológica, alto nível de endemismo e convergência com área de interesse exploratório.

No entanto, para realizar a construção de uma biblioteca espectral geral que possa ser consultada para a caracterização fitofisionômica, são necessários mais estudos que investiguem as variações nos índices hiperespectrais da vegetação, e os relacione com aspectos ecofisiológicos, litológicos e químicos de maneira integrada, com um acompanhamento sazonal e maior n amostral. Índices mais específicos como o de reflectância fotoquímica (PRI), de reflectância de senescência de plantas (PSRI) e de clorofila (CI), por exemplo, podem ser usados além do NDVI e do MSI.

Referências

Global iron ore data. USGS, 2017. Disponível em: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/global_iron_ore_data.pdf />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

Anuário mineral brasileiro. ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

Competitividade da indústria mineral brasileira. MME, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-4-competitividade-da-industria-mineral-brasileira/copy_of_InfraestruturadeTransporteeLogsticadoSetorMineralBrasileiro.pdfesa=Desource=docseust=1692194109826159eusg=AOvVaw1CdnD0xrvf4vZn3EnrVCB_ />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

Silveira, F. A., Negreiros, D., Barbosa, N. P., Buisson, E., Carmo, F. F., Carstensen, D. W., ... e Lambers, H. (2016). **Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a**

neglected conservation priority. Plant and soil, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2637-8

Mineração em choque com a biodiversidade. IBRAM, 2007. Disponível em: <https://www.google.com/url?q=http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id%3DFB5315esa=Desource=docseust=1692194109821637eusg=AOvVaw24u_1sEEAsvijbXyTHhF4N />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

Fernandes, G. W., Arantes-Garcia, L., Barbosa, M., Barbosa, N. P. U., Batista, E. K. L., Beiroz, W., Silveira, F. A. O. (2020, October 1). **Biodiversity and ecosystem services in the Campo Rupestre: A road map for the sustainability of the hottest Brazilian biodiversity hotspot. Perspectives in Ecology and Conservation**. Associação Brasileira de Ciência Ecológica e Conservação. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.10.004

Pontara, V., Bueno, M., Rezende, V., Deoliveira-Filho, A., Gastauer, M., e Meira-Neto, J. (2018). **História evolutiva do campo rupestre: uma abordagem para a conservação de comunidades vegetais lenhosas.** Biodiversidade e Conservação , 27 (11), 2877–2896. https://doi.org/10.1007/s10531-018-1574-2

Menini Neto, L., Alves, RJV, Barros, F. de, e Forzza, RC (2007). **Orchidaceae do Parque Estadual de Ibitipoca, MG, Brasil.** Acta Botanica Brasilica , 21 (3), 687-696. https://doi.org/10.1590/s0102-33062007000300015

Messias, MCTB, Leite, MGP, Meira-Neto, JAA, e Kozovits, AR (2012). **Fitossociologia de campos rupestres quartzíticos e ferruginosos no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais.** Acta Botanica Brasilica , 26 (1), 230-242. https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000100022

Rech, A. R., Jorge, L. R., Ollerton, J., e Sazima, M. (2018). **Pollinator availability, mating system and variation in flower morphology in a tropical savanna tree.** Acta Botanica Brasilica, 32(3), 462–472. https://doi.org/10.1590/0102-33062018abb0220

Colli-Silva, M., Vasconcelos, T. N. C., e Pirani, J. R. (2019). **Outstanding plant endemism levels strongly support the recognition of campo rupestre provinces in mountaintops of eastern South America.** Journal of Biogeography, 46(8), 1723–1733. https://doi.org/10.1111/jbi.13585

