UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

JOSÉVALDO RIBEIRO SILVA

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO E DA COMPOSIÇÃO MINERAL DAS PLANTAS NA REFLETÂNCIA DO DOSSEL DE VIDEIRAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

Recife
2023

Josévaldo Ribeiro Silva
Engenheiro Agrônomo

Influência das características do solo e da composição mineral das plantas na refletância do dossel de videiras na região semiárida do Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

Coorientadora: Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi

Coorientador: Dr. Fernado Bruno Vieira da Silva

Recife
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Josévaldo Ribeiro
Influência das características do solo e da composição mineral das plantas na refletância do dossel de videiras na região semiárida do Brasil / Josévaldo Ribeiro Silva. - 2023.
98 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Clistenes Williams Araujo do Nascimento.
Coorientador: Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi; Dr. Fernado Bruno Vieira da Silva.
Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2023.

1. Vitis vinifera. 2. Sensoriamento remoto. 3. Veículo aéreo não tripulado. 4. Diagnose nutricional. 5. Adubação. I. Nascimento, Prof. Dr. Clistenes Williams Araujo do, orient. II. Silva, Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi; Dr. Fernado Bruno Vieira da, coorient. III. Título

CDD 631.4

JOSÉVALDO RIBEIRO SILVA

Influência das características do solo e da composição mineral das plantas na refletância do dossel de videiras na região semiárida do Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 26 de junho de 2023

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dr Fernando Bruno Vieira da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Amelia Laisy do Nascimento
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro
Universidade Federal Rural do Semiárido

Dr. Davi José Silva
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Ao estado de Pernambuco, símbolo de força na economia e cultura do nordeste e do país.

OFEREÇO

À minha esposa, aos meus pais, à minha irmã e aos meus sobrinhos por serem meu porto seguro. Vocês me sustentaram em cada dificuldade e me incentivaram sempre quando foi preciso.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram e torceram pela minha formação profissional. Aos que caminharam comigo durante essa jornada e entenderam por muitas vezes, minha ausência, estresse e cansaço.

À minha família por acreditar tanto em mim, no meu potencial. Por todo incentivo, amor, paciência e companheirismo. Por todos os momentos em que estivemos reunidos numa mesa de jantar ou em volta de uma fogueira celebrando nossa união, momentos que tornavam as obrigações mais leves.

À minha esposa, Caline Ribeiro, que é a minha melhor amiga e amor da minha vida, por todo o companheirismo e apoio nas horas mais difíceis e incentivo quando o fardo parecia ser insustentável.

Minha mãe, Maria Josefa, por ser a calmaria, por me trazer paz, por todo cuidado e amor. Meu pai, João Batista, por desde muito cedo me apresentar a profissão que eu queria para minha vida, por todo amor, incentivo e confiança. Minha irmã, Jéssica Ribeiro, pelo companheirismo, amor, parceria, amizade, confiança, por me presentear com duas sobrinhas lindas (Lavínia e Lívia) que enchem minha vida de mais amor. Obrigado, minhas pequenas, por todo peso que tiram de cima de mim só em ver os sorrisos inocentes e tão amáveis que me ganham por completo. Ao meu filho de quatro patas, o Chico, que transformou minha vida e me enche de tanto amor e lambeijos.

À UFRPE, em nome de todos os profissionais que fazem a engrenagem funcionar, que me acolheram respeitosamente e contribuíram com todo esse processo de formação intelectual. A todos os professores do programa (Professora Caroline, Professor Emídio, Professor Fernando e todos os demais professores) pelos ensinamentos.

Em especial, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Clístenes, exemplo de profissional e mestre, foi uma honra ser seu orientando. Obrigado pela oportunidade, por me testar e mostrar do quanto sou capaz, pela confiança e amizade, pelo companheirismo durante as viagens a Petrolina que proporcionaram não só o desenvolvimento desta pesquisa, mas também o direcionamento da minha vida profissional. E, principalmente, obrigado por todo conhecimento e vivência compartilhados.

Agradeço aos meus companheiros pesquisadores do Grupo de Química Ambiental de Solos, dos quais posso destacar o Venâncio, o Luiz, a Adriana e os demais integrantes que considero amigos. Foi um privilégio conviver, trabalhar e vivenciar tantos momentos ao lado de vocês.

Agradeço em especial ao Willian Ramos (Will), um grande parceiro e amigo que levarei por toda a minha vida. Obrigado por deixar mais leve essa árdua caminhada, por toda ajuda e amizade.

Ao Fernando Bruno, coorientador, e aos estagiários, pela colaboração com as análises.

À Simone e à Jô pela prontidão, colaboração, carinho e amizade.

Ao Grupo de Estudos em Ecofisiologia e Estresse Vegetal (Dra. Ana Rita Leandro) do Instituto Federal do Sertão Pernambucano por ajudar com a coleta de dados nos campos experimentais.

Agradeço a FACEPE que confiou no nosso projeto e patrocinou esta pesquisa. Ao Estado do Pernambuco que foi minha casa por 4 anos e pelo qual guardo grande carinho e admiração à história, ao povo e à cultura.

Acima de tudo agradeço à Deus que nunca me deixou caminhar sozinho, por direcionar a minha vida aos caminhos que me trouxeram até aqui e por me permitir vivenciar com muita luta e alegrias as experiências acadêmicas e, ainda, de vida e de amizade que me formaram enquanto ser pensante e social. Obrigado, Deus, por toda a sua obra em minha vida.

Muito Obrigado!

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO E DA COMPOSIÇÃO MINERAL DAS PLANTAS NA REFLETÂNCIA DO DOSSEL DE VIDEIRAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

RESUMO GERAL

A principal região produtora de uva de mesa do Brasil é o submédio do Vale do Rio São Francisco, localizada na região semiárida do Nordeste, com cerca de 10.807 ha cultivados com videiras. Problemas como a falta de monitoramento continuado das caraterísticas químicas de solo ameaçam o desenvolvimento sustentável da atividade na região. O objetivo do nosso trabalho foi avaliar, por meio de dados de sensoriamento remoto, a assinatura espectral de cultivares de uva de mesa e sua relação com os teores de nutrientes no solo e nas folhas. Foram estudadas as cultivares de uva (*Vitis vinifera*) Arra15®, BRS Vitória e Cotton Candy®. Em 270 amostras de solos (0-20 cm) foram determinados pH, N, P, K, Ca, Mg, matéria orgânica (MO), H+Al, Fe, Mn, Zn e Cu e calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), a soma de bases (SB) e a saturação por bases (V). A mesma quantidade de amostra de folhas foi coletada para determinação dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, MO, Fe, Mn, Zn e Cu). A krigagem foi utilizada para avaliar a variabilidade espacial dos nutrientes no solo. A partir de dados espectrais foi gerado o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada (GNDVI), o Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância (MCARI), o Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação Transformada (TVI) das cultivares. Nas áreas, o P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu apresentaram teores acima do nível crítico para fertilidade do solo, sugerindo excessos na adubação. Os atributos do solo apresentaram dependência espacial fraca a moderada. Teores excessivos de N, P e Cu e deficientes de K, Ca, Zn e Mn foram observados em todas as cultivares. Com relação a predição de nutrientes pelos índices de vegetação, houve relação do P na Arra 15® com TVI ($r^2 = 0,31$), enquanto para a Cotton Candy®, o NDVI e SAVI apresentaram a mesma eficiência ($r^2 = 0,10$). Na cultivar BRS Vitória, o NDVI e o GNDVI se relacionaram com o N ($r^2 = 0,24$) e o Cu ($r^2 = 0,27$), respectivamente. Os teores de MO e CTC apresentou r^2 acima de 0,15 em relação ao NDVI por meio da análise de regressão. Nossos resultados apontaram baixa capacidade preditiva do NDVI em relação aos atributos. No entanto, dada a significância estatística, há potencial do uso da ferramenta para o manejo da cultura, sendo necessários estudos complementares para melhorar a predição dos atributos pelos dados espectrais.

Palavras-Chave: *Vitis vinifera.* Sensoriamento remoto. Veículo aéreo não tripulado. Diagnose nutricional. Adubação. Nutrição de plantas.

INFLUENCE OF SOIL CHARACTERISTICS AND MINERAL COMPOSITION OF PLANTS ON CANOPY REFLECTANCE OF GRAPES IN THE SEMIARID REGION OF BRAZIL

GENERAL ABSTRACT

The main table grape producing region in Brazil is the sub-medium of the São Francisco River Valley, located in the semi-arid region of the Northeast, with approximately 10,807 hectares cultivated with vines. Problems such as the lack of continuous monitoring of soil chemical characteristics threaten the sustainable development of the activity in the region. The aim of our work was to evaluate, using remote sensing data, the spectral signature of table grape cultivars and their relationship with nutrient content in the soil and leaves. The grape cultivars (*Vitis vinifera*) Arra15®, BRS Vitória and Cotton Candy® were studied. In 270 soil samples (0-20 cm) pH, N, P, K, Ca, Mg, organic matter (OM), H+Al, Fe, Mn, Zn and Cu were determined and the cation exchange capacity calculated (CTC), the sum of bases (SB) and the base saturation (V). The same amount of leaf sample was collected for determination of nutrients (N, P, K, Ca, Mg, MO, Fe, Mn, Zn and Cu). Kriging was used to evaluate the spatial variability of nutrients in the soil. From spectral data were generated the Normalized Difference Green Vegetation Index (GNDVI), the Reflectance Modified Chlorophyll Absorption Index (MCARI), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and the Transformed Vegetation Index (TVI) of the cultivars. In all areas, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn and Cu showed levels above the critical level for soil fertility, suggesting excesses in fertilization. Soil attributes showed weak to moderate spatial dependence. Excessive levels of N, P and Cu and deficient levels of K, Ca, Zn and Mn were observed in all cultivars. Regarding the prediction of nutrients by vegetation indices, there was a relationship between P in Arra 15® and TVI ($r^2 = 0.31$), while for Cotton Candy®, NDVI and SAVI showed the same efficiency ($r^2 = 0.10$). In cultivar BRS Vitória, NDVI and GNDVI were related to N ($r^2 = 0.24$) and Cu ($r^2 = 0.27$), respectively. The MO and CTC contents presented r^2 above 0.15 in relation to the NDVI through regression analysis. Our results showed a low predictive capacity of the NDVI in relation to the attributes. However, given the statistical significance, there is potential for using the tool for crop management, requiring further studies to improve the prediction of attributes by spectral data.