Steffani Najara De Pinho Queiroz, Marco Aurélio Da Cunha Moreira Pacheco, Luís Paulo Sant'ana, Camila Cristina Da Cruz, Cristhian Nathan Silva Oliveira, Yrllan Ribeiro Sincurá, Amanda De Oliveira Baracho, Julya Pires Souza, e André Rodrigo Rech. (2019). **Polinizadores e visitantes florais da Cadeia do Espinhaço: o estado da arte.** Revista espinhaço, 7(2), 12–26. https://doi.org/10.5281/zenodo.3952802

Braz, DM, Jacques, E. de L., Somner, GV, Sylvestre, L. da S., Rosa, MMT da, Pereira-Moura, MVL, … Amorim, TA (2013). **Restinga de Praia das Neves, ES, Brasil: caracterização**

fitofisionômica, florística e conservação. Biota Neotropica , 13 (3), 315–331. https://doi.org/10.1590/s1676-06032013000300032

CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing** New York: Taylor e Francis, 2006. 625p.

Cavender-Bares, J., Gamon, J. A., Serbin, S. P. e Townsend, P. A. (2020). **Remote sensing of plant biodiversity** (p. 356). Springer Nature.

Dudley, K. L., Dennison, P. E., Roth, K. L., Roberts, D. A., e Coates, A. R. (2015). **A multi-temporal spectral library approach for mapping vegetation species across spatial and temporal phenological gradients.** *Remote Sensing of Environment*, *167*, 121–134. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.004

Xiao, Q., Tao, J., Xiao, Y., e Qian, F. (2017). **Monitoring vegetation cover in Chongqing between 2001 and 2010 using remote sensing data.** *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(10). https://doi.org/10.1007/s10661-017-6210-1

Houborg, R.; McCabe, M.F. **High-Resolution NDVI from Planet's Constellation of Earth Observing Nano-Satellites: A New Data Source for Precision Agriculture.** Remote Sensing. 2016, 8, 768. https://doi.org/10.3390/rs8090768

Ramos, J. C. B., Leite, E. da S., Poelking, E. L., Freitas, L. C. de, Melo, I. N., Martins, R. P., e Costa, J. A. (2023). **Índices de vegetação na diagnose nutricional de povoamentos híbridos de Eucalyptus urophylla** S. T. Blake. Ciência Florestal, 33(2), e65702. https://doi.org/10.5902/1980509865702

Hott, M. C., Carvalho, L. M. T., Antunes, M. A. H., Resende, J. C., e Rocha, W. S. D. (2019). **Analysis of grassland degradation in Zona da Mata, MG, Brazil, based on NDVI time series data with the integration of phenological metrics**. Remote Sensing, 11(24). https://doi.org/10.3390/rs11242956

Berveglieri, A., Imai, N. N., Christovam, L. E., Galo, M. L. B. T., Tommaselli, A. M. G., e Honkavaara, E. (2021). **Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series.** Remote Sensing Applications: Society and Environment, 24. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100622

Gonçalves, R. V. S., Cardoso, J. C. F., Eugênio Oliveira, P., e Coelho Oliveira, D. (2021). **Changes in the Cerrado vegetation structure: Insights from more than three decades of ecological succession.** Web Ecology, 21(1), 55–64. https://doi.org/10.5194/we-21-55-2021

Boulton, C.A., Lenton, T.M. e Boers, N. **Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s.** Nat. Clim. Chang. 12, 271–278 (2022). https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8

Souza-Filho, P. W. M., Giannini, T. C., Jaffé, R., Giulietti, A. M., Santos, D. C., Nascimento, W. R., … Siqueira, J. O. (2019). **Mapping and quantification of ferruginous outcrop savannas in the Brazilian Amazon: A challenge for biodiversity conservation.** PLoS ONE, 14(1). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211095

Gastauer, M., Nascimento, W. R., Caldeira, C. F., Ramos, S. J., Souza-Filho, P. W. M., e Féret, J. B. (2022). **Spectral diversity allows remote detection of the rehabilitation status in an Amazonian iron mining complex.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 106. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102653

Fernandes-Filho, E. I., Reynaud Schaefer, C. E. G., Faria, R. M., Lopes, A., Francelino, M. R., e Gomes, L. C. (2022). **The unique and endangered Campo Rupestre vegetation and protected areas in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil.** Journal for Nature Conservation, 66. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126131

Oecologia Australis 20(2): 162-174, 2016 10.4257/oeco.2016.2002.03

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Changes). 2013. **Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York: 1535p.

Novo, Evlyn M.L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto, princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

Curran, P. J. (1989). **Remote sensing of foliar chemistry**. *Remote Sensing of Environment*. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90069-2

Schettini, A. T., Leite, M. G. P., Messias, M. C. T. B., Gauthier, A., Li, H., e Kozovits, A. R. (2018). **Exploring Al, Mn and Fe phytoextraction in 27 ferruginous rocky outcrops plant species.** Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 238, 175–182. https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.05.004

Boanares, D., Isaias, R. R. M. S., de Sousa, H. C., e Kozovits, A. R. (2018a). **Strategies of leaf water uptake based on anatomical traits**. *Plant Biology*, *20*(5), 848–856. https://doi.org/10.1111/plb.12832

Boanares, D., Ferreira, B. G., Kozovits, A. R., Sousa, H. C., Isaias, R. M. S., e França, M. G. C. (2018b). **Pectin and cellulose cell wall composition enables different strategies to leaf water uptake in plants from tropical fog mountain.** Plant Physiology and Biochemistry, 122, 57–64. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.11.005

Boanares, D., Bueno, A., de Souza, A. X., Kozovits, A. R., Sousa, H. C., Pimenta, L. P. S., Isaias, R. M. S., França, M. G. C. (2021). Cuticular wax composition contributes to different strategies of foliar water uptake in six plant species from foggy rupestrian grassland in tropical mountains. Phytochemistry, 190. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112894

[1] MERCADANTE, Mauricio. *Pleroma heteromallum*. 2012. Figura 1 (A). <Disponível em: https://www.flickr.com/photos/mercadanteweb/6622386667 >

[2] CORREA, Leonardo. *Eremanthus erythropappus* – candeia verdadeira. 2023. Figura 1 (B). <Disponível em: https://biologiadapaisagem.com.br/2023/05/18/eremanthus-erythropappus-candeia-verdadeira/ >

[3] MOTTA, Ignez. *Senna reniformis* - Fabaceae. 2013. Figura 1 (C). <Disponível em: https://www.flickr.com/photos/ignezmotta/8534932026/in/photostream/ >

Fernandes, A. T., Nunes, G. M., de Moura, J. M., Dos Santos, L. F. B., e Vista, C. C. B. **Espectrorradiometria foliar na determinação de déficit hídrico em espécies de cerrado stricto sensu no Parque Nacional de Chapada dos Guimarães/MT.** <Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1579.pdf />

Alvares, CA, Stape, JL, Sentelhas, PC, De Moraes Gonçalves, JL, e Sparovek, G. (2013). **Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil.** Meteorologische Zeitschrift , 22 (6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

EMBRAPA. 1999. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, EMBRAPA.

Ficha pública do táxon. REFLORA, 2020. Disponível em: <reflora.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id%3DFB5315esa=Desource=docseust=1692194109821637eusg=AOvVaw24u_1sEEAsvijbXyTHhF4N />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

DA SILVA, Milena Dutra *et al.* (2011). **Espectrorradiometria foliar de espécies dominantes em um fragmento de caatinga, Pernambuco**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil.

Kriegler, F.J.; Malila, W.A.; Nalepka, R.F.; Richardson, W. **Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition.** Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, p. 97-131, 1969.

Hunt, E.R.; Rock, B.N. **Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectance**, Remote Sensing of Environment, n.30, p.43–54, 1989.