Keywords: *Vitis vinifera.* Remote sensing. Unmanned aerial vehicle. Nutritional diagnosis. Fertilization. Plant nutrition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das áreas alvo das videiras e distribuição dos pontos de amostragem. A: Brasil; B: Estados de Pernambuco (vermelho) e da Bahia (amarelo); C: Localização das áreas; D: Área da cultivar Arra 15®; E: Área da cultivar BRS Vitória; e F: Área da cultivar Cotton Candy® 36

Figura 2 – Esquema de localização do ponto amostral em relação a planta.....37

Figura 3 – (a) Fluxograma da metodologia utilizada no estudo e (b) processo geral de geração de dados.....39

Figura 4 – Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar Cotton Candy®.....48

Figura 5 – Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar BRS Vitória.....49

Figura 6 – Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar Arra 15®.....50

Figura 7 – Concentração média (±desvio padrão) de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e) em folhas das cultivares de uva Arra 15®, BRS Vitória e Cotton Candy® cultivadas no Vale do São Francisco no Brasil. As linhas verde e vermelha são respectivamente o limite inferior e superior da faixa ótimas de concentração de nutrientes para a cultura da uva.....51

Figura 8 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar Arra 15® cultivada na região semiárida do Brasil.....56

Figura 9 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar BRS Vitória cultivada na região semiárida do Brasil.....56

Figura 10 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar Cotton Candy® cultivada na região semiárida do Brasil.....57

Figura 11 – Relação entre a concentração de P nas folhas da cultivar de uva Arra 15® e o Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância - MCARI (A) e o Índice de Vegetação Transformado - TVI (B).....61
Figura 12 – Relação entre a concentração de nutrientes nas folhas da cultivar de uva BRS Vitória e os Índices de Vegetação pela Diferença Normalizada – NDVI (A), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI (B) e o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada – GNDVI (D).....61
Figura 13 – Relação entre a concentração de P e Ca em folhas da cultivar de uva Cotton Candy® e o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada – GNDVI (A e F), Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância - MCARI (B), Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada – NDVI (C), Índice de Vegetação Ajustada ao Solo – SAVI (D) e Índice de Vegetação Transformada – TVI (E).....62
Figura 14 – Grid amostral (10 x 10 m) e Localização do vinhedo em estudo no Brasil (A), estado da Bahia (B) e na Fazenda Santa Felicidade (C). Vista panorâmica da área de estudo capturada por VANT (D) e pelo satélite Landsat 8 (E). Captura do campo experimental em diferentes fases fenológicas por diferentes sensores (F, G, H e I)....80
Figura 15 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com VANT nas fases de floração e maturação.....84
Figura 16 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com satélite nas fases de floração e colheita..... 84
Figura 17 – Relação entre atributos químicos do solo cultivado com a cultivar de uva BRS Vitória e o NDVI gerado por VANT e Satélite na fase de florescimento.....90
Figura 18 – Relação entre atributos químicos do solo cultivado com a cultivar de uva BRS Vitória e o NDVI gerado por VANT na fase de maturação.....91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de solo e teores médios de areia, silte e argila das áreas experimentais ... .37

Tabela 2 – Índices de vegetação selecionados para este estudo.....41

Tabela 3 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo na profundidade de 0 – 20 cm das áreas cultivadas com três cultivares de uva (*Vitis vinifera*) no Vale do São Francisco, região semiárida do Brasil.....43

Tabela 4 – Faixas de interpretação de atributos químicos do solo para fins de fertilidade 44

Tabela 5 – Modelos e parâmetros estimados de semivariogramas de atributos químicos do solo, na profundidade de 0 - 20 cm, em áreas cultivadas com três cultivares de uva de mesa (*Vitis vinifera*) no Vale do São Francisco, região semiáriada do Brasil.....46

Tabela 6 – Estatística descritiva de índices de vegetação, baseados em sensor embarcado em veículo áreo não tripulado, de áreas cultivada com três cultivares de uva de mesa (*Vitis vinifera)* 54

Tabela 7 – Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos por meio de um sensor multiespectral embarcado em VANT e os nutrientes determinados na folha completa de três cultivares de uva de mesa.....58

Tabela 8 – Estatística descritiva do NDVI de área experimental cultivada com *Vitis vinifera* cv. NBS Vitória no Vale do São Francisco, Brasil, em diferentes fases fenológicas..... .85

Tabela 9 – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo, na profundidade de 0 - 20 cm, de áreas cultivadas com três cultivares de *Vitis vinifera* no Vale do São Francisco, Brasil.....86

Tabela 10 – Valores do coeficiente de correlação de Pearson para as propriedades do solo da área de estudo e o NDVI obtidos por por VANT e satélite em diferentes fases fenológica de videiras cultivadas no semiárido do Brasil.....89

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 14
1.1. Hipóteses 15
1.2. Objetivos 16
1.2.1. Objetivo geral 16
1.2.2. Objetivos específicos 16
2. REVISÃO DE LITERATURA 17
2.1. Produção de uva no Brasil e o panorama do Vale do São Francisco 17
2.2. A videira e seus estágios fenológicos 19
2.3. Nutrição e sua diagnose na viticultura 21
2.4. Sensoriamento remoto e diagnose nutricional de plantas 23
Referências bibliográficas 26
3. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS E DIAGNOSE NUTRICIONAL POR SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREAS CULTIVADAS COM UVA DE MESA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL 32
Resumo 32
Abstract 33
3.1. Introdução 34
3.2. Material e Métodos 35
3.2.1. Descrição do local, solo e dados meteorológicos 35
3.2.2. Amostragem de solo e análise 37
3.2.3. Amostragem de folha e análise 38
3.2.4. Aquisição e processamento de dados por sensoriamento remoto 39
3.2.5. Aquisição de dados aéreos 39
3.2.6. Processamento de dados aéreos e índices de vegetação 40
3.2.7. Análise estatística e geoestatística 41
3.3. Resultados e Discussão 42
3.3.1. Características químicas dos solos 42
3.3.2. Distribuição espacial de atributos químicos do solo 45
3.3.3. Teor de nutrientes nas plantas 50
3.3.4. Assinatura espectral do dossel de videiras 53
3.3.5. Correlação entre o teor de nutrientes e os índices de vegetação 57
3.4. Conclusões 64
Referências bibliográficas 65

4. VARIAÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO OBTIDO POR MEIO DE SENSORES EMBARCADOS EM VANT E EM SATÉLITE NAS FASES FENOLÓGICAS DA VIDEIRA E SUA CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO 76
Resumo 76
Abstract 77
4.1. Introdução 78
4.2. Material e Métodos 79
4.2.1. Área experimental 79
4.2.2. Sistema de cultivo 79
4.2.3. Aquisição e processamento de dados obtidos por sensores 79
4.2.4. Amostragem de solo 82
4.2.5. Análise química de solo 82
4.2.6. Análise estatística 83
4.3. Resultados e Discussão 83
4.3.1. NDVI obtido por VANT e satélite 83
4.3.2. Atributos químicos do solo 86
4.3.3. Correlação entre o NDVI e os atributos químicos do solo 87
4.4. Conclusão 92
Referências bibliográficas 94
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 98

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é um dos principais produtores de uva do mundo, com mais de 74.826 ha produzindo 1,4 milhão de toneladas. A principal região produtora de uva de mesa é o submédio do Vale do Rio São Francisco, localizado na região semiárida do Nordeste, com cerca de 10.807 ha cultivados com videiras nos estados da Bahia e de Pernambuco. Do total da área cultivada, 53 % referem-se a uva sem semente, tipo preferido pelo mercado externo. O Submédio do Vale do São Francisco responde por mais de 90% das exportações brasileiras de uva de mesa do Brasil.

Apesar da pujança econômica e do potencial de expansão deste arranjo produtivo local (APL), alguns problemas relacionados ao manejo de solo e nutrição da cultura da uva persistem como ameaças ao desenvolvimento sustentável da viticultura na região. Uma das problemáticas é a falta de monitoramento continuado das caraterísticas químicas de solo e a necessidade de geração informações para minimizar os impactos ambientais nos solos dos perímetros irrigados, mediante acompanhamento das alterações no solo causadas pelo uso de práticas agrícolas.

Estudos que procurem entender melhor a variabilidade espacial de nutrientes nos solos dos vinhedos do Vale do São Francisco e a acumulação desses elementos pelas plantas são fundamentais para melhorias na fertilidade do solo mediante o manejo adequado dos nutrientes. Neste contexto, o uso da geoestatística é fundamental para o entendimento da variabilidade espacial dos fenômenos que ocorrem no solo e são refletidas pelo estado nutricional das plantas e pela refletância das folhas.

Conhecer a variabilidade espacial das caraterísticas químicas e da nutrição de plantas é fundamental para o planejamento e implementação de manejos específicos de nutrientes em vinhedos. No entanto, estudos com este contexto são escassos no Vale do São Francisco. Uma das limitações enfrentadas pelos produtores da região para implementar essas técnicas é a falta de estudos sistemáticos que avaliem e quantifiquem a variabilidade espacial nos talhões. Portanto, estudos precisam ser desenvolvidos visando propiciar um manejo específico para cada área, minimizando o uso excessivo de fertilizantes, com reflexos e impactos não apenas econômicos, mas também ambientais.

O sensoriamento remoto é uma técnica capaz de obter informações de um objeto sem contato físico. Essa ferramenta pode ser utilizada para avaliar biomassa e

produtividade da cultura, realizar o monitoramento do estresse hídrico e do vigor das plantas e avaliar o estágio fenológico. Dados obtidos por sensores remotos têm sido utilizados como ferramenta para o monitoramento dos fatores que interferem na produtividade. Atualmente, este tipo de análise pode ser realizado por satélites, aeronaves, veículos aéreos não tripulados (VANT), máquinas autopropelidas e sensores de refletância do dossel.

Dados da refletância podem ser utilizados para estimativas de índice de área foliar, biomassa ou fração radiativa interceptada fotossinteticamente. As propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser avaliadas por combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais. Essas transformações são medidas da atividade da vegetação e utilizam as faixas do visível e do infravermelho próximo para a geração dos índices de vegetação.

Para as condições da Região do Vale do São Francisco, informações sobre os índices de vegetações baseados do dossel de videiras são escassas ou inexistentes. As técnicas de sensoriamento remoto, aéreo e terrestre, são úteis para a observação da variabilidade em campo. A combinação de técnicas de sensoriamento remoto e dados locais permite melhor compreensão dos sistemas de cultivo, a exemplo da dinâmica de características do solo, do desenvolvimento da cultura e da absorção de nutrientes. Neste contexto, os VANTs são plataformas adequadas para monitorar campos de pequeno a médio porte, típicos na viticultura do Vale do São Francisco.

1.1. Hipóteses

Existe alta variabilidade espacial dos atributos químicos do solo nos campos de produção de uva de mesa no Vale do São Francisco.

O estado nutricional das videiras pode ser avaliado por meio de índices de vegetação gerados por dados de sensor multiespectral embarcado em VANT.

Diferentes cultivares apresentam distintos comportamentos com relação as assinaturas espectrais e, consequentemente, interferem na capacidade preditiva desses índices sobre os nutrientes nas folhas.

O índice de vegetação por diferença normalizada é capaz de estimar os atributos químicos do solo em diferentes fases fenológicas da videira.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar por meio de dados de sensoriamento remoto a assinatura espectral de diferentes cultivares de uva de mesa cultivadas no Vale do São Francisco e sua relação com os teores de nutrientes no solo e nas folhas.

1.2.2. Objetivos específicos

Avaliar os atributos químicos do solo em três áreas cultivadas com as cultivares de uva Arra 15®, Cotton Candy® e BRS Vitória;

Analisar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e criar mapas de distribuição no campo de produção visando entender as variações de produção de frutas nas áreas.

Avaliar o estado nutricional de três cultivares de uva mesa a partir dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu nas folhas.

Investigar a capacidade de índices de vegetação se correlacionarem com os teores de nutrientes nas folhas das videiras, assim como sua capacidade de fazer a predição para utilização em programas de manejo de adubação na viticultura.

Avaliar a geração de NDVI por sensores embarcados em satélite e VANT em diferentes fases fenológicas da videira buscando comparar as diferentes plataformas.

Verificar a relação e a capacidade preditiva de índice de vegetação de diferentes sensores na estimativa dos atributos químicos do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Produção de uva no Brasil e o panorama do Vale do São Francisco

A viticultura no Brasil iniciou com a chegada dos colonizadores, sendo registrada a introdução da espécie *Vitis vinifera* L. em 1534 e seu cultivo no litoral paulista por Brás Cuba. No entanto, o cultivo da uva só se tornou comercial em meados do século XIX com a vinda de imigrantes italianos e sua tradição na produção e consumo de vinhos (LEÃO, 2010).

No Nordeste, o cultivo de uva começou por volta de 1636, mais especificamente nas ilhas de Itamaracá e Itaparica, respectivamente nos estados de Pernambuco e Bahia. A cultura foi posteriormente implantada de forma comercial no sertão desses mesmos estados, na região do submédio do São Francisco, a partir do ano de 1950 por intermédio da Comissão do Vale do São Francisco (LEÃO; POSSÍDIO, 2000).

No Brasil, cerca de 74.625 hectares são ocupados pela viticultura, com produção anual flutuando ao redor de 1,4 milhão de toneladas, equivalente a 1,92% da produção mundial (FAO, 2019). O cultivo está estabelecido em regiões de clima temperado nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, em clima subtropical nos estados de São Paulo e Minas Gerais, e em clima tropical no polo produtor no Vale do São Francisco (CAMARGO et al., 2011).

Dados do Censo Agropecuário mostram que cerca de 29% da produção brasileira em 2017 foi destinada a uva de mesa e 71% para processamento de vinho, suco e espumante. Em valores monetários, em 2017, a cultura destinada a vinho gerou receita de R$ 1 bilhão (IBGE, 2017). Em 2020, a cultura gerou o terceiro maior faturamento nas exportações de frutas, atingindo US$ 105 milhões, aumento de 13% comparado a 2019 (MAPA, 2020).

A região do submédio do Rio São Francisco tem despontado como principal polo produtor de uva de mesa do Brasil, representando 31% da produção nacional, o que equivale a aproximadamente 306,7 mil toneladas (IBGE, 2020).

Apesar da forte competição nas exportações de uva com África do Sul e Chile no primeiro semestre, Egito em junho e julho, e Europa em agosto e setembro, os produtores do Submédio do São Francisco, desde 2002, são responsáveis por 99% do comércio internacional da fruta brasileira, principalmente nos meses de outubro e novembro, exportando em 2019 cerca de 42 mil toneladas, principalmente para

Holanda, Reino Unido e Estados Unidos (JULIÃO et al., 2017; HORTIFRUTI BRASIL, 2020).

Grande parte do sucesso da viticultura no Vale do São Francisco deve-se ao clima tropical, o qual não apresenta grandes variações, ou seja, sem ocorrência de temperaturas baixas o suficiente para induzir dormência nas videiras e fazendo com que elas vegetem durante o ano inteiro. Em conjunto com técnicas de manejo adequadas, isso possibilita a ocorrência de duas ou mais safras anuais, sendo um fato único entre os países produtores da fruta (CAMARGO et al., 2011).

Aliado ao aumento da quantidade de cultivares disponíveis e a demanda de mercado exterior, a viticultura da região tem se expandido atingindo cerca de 8.299 hectares no estado de Pernambuco e 1.969 hectares no estado da Bahia, sendo considerada uma das principais atividades geradoras de divisas no semiárido nordestino (IBGE, 2021).

Em Pernambuco, a viticultura está inserida no Arranjo Produtivo Local (APL) do vinho, uva e derivados, no qual concentram-se os municípios de Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande, pertencentes à região de Desenvolvimento “Sertão do São Francisco”. A base produtiva de uva do APL tem concentração em uva de mesa com cultivos que ocupam 5.128 hectares, 688 produtores e área média de cultivo de 7,47 hectares.

Do total de uva de mesa produzido, 53% referem-se a uva sem semente, tipo preferido pelo mercado externo. Em 2016, em torno de 11 % da produção do APL foi destinado ao mercado externo, no qual, considerando preços recebidos pelos produtores de uva ou de vinhos/espumantes/sucos, foi valorado em U$ 376 milhões, sendo a uva de mesa responsável por 90% desse valor (VALEXPORT, 1998; VITAL, 2009; SECTI/PE, 2017).

Em busca de maiores produtividades, resistência a doenças, adaptação local e, principalmente, atendimento ao exigente mercado de exportação, nas últimas décadas nas áreas de cultivo do Vale do São Francisco tem ocorrido a substituição de cultivares tradicionais de uva. Cultivares com semente como Itália e Benitaka, e sem sementes, como Sugraone e Thompson estão dando lugar as novas cultivares produzidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e empresas privadas (LEÃO, 2021).

Dentre as novas cultivares de uva de mesa, a BRS Vitória (MAIA et al., 2012) tem recebido grande atenção dos produtores com rápida expansão de cultivo, assim

como a BRS Isis (RITSCHEL et al., 2013), a BRS Melodia (MAIA et al., 2019) e a BRS Tainá (LEÃO et al., 2020), as quais fazem parte dos materiais genéticos disponibilizados pela EMBRAPA. As cultivares consideradas gourmet de empresas internacionais como a Arra 15® e a Cotton Candy®, também têm se expandido em cultivos, junto a elas, outras cultivares com a Sugar Crisp®, Sweet Celebration® e Timco® estão entre os mais de 70 materiais disponíveis para cultivo no Vale do São Francisco (LEÃO, 2021).

Os principais sistemas de condução da cultura é a latada ou espaldeira. Na Latada ou pérgola, o dossel fica distribuído horizontalmente de modo que as videiras ficam alinhadas em fileiras a uma distância entre 2,0 e 3,0 m, com zona de produção localizada a 2,0 m do solo. No sistema em espaldeira, o dossel fica distribuído de forma vertical, com fileira distanciadas a 3,0 m e zona de produção variando de 1,5 a 2,0 m (MIELE; MANDELLI, 2015).

Pesquisas aplicadas que busquem entender os sistemas de produção da uva e a aplicação de novas tecnologias são essenciais para a região, visto que, apesar do potencial produtivo do APL, um dos gargalos à viticultura, de acordo com o Plano Nacional de Desenvolvimento da Fruticultura, é falta de ajuste de tecnologias que se adaptem ao cultivo de diversas cultivares e aos ambientes de produção. Por exemplo, estudo recente utilizando a metodologia SWOT ou FOFA (acrônimo para Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças), da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Pernambuco apontou problemas relacionados ao manejo de solo e nutrição da cultura da uva como ameaças ao desenvolvimento sustentável da viticultura na região (SECTI/PE, 2017).

2.2. A videira e seus estágios fenológicos

A videira é uma planta da família *Vitaceae*, possui onze gêneros e cerca de quatrocentos e cinquenta espécies. Grande importância econômica é dada à espécie *Vitis vinifera* L. por ser base da viticultura mundial, estando no gênero *Vitis* todas as videiras de origem europeia, americana e asiática. O centro de dispersão dessa espécie foi a região de Cáucaso, na Europa, e devido a facilidade na propagação assexuada estima-se que ela deu origem a mais de 14000 cultivares de uva de mesa, vinhos, sucos e passas (ALLEWELD et al., 1990; ALVARENGA, 1998; ALBUQUERQUE, 2003).

Anatomicamente, a videira apresenta sistema radicular estrutural lenhoso que possui entre 6 e 100 mm de diâmetro e se aprofunda de 30 a 35 cm, com crescimento estabilizado após o terceiro ano de idade. As raízes permanentes possuem entre 2 e 6 mm de diâmetro, das quais se originam os pelos absorventes que corresponde a maior parte desse sistema, com 52% do seu volume dentro dos 30 primeiros centímetros do perfil do solo (SOARES; NASCIMENTO, 1998).

A videira possui caule sarmentoso e hábito de crescimento trepador, derivando-se deste os braços e subsequentemente os brotos, os quais são herbáceos no início do desenvolvimento vegetativo e passam a ser lenhosos e de maior diâmetro com o decorrer do ciclo da cultura. As folhas, constituídas de pecíolo e limbo, possuem face adaxial brilhante voltada à luz e a face abaxial esbranquiçada e com maior número de tricomas direcionada ao solo (ALBUQUERQUE, 2003). Há formação de gavinhas opostas às folhas com função de sustentação e de origem da modificação de inflorescência. A flor de cor verde, contida na inflorescência denominada racimo, é hermafrodita na maioria das cultivares, constituída por cinco pétalas, cinco sépalas, cinco estames e um ovário. O fruto é do tipo baga, organizado em uma infrutescência denominada cacho, a qual é constituída por pedúnculo, ráquis e pedicelos, onde fixam os frutos (GIOVANNINI, 2013).

O ciclo da videira é dividido em vegetativo e reprodutivo, com períodos alternados de repouso. O ciclo vegetativo compreende ao período que vai desde o extravasamento da seiva com a poda, seguido do início da brotação de gemas dormentes e aumento da atividade de divisão celular, cessando na paralização de crescimento e lignificação dos ramos. O ciclo reprodutivo representa o período da floração, frutificação, seguido do crescimento e amadurecimento de frutos. Por fim, o período de repouso corresponde aquele entre dois ciclos vegetativos e reprodutivos na cultura, sendo realizado a partir da suspensão controlada de irrigação e tendo por objetivo induzir o acúmulo de reservas (LEÃO; MAIA, 1998).

A fenologia corresponde a descrição das fases de desenvolvimento de uma cultura a partir do comportamento da planta frente as condições climáticas do ambiente (ORTEGA-FARIAS; RIVEROS-BURGOS, 2019). O conhecimento dos estágios fenológicos entrega ao viticultor informações prévias do período de colheita, além de auxiliar a otimizar recursos demandados no manejo da cultura, fornecendo por exemplo o momento correto para adubação, desponte apical, entre outros. Os estágios fenológicos são avaliados a partir de escalas, uma das mais utilizadas é a de

Coombe (1995) que classifica o ciclo em 47 fases. Adicionalmente, várias outras escalas podem ser encontradas na literatura como Baggiolini (1952), Eichhorn, Lorenz et al., (1977) e Lorenz (1994).

Os efeitos de variáveis climáticas sobre a fenologia das videiras são significativos, a temperatura afeta a atividade fotossintética, devido as respostas das reações bioquímicas e fotoquímica, de forma que abaixo de 20 °C a taxa de fotossíntese é menor que aquele entre temperatura de 25 e 30 °C (SADRAS; MORAN, 2013). A radiação solar tem efeito direto sobre a fotossíntese, sendo considerado ótimo um fluxo de fótons entre 600 e 700 mmol m^{-2} s^{-1}. A umidade tem efeito na regulação da atividade dos estômatos, sendo verificado que em déficit hídrico a concentração de ácido abscísico se elevam induzindo o fechamento estomático e retardando a atividade fotossintética (MONTORO, 2020). Ainda, a umidade do ar e os ventos têm efeito sobre a transpiração e absorção de CO2, além de influenciar no aparecimento de doenças fúngicas (ALBUQUERQUE, 2003).

A maneira como a planta cresce e se desenvolve pode afetar a sua assinatura espectral, ou seja, como os tecidos foliares se relacionam com a energia incidente e o espectro eletromagnético emitido pelo sol e, assim, como essa relação refletirá seu estado nutricional (AHMAD et al., 2022).

2.3. Nutrição e sua diagnose na viticultura

O manejo nutricional da videira é baseado na fertilidade do solo, requerimento da planta e no estado nutricional, objetivando a elevação da produtividade e da qualidade do fruto produzido. Variáveis como a cultivar de porta-enxerto e copa, idade de cultivo, clima e nível tecnológico do pomar devem ser levados em consideração no ajuste da adubação, evitando-se desequilíbrios no fornecimento dos nutrientes (BRUNETTO et al., 2015; ZHANG et al., 2016).