FREIRE, Sérgio Miranda. **Bioestatística básica [livro eletrônico]**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. do autor, 2021. Disponível em: <

https://www.lampada.uerj.br/arquivosdb/_book/bioestatisticabasica.html#bioestatisticabasica />
Acesso em: 18 de ago. de 2023

Testes Post Hoc do ANOVA de um fator. IBM, 2023. Disponível em: < https://www.ibm.com/docs/pt-br/spss-statistics/saas?topic=anova-one-way-post-hoc-tests /> Acesso em: 18 de ago. de 2023

Roman, A., e Ursu, T.-M. (2016). **Multispectral Satellite Imagery and Airborne Laser Scanning Techniques for the Detection of Archaeological Vegetation Marks.** In C. H. Opreanu e V.-A. Lăzărescu (Eds.), *Landscape Archaeology on the Northern Frontier of the Roman Empire at Porolissum* (pp. 141–152). MEGA Publishing House.

Asner, G. P., Levick, S. R., e Smit, I. P. J. (2010). Remote sensing of fractional cover and biochemistry in Savannas. In Ecosystem Function in Savannas: Measurement and Modeling at Landscape to Global Scales (pp. 195–217). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10275

Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., e Kuplich., T. M. (2012). **Sensoriamento Remoto No Estudo Da Vegetação.** Boletim de Geografia (Vol. 2, p. 1160). Oficina de Textos.

Ball, A., Sanchez-Azofeifa, A., Portillo-Quintero, C., Rivard, B., Castro-Contreras, S. e Fernandes, G. (2015). **Patterns of leaf biochemical and structural properties of Cerrado life forms: Implications for remote sensing**. PLoS ONE, 10(2). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117659

Ratana, P., Huete, AR, e Ferreira, L. (2005). **Análise de fisionomias de cerrado e conversão no domínio sazonal-temporal MODIS**. Interações com a Terra, 9 (3), 1–22. https://doi.org/10.1175/1087-3562(2005)009

Global iron ore data. USGS, 2017. Disponível em: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/global_iron_ore_data.pdf />. Acesso em: 17 de ago. de 2023

Bayma, AP, e Sano, EE (2015). **Séries temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor modis para detecção de desmatamentos no bioma cerrado.** Boletim de Ciências Geodésicas, 21 (4), 797–893. https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400047

Bento, V. A., Gouveia, C. M., DaCamara, C. C., e Trigo, I. F. (2018). **A climatological assessment of drought impact on vegetation health index.** Agricultural and Forest Meteorology, 259, 286–295. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.014

Ballejo da Costa, L. C., e Guasselli, L. A. (2017). **Dinâmica sazonal de remanescentes da mata atlântica, a partir de séries temporais ndvi/modis / seasonal dynamics of the remaining atlantic forest, from a time series NDVI/MODIS.** Geo UERJ, 0(30). https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.15868

Mohanasundaram, S., Baghel, T., Thakur, V., Parmeshwar Udmale e Sangam Shrestha . **Reconstructing NDVI and land surface temperature for cloud cover pixels of Landsat-8 images for assessing vegetation health index in the Northeast region of Thailand.** Environ Monit Assess 195, 211 (2023). https://doi-org.ez28.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10661-022-10802-5

Silva, S. C. P. D., e Baptista, G. M. D. M. (2015). **Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de co2 em diferentes ambientes na amazônia brasileira.** Boletim de Ciências Geodésicas, 21(2), 354–370. https://doi.org/10.1590/s1982-21702015000200020

Taiz, L., Zeiger, E., e Møller, I. M. et al. (2021). **Fundamentos de fisiologia vegetal.** Grupo A. https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9786581335113

Valim, E. A. R., Nalini Jr, H. A., & Kozovits, A. R. (2013). **Litterfall dynamics in a iron-rich rock outcrop complex in the southeastern portion of the Iron Quadrangle of Brazil.** Acta Botanica Brasilica, 27, 286-293. https://doi.org/10.1590/S0102-33062013000200005