A avaliação nutricional da videira é realizada, principalmente, por meio da diagnose das folhas, visto que esses órgãos são sensíveis as alterações fisiológicas resultantes do desequilíbrio na nutrição. Na literatura, encontram-se trabalhos utilizando a folha completa, apenas o pecíolo ou só o limbo para realização da diagnose foliar (BENITO et al., 2013). A amostragem da folha completa (limbo e pecíolo) oposta ao primeiro cacho contado a partir do ápice do ramo tem sido sensível a mudanças nutricionais, estando presente nas recomendações de órgãos de

pesquisa do Brasil como EMBRAPA, Instituto Agronômico de Campinas e é prática comum em outros países como França e Itália (FREGONI, 1980; FRÁGUAS, 1992).

A amostragem de folhas é realizada em duas épocas na Europa, sendo elas o florescimento e início da maturação das bagas, e em plena floração nos Estados Unidos (FREGONI, 1980; CHRISTENSEN et al.,1978). No Brasil, avaliações na época do florescimento têm se mostrado eficientes na caracterização do estado nutricional, visto que durante esse estágio ocorre o acúmulo máximo de nutrientes e maior sensibilidade da análise (CHRISTENSEN et al.,1982; FARIA et al., 2004).

Os teores de nutrientes nas folhas tomados como referência na viticultura variam de acordo com os fatores cultivar, solo, clima, tipo de amostra, entre outros. Em avaliação nutricional da videira no submédio do São Francisco, Faria et al. (2004), com amostras de folhas coletadas em plena floração, sugeriram os teores adequados de 22,5 a 27,5 g kg^{-1} para nitrogênio (N), 2 a 3,5 g kg^{-1} para fósforo (P), 12 a 20 g kg^{-1} para potássio (K), 20 a 35 g kg^{-1} para cálcio (Ca), 3 a 5 g kg^{-1} para magnésio (Mg), 25 a 40 mg kg^{-1} para boro (B), 10 a 20 mg kg^{-1} para cobre (Cu), 60 a 180 mg kg^{-1} para ferro (Fe), 80 a 300 mg kg^{-1} para manganês (Mn) e 25 a 50 mg kg^{-1} para zinco (Zn).

Trabalhos clássicos como os de Fráguas et al. (2003), Kenworthy (1967) e Terra (2003), têm sido utilizados como referências para a interpretação da análise foliar em videiras. De acordo com os padrões obtidos por Kenworthy (1967), em amostras de folhas completas coletadas durante a fase de maturação das bagas, os teores adequados de N variam entre 16 e 24 g kg^{-1}, 1,2 a 1,4 g kg^{-1} para P, 8 a 16 g kg^{-1} para K, 16 a 24 g kg^{-1} para Ca, 2 a 6 g kg^{-1} para Mg, 30 a 65 mg kg^{-1} para B, 60 a 180 mg kg^{-1} para Fe, 20 a 300 mg kg^{-1} para Mn e 25 a 60 mg kg^{-1} para zinco.

Os padrões estabelecido por Terra (2003) para amostras de folhas completas coletadas em pleno florescimento apontam teores ótimos de N variando entre 30 e 35 g kg^{-1}, 2,4 a 2,9 g kg^{-1} para P, 15 a 20 g kg^{-1} para K, 13 a 18 g kg^{-1} para Ca, 4,8 a 5,3 g kg^{-1} para Mg, 3,3 a 3,8 g kg^{-1} para enxofre (S), 45 a 53 mg kg^{-1} para B, 18 a 22 mg kg^{-1} para cobre (Cu), 97 a 105 mg kg^{-1} para Fe, 67 a 73 mg kg^{-1} para Mn e entre 30 e 35 mg kg^{-1} para zinco.

Para amostras de folhas da região basal dos ramos coletadas no início da maturação das bagas, Fráguas et al. (2003) propôs os teores padrões de 1,1 a 2,9 g kg^{-1} para N, 0,1 a 0,12 g kg^{-1} para P, 0,78 a 2,55 g kg^{-1} para K, 1,62 a 4,62 g kg^{-1} para Ca, 0,18 a 0,89 g kg^{-1} para Mg, 183 a 3391 mg kg^{-1} para Mn, 20 a 227 mg kg^{-1} para

Zn, 50 a 21016 mg kg^{-1} para Cu, 91 a 563 mg kg^{-1} para Fe e 91 a 563 mg kg^{-1} para boro.

Outros trabalhos avaliando teores padrões de videiras em folhas completas de cultivares Itália e Rubi propuseram valores ótimos de N entre 16 a 24 g kg^{-1}, 1,2 a 4,0 g kg^{-1} para P, 8 a 16 g kg^{-1} para K, 16 a 24 g kg^{-1} para Ca, 2 a 6 g kg^{-1} para Mg, 3 a 20 mg kg^{-1} para Cu, 60 a 180 mg kg^{-1} para Fe, 25 a 60 mg kg^{-1} para Zn, 20 a 300 mg kg^{-1} para Mn e 30 a 65 mg kg^{-1} para boro (TONIN et al., 2009). Em avaliação da cultivar Tempranillo, os autores apontaram teores padrões de 31 a 32 g kg^{-1} para N , 2,7 a 3,0 g kg^{-1} para P, 8,9 a 10 g kg^{-1} para K, 22 a 25 g kg^{-1} para Ca, 3,5 a 4,1 g kg^{-1} para Mg, 105 a 131 mg kg^{-1} para Fe, 68 a 87 mg kg^{-1} para Mn, 18 a 20 mg kg^{-1} para Zn, 12 a 17 mg kg^{-1} para Cu e 58 a 67 mg kg^{-1} para boro (GARCÍA-ESCUDERO et al., 2013).

A extração de nutrientes, para cada tonelada de fruto produzido, pela videira é na ordem de 2 a 4 kg de N, entre 0,53 e 0,62 kg de P, aproximadamente 5 kg de K, 4 kg de Ca, 0,6 kg de Mg, 0,5 kg de S, 7 a 10 g de B, 0,6 g de Cu, 3 g de Fe, 2 g de Mn, 0,5 g de zinco (HIROCE et al.,1979; GIOVANNINI, 2013).

Apesar de classicamente empregada, a técnica de diagnose foliar tem como principal desvantagem o grande número de amostras que devem ser coletadas, seguido dos dispendiosos trabalhos de análise em laboratório, que em extensas áreas de produção pode se tornar um processo muito oneroso. Neste contexto, técnicas alternativas para avaliar o estado nutricional baseadas no sensoriamento remoto têm se mostrado promissoras e têm sido empregadas em grandes culturas como trigo (FABRI et al., 2020), soja (CHEN et al., 2019); algodão (ABULAITI et al., 2020), cana-de-açúcar (LISBOA et al., 2018; MIPHOKASAP; WANNASIRI, 2018), milho (WEN et al., 2021), assim como em espécies frutíferas como manga (MAHAJAN et al., 2021), maçã (YE et al., 2020) e laranja (OSCO et al., 2020).

2.4. Sensoriamento remoto e diagnose nutricional de plantas

O sensoriamento remoto é a técnica pela qual um sensor, embarcado em um satélite, aeronave tripulada ou em uma aeronave remotamente pilotada, faz a detecção e monitoramento das características físicas de um determinado alvo na superfície terrestre. A técnica baseia-se na mensuração da assinatura espectral de alvos de interesse, a qual tem o potencial de coletar de dados sem a necessidade de um contato direto entre eles e o sensor (SIMONETTI; ULABY, 1983).

A interação dos raios solares com o tecido foliar ocorre por dois processos, sendo eles a absorção e o espalhamento (FONTANA et al., 2020; YENGOH et al., 2015). Sabe-se que os pigmentos fotossintéticos como a clorofila a e clorofila b localizados nas membranas dos tilacóides nos cloroplastos, absorvem pacotes de luz (fótons) a partir da energia incidente originada do espectro eletromagnético. Esses pigmentos fotossintéticos possuem máxima absorção de fótons nos comprimentos de onda 428 e 660 nm na clorofila a e 452 e 640 nm na clorofila b, os quais referem-se às regiões do vermelho e azul, de tal forma que o comprimento do verde é refletido, resultando nas cores verdes das folhas (LICHTENTHALER, 1987). O espalhamento de bandas do espectro no tecido foliar ocorre pela presença de espaço preenchidos por ar ou água no interior da estrutura foliar, os quais possuem diferentes índices de refração e reflexão (YENGOH et al., 2015).

Nenhuma absorção de fótons na folha acontece nas bandas do espectro que estão entre 700 e 1300 nm, onde se encontra o infravermelho próximo, de modo que a alteração nessa relação, ou seja, a absorção desses comprimentos aponta desordens no aparato fotossintético (TÜRKER-KAYA et al., 2017). Dessa maneira, índices de vegetação, que são expressões matemáticas que representam a relação entre a interação dos espectros visível e do infravermelho próximo, podem servir como raios-x das culturas, apontando zonas com possíveis problemas relacionados a pragas, doenças, impedimentos físicos no solo ou estado nutricional (HUANG et al., 2021).

No campo, vários estudos fizeram uso da refletância calculada a partir da região do infravermelho próximo do espectro de luz (790-840 nm) e comprimentos de onda circundantes, como por exemplo a borda vermelha, região localizada em torno de 730 nm. Esta região parece ter uma relação direta consistente com a biomassa e o status de N de uma cultura (LI et al., 2014; LIEBISCH et al., 2014; PREY; SCHMIDHALTER, 2019). Por exemplo, analisando a variabilidade espacial do vigor de um vinhedo usando o Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), Santesteban et al. (2010) identificaram variação espacial dificilmente visível ao nível do campo.

Atualmente, as técnicas de sensoriamento remoto, aéreo e terrestre, são um elemento chave para a observação da variabilidade em campo, permitindo, em combinação com outras técnicas, uma melhor compreensão dos sistemas de cultivo, como a dinâmica de características do solo, o crescimento da cultura e a absorção de nutrientes (GABRIEL et al., 2017; KHAN et al., 2018; NAWAR et al., 2017). Neste

contexto, os VANTs são plataformas adequadas para monitorar campos de pequeno a médio porte, típicos na viticultura do Vale do São Francisco.

As principais vantagens desses sistemas são sua flexibilidade de uso e sua capacidade de fornecer, simultaneamente, alta resolução espacial referente a área do solo representada por cada pixel e a resolução temporal que corresponde ao tempo para revisita do sensor na área de interesse (YAO et al., 2019; TIRADO et al., 2020).

Referências bibliográficas

ABULAITI, Y.; SAWUT, M.; MAIMAITIAILI, B.; CHUNYUE, M. A possible fractional order derivative and optimized spectral indices for assessing total nitrogen content in cotton. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 171, p. 105275, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105275

ALBUQUERQUE, T. C. S. Videira (Vitis sp). In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.(Coord.). **Eco fisiologia de fruteiras: abacateiro, aceroleira, macieira, pereira e videira**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2003. p. 93-119.

ALLEWELD, G.; SPIEGEL-ROY, P.; REISCH, B. Grapes (Vitis). In: MOORE, In: BALLINGTON, J.L. (Eds.). **Genetic Resources of Temprate Fruit and Nut Crops**. Acta Hortic, 1990. p. 291–337.

ALVARENGA, A. A.; ABRAHÃO, E.; REGINA, M. D. A.; ANTUNES, L. E. C.; PEREIRA, A. F. Origem e classificação botânica da videira. **Informe Agropecuário**, Brasília, v.194, p.5-8. 1998.

BAGGIOLINI, M. Les stades repères dans le developpement anual de la vigne. Revue Romande d´Agriculture, de Viticulture et d´Arboriculture. **Lausanne**, v. 8, p. 4-6, 1952.

BENITO, A.; ROMERO, I.; DOMÍNGUEZ, N.; GARCÍA-ESCUDERO, E.; MARTÍN, I. Leaf blade and petiole analysis for nutrient diagnosis in Vitis vinifera L. cv. Garnacha Tinta. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 19, p. 285– 298, 2013. https://doi.org/10.1111/ajgw.12022

BRUNETTO, G.; MELO, G. W. B. D.; TOSELLI, M.; QUARTIERI, M.; TAGLIAVINI, M. The role of mineral nutrition on yields and fruit quality in grapevine, pear and apple. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, p. 1089-1104, 2015. https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15

CAMARGO, U. A.; TONIETTO, J.; HOFFMANN, A. Progressos na viticultura brasileira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 144-149, 2011. https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500017

CHEN, J.; LI, F.; WANG, R.; FAN, Y.; RAZA, M. A.; LIU, Q.; WANG, Z.; CHENG, Y.; WU, X.; YANG, F.; YANG, W. Estimation of nitrogen and carbon content from soybean leaf reflectance spectra using wavelet analysis under shade stress. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 482-489, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.003

CHRISTENSEN, L. P.; KASIMATIS, A. N.; JENSEN, F. L. **Grapevine nutrition and fertilization in San Joaquin Valley**. Berkeley: University of California, Princed Publication, p. 40, 1982.

COOMBE, B. G. Growth Stages of the Grapevine: Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 1, n. 2, p. 104–110, 1995. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1995.tb00086.x

EICHHORN, K. W.; LORENZ, H. Phaenologische entwicklungstadien der rebe. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes. **Braunschweig**, v. 29, p. 119-120, 1977.

FABBRI, C.; MANCINI, M.; MARTA, A. D.; ORLANDINI, S.; NAPOLI, M. Integrating satellite data with a Nitrogen Nutrition Curve for precision top-dress fertilization of durum wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 120, p. 126148, 2020. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126148.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT 2017 **- Agriculture**. Disponível em: < https://www.fao.org>. Acesso em: 20 set. 2022.

FARIA, C. M. B. de; SILVA, D. J.; PEREIRA, J. R. **Avaliação nutricional da videira no Submédio São Francisco**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, p. 20, 2004.

FRÁGUAS, J. C. Diagnose foliar para a videira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 14, n. 1, p. 235-239, 1992.

FRÁGUAS, J. C; MIELE, A.; SILVA, E. B. Grapevine nutritional diagnose methods for the `Serra Gaúcha´viticultural region, Brazil. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, Bordeaux, v. 37, n. 1, p. 15-21, 2003. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2003.37.1.1683

FREGONI, M. **Nutrizione e fertilizzazione della vita**. Bologna: Edagricole, 1980. p. 418.

GARCÍA-ESCUDERO, E.; ROMERO, I.; BENITO, A.; DOMÍNGUEZ, N.; MARTÍN, I. Reference levels for leaf nutrient diagnosis of cv. Tempranillo grapevine in the Rioja appellation. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 44, n. 4, p. 645-654, 2013. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.745385

GIOVANNINI, E. **Manual de viticultura: série Tekne**. Porto Alegre: Bookman, 2014. p. 252.

HORTIFRUTI BRASIL: **Anuário 2019-2020**. Piracicaba, 2020. Disponível em: https://www. hfbrasil.org.br/br/revista/acessar/completo/anuario-2019-2020-retrospectiva-2019- perspectivas--2020-dos-hf-s.aspx. Acesso em: 28 set. 2022.

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **J. For. Res.** v. 32, p. 1–6, 2021. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/resultados-censo-agro-2017.html>. Acesso em: 10 set. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - dezembro 2020**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em 13 set. 2022.

JULIÃO, C. C. B.; BRANCO, D. K. S.; LIMA, J. E. Exportação de uva no Vale do São Francisco: uma análise a partir de vetores autorregressivos. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 48, n. 2, p. 75-83, 2017.

KENWORTHY, A. L. Plant analysis and interpretion of analysis for horticulture crops. In: STELLY, M. **Soil testing and plant analysis**. Madison: Ed. Soil. Sci. Soc. Amer, 1967, p. 381-392. (SSSA special publication series, 2).

KHAN, A.; RAO, L. A.; YUNUS, A. P.; GOVIL, H. Characterization of channel planform features and sinuosity indices in parts of Yamuna River flood plain using remote sensing and GIS techniques. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 17, p. 1-11, 2018. https://doi.org/10.1007/s12517-018-3876-9

LEÃO, P. C. S.; BORGES, R. M. E.; MELO, N. F.; BARBOSA, M. A. G.; LIMA, M. A. C.; FLORES, R. C.; MARQUES, A. T. B. **'BRS Tainá': nova cultivar de uvas sem sementes de cor branca para o Vale do São Francisco**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2020. p. 14.

LEÃO, P. C. S**. Avanços e perspectivas da produção de uvas de mesa no Vale do Submédio São Francisco**. Boletim Frutícola/Toda Fruta: Jaboticabal, Brazil, 2021. Disponível em: <https://www.todafruta.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Boletim-15-2021-Uva.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

LEÃO, P. C. S. **Avanços e perspectivas da produção de uvas de mesa no Vale do Submédio São Francisco.** Boletim Frutícola/Toda Fruta: Jaboticabal, Brazil, 2021. Disponível em: <https://www.todafruta.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Boletim-15-2021-Uva.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

LEÃO, P. C. S. Breve histórico da vitivinicultura e a sua evolução na região semiárida brasileira. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 7, p. 81-85, 2010.

LEÃO, P. C. S.; MAIA, J. D. G. Aspectos culturais em viticultura tropical uvas de mesa. **Informe Agropecuário**, v. 19, p. 34-39, 1998.

LEÃO, P.C.S.; POSSÍSIO, E. L. Histórico da videira. In: Leão, P.C.S. & Soares, J.M. (Org.). **A viticultura no semi–árido brasileiro**. Petrolina. Embrapa Semi–Árido, 2000. p.13–17.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

LIEBISCH, F.; KIRCHGESSNER, N.; SCHNEIDER, D.; WALTER, A.; HUND, A. Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. **Plant methods**, v. 11, n. 1, p. 1-20, 2015. https://doi.org/10.1186/s13007-015-0048-8

LISBOA, I. P.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P. P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. **Agronomy**, v. 8, n. 9, p. 196, 2018. https://doi.org/10.3390/agronomy8090196

LORENZ, D. H.; EICHHORN, K. W.; BLEIHOLDER, H.; KLOSE, R.; MEIER, U.; WEBER, E. Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (Vitis vinifera L. ssp. vinifera). **Viticulture Enology Science**. [Lubbock], v. 49, p. 66-70, 1994.

MAHAJAN, G. R.; DAS, B.; MURGAOKAR, D.; HERRMANN, I.; BERGER, K.; SAHOO, R. N.; PATEL, K.; DESAI, A.; MORAJKAR, S.; KULKARNI, R. M. Monitoring the Foliar Nutrients Status of Mango Using Spectroscopy-Based Spectral Indices and PLSR-Combined Machine Learning Models. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 641, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13040641

MAIA, J. D. G.; RITSCHEL, P. S.; CAMARGO, U. A.; SOUZA, R. T.; GROHS, D. S.; FAJARDO, T. V. M. **BRS Melodia: nova cultivar de uvas sem sementes, com sabor especial de mix de frutas vermelhas, recomendada para cultivo na Serra Gaúcha, em cobertura plástica**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e vinho, 2019. p. 22.

MAIA, J. D. G.; RITSCHEL, P.; CAMARGO, U. A.; SOUZA, R. T. S.; FAJARDO, T. V. M.; NAVES, R. L.; GIRARDI, C.L. **'BRS Vitória' Nova cultivar de uva de mesa sem sementes com sabor especial e tolerante ao míldio**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2012. p. 12.

MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Agrostat.** Disponível em: < https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 20 set. 2022.

MIELE, A.; MANDELLI, F. Sistemas de condução da videira: latada e espaldeira.In: SILVEIRA, S. V.; HOFFMANN, A.; GARRIDO, L. R. **Produção integrada de uva para processamento: implantação do vinhedo, cultivares e manejo da planta**. 1. Ed. Bento Gonçalves: Embrapa, 2015. Cap. 3, p. 41-49.

MIPHOKASAP, P.; WANNASIRI, W. Estimations of nitrogen concentration in sugarcane using hyperspectral imagery. **Sustainability**, v.10, p. 1266, 2018. https://doi.org/10.3390/su10041266

MONTORO, A.; TORIJA, I.; MAÑAS, F.; LÓPEZ-URREA, R. Lysimeter measurements of nocturnal and diurnal grapevine transpiration: Effect of soil water content, and phenology. **Agricultural Water Management**, v. 229, p. 105882, 2020. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105882

NAWAR, S.; CORSTANJE, R.; HALCRO, G.; MULLA, D.; MOUAZEN, A. M. Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. **Advances in agronomy**, v. 143, p. 175-245, 2017. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003

ORTEGA-FARIAS, S.; RIVEROS-BURGOS, C. Modeling phenology of four grapevine cultivars (Vitis vinifera L.) in Mediterranean climate conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 38-44, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.025

OSCO, L. P.; RAMOS, A. P. M.; PINHEIRO, M. M. F.; MORIYA, É. A. S.; IMAI, N.N.; ESTRABIS, N.; IANCZYK, F.; ARAÚJO, F. F. D.; LIESENBERG, V.; JORGE, L. A. D. C.; LI, J.; MA, L.; GONÇALVES, W. N.; MARCATO JUNIOR, J.; EDUARDO CRESTE, J. A machine learning framework to predict nutrient content in valencia-orange leaf hyperspectral measurements. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 906, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12060906

PREY, L.; SCHMIDHALTER, U. Simulation of satellite reflectance data using high-frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 149, p. 176-187, 2019. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.023

RITSCHEL, P.S.; MAIA, J. D. G.; CAMARGO, U. A.; SOUZA, R.T.; FAJARDO, T. V. M.; NAVES, R. L.; GIRARDI, C. L. **BRS Isis: nova cultivar de uva de mesa vermelha, sem sementes e tolerante ao míldio**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2013. p. 20.

SADRAS, V. O.; MORAN, M. A. Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 173, p. 107-115, 2013. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.003

SANTESTEBAN, L. G.; MIRANDA, C.; JIMENEZ, C.; FUENTEMILLA, M.; URRETAVIZCAYA, I.; TISSEYRE, B.; ROYO, J. B. Evaluación del interés del índice NDVI para la delimitación de unidades de manejo diferenciado en una explotación vitícola**. Revista de Teledetección**, v. 33, p. 11-16, 2010.

SIMONETTI, D. S.; ULABY, F. T. **Manual of Remote Sensing**. 2. ed. v. I. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1983. p. 930.

SOARES, J. M.; NASCIMENTO, T. Distribuição do sistema radicular da videira em vertissolo sob irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 142-147, 1998. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n02p142-147

TÁVORA, L. E. M.; CAVALCANTI, A. V. A. **Arranjo produtivo de viticultura, vinhos e derivados em Pernambuco: plano de melhoria da competitividade**. Recife: SECTI/PE, 2017. p. 156.

TERRA, M. M. Nutrição, calagem e adubação. In: POMMER, C.V. **Uva: Tecnologia de produção, pós-colheita, mercado**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2003. p. 405-476.

TIRADO, S. B.; HIRSCH, C.N.; SPRINGER, N. M. UAV-based imaging platform for monitoring maize growth throughout development. **Plant Direct**, v. 4, p. 11, 2020. https://doi.org/10.1002/pld3.230

TONIN, T. A.; MUNIZ, A. S.; SCAPIM, C. A.; SILVA, M. A. G. D.; ALBRECHT, L. P.; CONRADO, T. V. Avaliação do estado nutricional das cultivares de uva itália e rubi no município de Marialva, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, p. 63-69, 2009. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i1.3698

TÜRKER-KAYA S, HUCK CW. A Review of Mid-Infrared and Near-Infrared Imaging: Principles, Concepts and Applications in Plant Tissue Analysis. **Molecules,** v. 22, n. 1, p. 168, 2017. https://doi.org/10.3390/molecules22010168

VALEXPORT. **Valexport e a fruticultura no Vale do Sub-médio São Francisco**. PetrolinaPE: Valexport, 1998.

VITAL, T. Vitivinicultura no Nordeste do Brasil: situação recente e perspectivas. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 40, n. 3, p. 499-524, 2009.

WEN, P.; SHI, Z.; LI, A.; NING, F.; ZHANG, Y.; WANG, R.; LI, J. Estimation of the vertically integrated leaf nitrogen content in maize using canopy hyperspectral red edge parameters. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 3, p. 984-1005, 2021. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09769-5

YAO H, QIN R, CHEN X. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1443, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11121443

YE, X.; ABE, S.; ZHANG, S.; YOSHIMURA, H. Rapid and non-destructive assessment of nutritional status in apple trees using a new smartphone-based wireless crop scanner system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105417, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105417

YENGOH, G.T.; DENT, D.; OLSSON, L.; TENGBERG, A. E.; TUCKER, C. J. **The Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: A Review of the Current Status, Future Trends, and Practical Considerations**. Sweden: Springer Cham, 2014. p. 110.

ZHANG, C.; JIA, H.; ZENG, J.; PERRAIZ, T.; XIE, Z.; ZHU, X.; WANG, C. Fertilization of grapevine based on gene expression. **The Plant Genome**, v. 9, n. 3, 2016. https://doi.org/10.3835/plantgenome2015.09.0083

3. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS E DIAGNOSE NUTRICIONAL POR SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁREAS CULTIVADAS COM UVA DE MESA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

Resumo

O principal polo produtor de uva de mesa do Brasil é a região do Vale do Rio São Francisco. Na região, desequilíbrios nutricionais nas plantas são observados, resultando em queda na produção e na qualidade dos frutos. O trabalho objetivou avaliar a distribuição espacial de atributos químicos de solo em áreas cultivadas com as cultivares de uva (*Vitis vinifera*) Arra 15®, Cotton Candy® e BRS Vitória; analisar o estado nutricional das cultivares a partir dos teores de nutrientes nas folhas; investigar a capacidade de índices de vegetação obtidos por sensor remoto em se correlacionar com os teores de nutrientes nas folhas das videiras e realizar sua predição para utilização em programas de manejo de adubação. Foram coletadas 270 amostras de solos e de folhas nas áreas comerciais de três cultivares de uva. No solo, foram para determinados os teores e a variabilidade espacial dos atributos: pH, P, N, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe, Zn, Mn e cobre. Nas folhas, foram determinados N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu. Adicionalmente, por meio de um sensor foram obtidas as assinaturas espectrais e gerado o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada (GNDVI), o Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância (MCARI), o Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação Transformada (TVI) das cultivares. Em todas as áreas, os teores de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu estivaram acima do nível crítico para fertilidade do solo. Os atributos avaliados apresentaram dependência espacial fraca e moderada. As cultivares apresentaram desequilíbrios nutricionais, com teores excessivos de N, P e Cu, e deficiência de K, Ca, Zn e manganês. Para determinação do P na Arra 15®, o TVI ($r^2 = 0,31$) mostrou a melhor performance, enquanto para a Cotton Candy®, o NDVI e SAVI apresentaram a mesma eficiência ($r^2 = 0,10$). Na cultivar BRS Vitória, o NDVI e o GNDVI obtiveram os melhores ajustes em estimar o N ($r^2 = 0,24$) e o Cu ($r^2 = 0,27$) respectivamente. Nossos resultados indicaram potencial da utilização dos índices de vegetação no manejo nutricional na viticultura.

Palavras-chave: Geoestatística. Interpolação. Vitivultura.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND NUTRITIONAL DIAGNOSIS BY REMOTE SENSING OF AREAS CULTIVATED WITH TABLE GRAPE IN THE SEMIARID REGION OF BRAZIL

Abstract

The main table grape producer in Brazil is the São Francisco River Valley region. In the region, nutritional imbalances in plants are observed, resulting in a drop in production and fruit quality. The objective of this work was to evaluate the spatial distribution of soil chemical attributes in areas cultivated with the grape (*Vitis vinifera*) cultivars Arra 15®, Cotton Candy® and BRS Vitória; analyze the nutritional status of cultivars based on nutrient content in the leaves; to investigate the ability of vegetation indices obtained by remote sensor to correlate with the nutrient content in the leaves of the vines and to predict them for use in fertilization management programs. A total of 270 soil and leaf samples were collected in the commercial areas of three grape cultivars. In the soil, the contents and spatial variability of the attributes were determined: pH, P, N, K+, Ca2+, Mg2+, Fe, Zn, Mn and copper. In leaves, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn and Cu were determined. Additionally, through a sensor, the spectral signatures were obtained and generated the Normalized Difference Green Vegetation Index (GNDVI), the Modified Chlorophyll Absorption Index in Reflectance (MCARI), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and the Transformed Vegetation Index (TVI) of the cultivars. In all areas, the contents of P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn and Cu were above the critical level for soil fertility. The evaluated attributes showed weak and moderate spatial dependence. The cultivars showed nutritional imbalances, with excessive levels of N, P and Cu, and deficiency of K, Ca, Zn and manganese. For determination of P in Arra 15®, TVI (r^2 = 0.31) showed the best performance, while for Cotton Candy®, NDVI and SAVI showed the same efficiency (r^2 = 0.10). In cultivar BRS Vitória, NDVI and GNDVI obtained the best adjustments in estimating N (r^2 = 0.24) and Cu (r^2 = 0.27) respectively. Our results indicated potential use of vegetation indices in nutritional management in viticulture.

Keywords: Geostatistics. Interpolation. Viticulture.

3.1. Introdução

O Vale do São Francisco, no nordeste do Brasil, concentra cerca de 98% da produção de uva nacional, com aproximadamente 9600 ha explorados com a cultura que, devido aos fatores climáticos, a genética de cultivares e o manejo de irrigação, podem chegar a até três safras anuais (LAZZAROTTO; FIORAVANÇO, 2013; NASCIMENTO et al., 2022; SILVA et al., 2017). Na região, desequilíbrios nutricionais nas plantas têm sido observados, os quais resultam em queda no potencial de produção e na qualidade dos frutos. Neste contexto, são necessárias soluções capazes de monitorar o estado nutricional e elevar a acurácia das adubações para a cultura, evitando excessos ou deficiências.

Vários trabalhos têm demonstrado teores elevados de nutrientes em solos utilizados para a produção de uva (MENDES et al., 2014; MIRÁS-AVALOS et al., 2020; MOLOINYANE et al., 2020). Neste sentido, visando aperfeiçoar o manejo nutricional, entender a variabilidade espacial de atributos químicos do solo é essencial para otimizar recurso e maximizar a produção e qualidade dos frutos produzidos (ROSEMARY et al., 2017). A geoestatística é uma ferramenta útil para a confecção de mapas de variabilidade que podem ser utilizados no aperfeiçoamento do manejo de nutrientes. Para isso técnicas de interpolação como a krigagem ordinária são empregadas na confecção de mapas para estimativa dos atributos analisados (DUAN et al., 2020; MENDES et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2014).

A utilização de ferramentas de sensoriamento remoto com objetivo de aumentar a precisão dos manejos e possibilitar o monitoramento da saúde das culturas, tem se demonstrado eficiente (KANING et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2022). A partir de sensores multiespectrais é possível coletar informações do dossel, que por meio de combinações algébricas das bandas espectrais, geram índices de vegetação que são aplicados na avaliação da capacidade fotossintética, no monitoramento de deficiência nutricionais e na incidência de pragas e doenças (CANDIAGO et al., 2015; NAJI, 2018; HAVLIN et al., 2022).

Estudos avaliando a aplicação de índices de vegetação para o manejo nutricional da uva têm sido reportados em vários países, como China (PENG et al., 2022), Estados Unidos (MOGHIMI et al., 2022), Espanha (URRETAVIZCAYA et al., 2014) e Chile (SERRANO et al., 2017). No Brasil, entretanto, esses estudos são escassos e ausentes na região produtora do Vale do São Francisco. Adicionalmente,

a variabilidade da produção da fruta dentro dos campos de produção está ficando cada vez mais evidente, sendo necessárias investigações aprofundadas sobre o fenômeno.

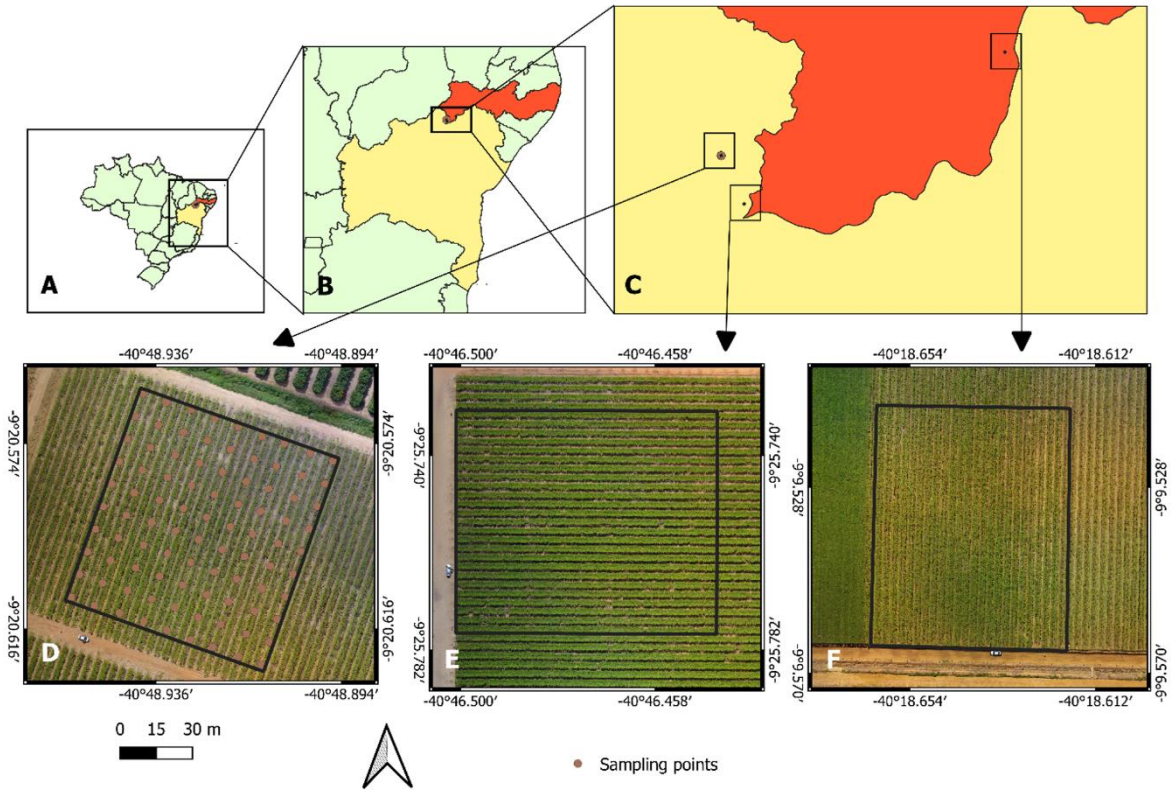
Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivos: (a) Avaliar o pH e os teores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu do solo em três áreas cultivadas com as cultivares de uva Arra 15®, Cotton Candy® e BRS Vitória; e (b) analisar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e criar mapas de distribuição dos atributos químicos no campo de produção; (c) avaliar o estado nutricional de três cultivares de uva mesa a partir dos teores de nutrientes nas folhas; (d) investigar a capacidade do índice de vegetação verde da diferença normalizada (GNDVI), do Índice de absorção de clorofila modificado na reflectância (MCARI), do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e do índice de vegetação transformado (TVI) em se correlacionar com os teores de nutrientes nas folhas das videiras e sua capacidade de predição para utilização em programas de manejo de adubação na viticultura.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Descrição do local, solo e dados meteorológicos

A investigação foi realizada entre abril e junho de 2021 nas Fazendas Santa Felicidade, Casa Nova/BA, e Nova Neruda, Petrolina/PE, Brasil (Figura 1). Durante o trabalho, a temperatura na região variou entre 21,5 e 33 ºC, a umidade média foi de 51%, ocorreu precipitação de 309 mm, a evapotranspiração foi de 260,8 mm e a radiação solar variou entre 18,5 a 21,0 MJ m^{-2}. Foram avaliadas áreas de cultivo comercial de uva (*Vitis vinifera*), respectivamente, com três das principais cultivares plantadas na região: Arra15® (-9° 20.574', -40° 48.950'), BRS Vitória (-9° 25.754', -40° 46.450') e Cotton Candy® (-9° 9.570', -40° 16.612').

Figura 1 – Localização das áreas alvo das videiras e distribuição dos pontos de amostragem. A: Brasil; B: Estados de Pernambuco (vermelho) e da Bahia (amarelo); C: Localização das áreas; D: Área da cultivar Arra 15®; E: Área da cultivar BRS Vitória; e F: Área da cultivar Cotton Candy®



As áreas experimentais compreenderam válvulas de produção com 952 plantas, com espaçamento de 3,5 x 3,0 m. As plantas da variedade Arra 15® e da cultivar Cotton Candy®, respectivamente, com quatro e três anos de idade, eram cultivadas em sistema tipo latada. A cultivar Vitória tinha cinco anos de implantação e era conduzida em sistema tipo espaldeira trellis. As amostras foram coletadas no início do florescimento das cultivares, correspondente a 40 dias após a poda. Os cultivos eram fertirrigadas e apresentavam produtividade média de 15 ton ha^{-1} (BRS Vitória) e 25 ton ha^{-1} (Arra 15® e Cotton Candy®).

Os solos das áreas experimentais foram classificados como Argissolo amarelo no cultivo da Arra 15® e Cotton Candy®, e Neossolo quartzarênico sob cultivo da uva Vitória (SANTOS et al., 2018). A camada de 0-20 cm avaliada dos solos apresentou textura de areia franca para os Argissolos e areia para o Neossolo (Tabela 1).

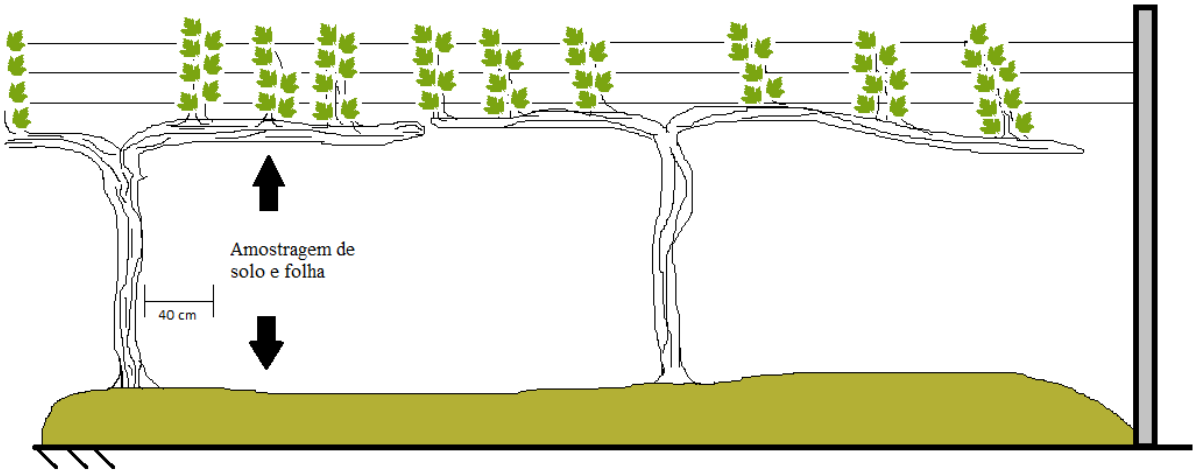
Tabela 1 - Classes de solo e teores médios de areia, silte e argila das áreas experimentais

Cultivar	Classe de solo	Areia	Silte	Argila
		----------g kg^{-1}----------		
Arra 15®	Argissolo Amarelo	867	88	45
Cotton Candy®	Argissolo Amarelo	813	122	65
BRS Vitória	Neossolo Quartzarênico	907	58	35

3.2.2. Amostragem de solo e análise

Para a amostragem de solo foi adotada uma grade regular de 10 x 10 m dentro da válvula de produção de cada cultivar que apresentava aproximadamente 1 hectare e 23 linhas de cultivo. Em cada ponto de cruzamento da grade foi coletada uma amostra de solo na profundidade de 0-20 cm, a 40 cm do caule da planta, totalizando 90 amostras simples para cada área de cultivar avaliada. Os pontos de amostragem, georreferenciados com auxílio de equipamento GNSS (GPS Garmin eTrex) e coincidiram com as linhas de plantio dada a aplicação de fertilizantes localizada no bulbo úmido (Figura 2).

Figura 2 – Esquema de localização do ponto amostral em relação a planta



As amostras foram levadas ao laboratório, secadas ao ar, homogeneizadas e peneiradas em malha de 2.0 mm para a caracterização química.

As amostras de solo foram quimicamente caracterizadas conforme métodos padrão (Embrapa, 2017). O pH foi determinado em água na relação de 1:2,5 solo/água. Os teores disponíveis de P e K^+ foram obtidos por meio do extrator Mehlich-1 e analisados por colorimetria (P) e fototometria de chama (K). As bases trocáveis

Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídas com a solução de 1 mol L^{-1} KCl e determinadas por compleximetria e titulação. O carbono orgânico do solo foi obtido pelo método Walkley-Black de oxidação pelo ácido crômico. O teor total de N foi obtido a partir do extrato da digestão sulfúrica pelo método Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). Os teores disponíveis de micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu) foram extraídos com DTPA e determinados por meio de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

3.2.3. Amostragem de folha e análise

A coleta de amostras de folhas da cultivar Arra 15® foi realizada em abril e da BRS Vitória e Cotton Candy® em junho de 2021. Foi adotada uma grade regular de amostragem de 10 x 10 m em cada área experimental, a qual compreendeu amostras de 10 linhas de cultivo, desconsiderando 10 m de bordadura. Cada ponto de cruzamento da grade foi georreferenciado, com receptor GNSS (GPS Garmin eTrex), e neles foram coletadas dez folhas completas, sadias, recém-maduras e opostas ao primeiro cacho nos ramos frutíferos, as quais compuseram amostras compostas que totalizaram 90 para cada área avaliada. As amostras de folhas foram lavadas em água corrente, submetidas a uma tripla lavagem com água destilada, secas em estufa (Solab SL 102/42) a 65 ºC por 72 h e trituradas em moinho tipo Wiley (Tecnal TE-648).

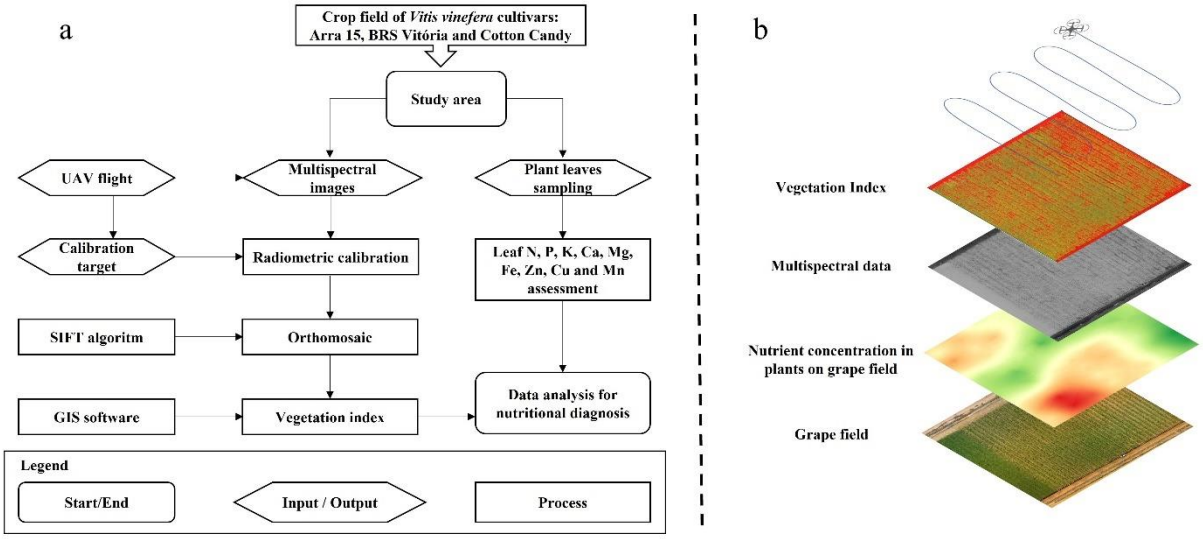
Os teores de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn foram determinados nos extratos de digestão das amostras das folhas com a solução de $HClO_4$ + HNO_3 (1: 3 v/v) em bloco de digestão a 200 ºC. Os teores de P, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn na planta foram determinados por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado (ICP – OES Perkin Elmer 7000 DV). A determinação de K foi realizada por fotometria de chama. O teor de N foi obtido pela digestão de 0,2 g do material vegetal em ácido sulfúrico concentrado a 350ºC, de acordo com o método de Kjeldahl (Silva et al., 2009).

O controle de qualidade analítico utilizou amostras em branco e material de referência certificado SRM 1570a (Spinach Leaves) do National Institute of Standards and Technology (NIST). A recuperação dos elementos no material de referência variou de 77% a 88%.

3.2.4. Aquisição e processamento de dados por sensoriamento remoto

O fluxograma da metodologia utilizada para aquisição e processamento dos dados baseou-se em trabalho de Nascimento et al. (2022), o qual utilizou um sensor embarcado em VANT para avaliar nutrientes a partir do dossel vegetal (Figura 3).

Figura 3 – (a) Fluxograma da metodologia utilizada no estudo e (b) processo geral de geração de dados.



3.2.5. Aquisição de dados aéreos

Os levantamentos aéreos para obtenção das assinaturas espectrais das cultivares foi realizado por meio do VANT quadricóptero Phantom® 4 (SZ DJI Technology Co., Ltd, Shenzhen, China) equipado com o sensor multiespectral MAPIR® Survey 3W (MAPIR, San Diego, EUA). O sensor MAPIR® apresenta campo de visão (FOV) de 87° e captura imagens correspondentes a três bandas do espectro, referentes ao vermelho em 660 nm, verde em 550 nm e infravermelho próximo (NIR) em 850 nm. Cada imagem capturada recebeu uma geo-tag com a respectiva localização geográfica, obtida a partir de um receptor GNSS que acompanha a câmera.

Visando padronizar a captura de imagens, as missões de voo do VANT ocorreram de forma automatizada seguindo planos gerados pelo aplicativo DroneDeploy® (DroneDeploy, San Francisco, USA), cujos parâmetros foram: 3 m s^{-1} de velocidade da aeronave, 1.5 s de intervalo de captura de imagem, 70 m de altitude,

sobreposição frontal (overlap) de 80% e lateral (sidelap) de 75%, e distância de amostragem de chão (GSD) de aproximadamente 3 cm pixel^{-1}. Os voos foram realizados entre 10h e 14h, considerando o período de maior incidência de luz solar, menor presença de nuvens e baixa intensidade do vento.

3.2.6. Processamento de dados aéreos e índices de vegetação

As imagens multiespectrais Raw armazenadas em formato TIFF foram exportadas ao software MAPIR® Camera Control para correção radiométrica a partir de valores de refletância do alvo de calibração MAPIR®, obtidos em cada voo. Posteriormente, as imagens foram processadas no software Agisoft Metashape v1.5.2 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) que utiliza o algoritmo computacional Scale Invariante Feature Transform (SIFT) para detecção de feições idênticas em diferentes ângulos de visada de fotografias aéreas (LOWE, 1999). A partir desse software foram gerados a nuvem de pontos, o modelo digital de superfície e os ortomosaicos. No software Quantum GIS v3.14.16 (QGIS Development Team, www.qgis.org), os ortomosaicos foram cortados com base nos arquivos vetoriais (shapefile) das parcelas no campo, selecionando as áreas de interesse e evitando efeito de borda sobre os pixels. Para extração da assinatura espectral, em cada ponto do grid de amostragem de folha, foram obtidos os valores da média ponderada da reflectância em um total 237.968 pixels e as informações foram utilizadas para o cálculo dos índices de vegetação (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices de vegetação selecionados para o presente estudo

Índice de vegetação	Fórmula	Referência
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	(NIR − R) / (NIR + R)	(ROUSE et al.,1973)
Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	(NIR − G) / (NIR + G)	(GITELSON et al., 1996)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	$[2.5 * (\mathrm{NIR} - \mathrm{R}) - 1.3 * (\mathrm{NIR} - \mathrm{G})] * 1.2$	(HABOUDANE et al., 2004)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*	$[(\mathrm{NIR} - \mathrm{R})/(\mathrm{NIR} + \mathrm{R} + \mathrm{L})] * (1 + \mathrm{L})$	(BANNARI et al., 1995)
Transformed Vegetation Index (TVI)	$\sqrt{(\mathrm{NIR} - \mathrm{R})/(\mathrm{NIR} + \mathrm{R})} + 5$	(DEERING et al.,1975)

*O fator de ajuste L para o SAVI utilizado neste estudo foi de 0,5 (cobertura vegetal intermediária); G, R e NIR representam a reflectância espectral vegetal das bandas verde, vermelha e infravermelha próxima extraídas das imagens multiespectrais de VANT

3.2.7. Análise estatística e geoestatística

Os dados foram avaliados por meio de análise descritiva e multivariada no software SPSS (IBM). Foram calculados o valor máximo, o valor mínimo, a média, a mediana, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Foi realizada a identificação e remoção de outliers, considerando-se atípicos os valores encontrados além de três vezes o intervalo interquantílico no gráfico Box Plot. O coeficiente de variação (cv) foi avaliado segundo Warrick e Nielsen (1980), que o classificam como baixo quando inferior a 12 %, médio entre 12 e 60 %, e alto quando está acima de 60 %.

A determinação da variabilidade espacial foi realizada por meio da obtenção de semivariogramas empíricos estimados pela teoria da hipótese intrínseca, que assume que as medidas separadas por pequenas distâncias são mais semelhantes umas às outras que aquelas separadas por distâncias maiores (OLIVEIRA et al., 2013). Os semivariogramas foram estimados pela equação:

$$\hat{y}\,(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N\,(h)} [Z(xi + h)]^2$$

em que: $\hat{y}\ (h)$ - valor da semivariância para uma distância h; $N\ (h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(xi)$ - valor do atributo Z na posição xi; e $Z(xi+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste matemático do semivariograma foram obtidos os coeficientes do modelo efeito pepita, C_0; a variância estrutural, C_1; o patamar, $C_0 + C_1$; e o alcance: a. Utilizou-se o exame de semivariogramas do programa GS+ (ROBERTSON, 1998) para a determinação da existência ou não da dependência espacial e o modelo foi escolhido de acordo com o maior R^2 (coeficiente de determinação).

O grau de dependência espacial (SDC) foi avaliado pela classificação de Cambardella et al. (1994), em que valores de [(C0 / (C0+C1) * 100] menores que 25 % são considerados dependência espacial forte, entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores de maiores que 75 % apontam dependência espacial fraca.

Para os atributos que apresentaram dependência espacial, mapas de isolinhas foram confeccionados utilizando os parâmetros ajustados dos semivariogramas experimentais por meio da técnica da Krigagem ordinária no software QGis 3.18.

Os dados de reflectância do dossel foram submetidos à análise de correlação e regressão para avaliação da capacidade preditiva desses índices nos teores foliares dos nutrientes.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Características químicas dos solos

Os macronutrientes P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e N apresentaram teores mais altos na área cultivada com Cotton Candy® (Tabela 3). No solo sob cultivo da BRS Vitória foram observados os valores mais altos dos micronutrientes Fe, Zn, Mn e Cu.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo, na profundidade de 0 - 20 cm, de áreas cultivadas com três cultivares de *Vitis vinifera* no Vale do São Francisco, Brasil

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	SD	CV
			Cotton Candy®			
pH	6,78	6,88	5,60	7,53	0,42	6,19
P (mg dm^{-3})	406,53	368,33	99,88	898,86	190,35	46,82
K^+ (cmolc dm^{-3})	1,07	1,10	0,33	2,45	0,49	46,06
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	7,18	7,11	2,74	12,10	1,80	25,06
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	2,80	2,74	0,54	6,91	1,40	50,00
N (g kg^{-1})	2,89	3,02	0,11	5,82	1,04	35,98
Fe (mg kg^{-1})	138,91	133,85	27,04	284,90	52,22	37,59
Zn (mg kg^{-1})	44,03	43,15	8,52	87,45	18,07	41,04
Mn (mg kg^{-1})	29,47	28,97	11,89	66,50	10,27	34,84
Cu (mg kg^{-1})	17,04	16,76	1,64	37,81	7,27	42,66
			BRS Vitória			
pH	7,45	7,42	4,79	10,66	1,13	15,16
P (mg dm^{-3})	222,03	180,23	31,59	672,15	158,34	71,31
K^+ (cmolc dm^{-3})	0,84	0,71	0,13	2,49	0,61	72,97
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	4,55	4,49	1,73	9,50	1,55	34,06
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	0,76	0,68	0,05	1,93	0,51	67,10
N (g kg^{1})	1,43	1,37	0,17	2,41	0,48	33,56
Fe (mg kg^{-1})	143,86	137,85	31,97	381,62	75,80	52,68
Zn (mg kg^{-1})	18,17	16,75	3,89	52,84	9,69	53,50
Mn (mg kg^{-1})	26,36	23,94	8,70	59,60	10,75	40,83
Cu (mg kg^{-1})	4,24	4,03	1,36	9,82	1,75	41,23
			Arra15®			
pH	6,17	6,17	5,15	6,97	0,34	5,67
P (mg dm^{-3})	81,36	73,97	32,07	167,19	33,63	41,33
K^+ (cmolc dm^{-3})	0,67	0,67	0,37	0,99	0,14	21,03
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	3,54	3,54	1,67	5,46	0,80	22,59
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	1,84	1,87	0,27	3,08	0,51	27,71
N (g kg^{-1})	1,47	1,40	0,56	2,63	0,44	29,93
Fe (mg kg^{-1})	183,40	173,10	69,80	346,50	65,80	35,68
Zn (mg kg^{-1})	23,72	22,67	6,70	47,94	10,43	43,97
Mn (mg kg^{-1})	48,98	46,74	22,30	88,25	15,51	31,66
Cu (mg kg^{-1})	6,08	5,97	2,77	11,11	1,70	27,86

SD = desvio padrão; CV = coeficiente de variação;

De acordo com as faixas de classificação e interpretação dos atributos químicos do solo para fins de fertilidade compilados de diversos autores (Tabela 4), o pH do solo sob Cotton Candy® e BRS Vitória foi classificado como alto e do solo com Arra 15®, como adequado. Adicionalmente, todos os nutrientes avaliados tiveram teores

enquadrados na faixa de classificação alta. Em especial, os teores de P se apresentaram 4, 10 e 20 vezes acima do nível crítico, respectivamente, no solo da Arra 15®, da BRS Vitória e da Cotton Candy®. Os teores de K^+ foram 238% (Cotton Candy®), 188% (BRS Vitória) e 150% (Arra 15®) superiores ao nível crítico para esse nutriente. Com relação ao Ca^{2+}, os teores para a área da Cotton Candy® e BRS Vitória foram, em média 1,5 vez, superiores ao nível crítico. Os teores de Mg^{2+} estiveram 1,8 vez acima do limite crítico para o solo cultivado com Cotton Candy® e Arra15®.

Tabela 4 - Faixas de interpretação de atributos químicos do solo para fins de fertilidade

Atributo	Baixo	Adequado	Alto	Referências
pH	< 5,5	5,5 – 6,5	> 6,5	Malavolta (1989)
	Baixo	Médio	Alto	
P (mg dm^{-3})	< 11	12 – **20***	> 21	Cavalcanti (2008)
K^+ (cmolc dm^{-3})	<0,15	0,15 – **0,45***	> 0,45	Cavalcanti (2008)
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	< 1,6	1,6 – **3,0***	> 3,0	Sobral et al. (2015)
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	< 0,4	0,4 – **1,0**	> 1,0	Sobral et al. (2015)
Fe (mg kg^{-1})	0 - 33	34 – **99***	> 100	Adaptado de Raij et al. (1997)
Zn (mg kg^{-1})	0 – 4	4 – **9***	> 10	Adaptado de Raij et al. (1997)
Mn (mg kg^{-1})	0 – 9	10 – **41***	> 42	Adaptado de Raij et al. (1997)
Cu (mg kg^{-1})	0 – 2	3 – **7***	> 8	Adaptado de Raij et al. (1997)

* Nível crítico de nutrientes no solo.

Na área com a cultivar Cotton Candy® foi verificado que os teores de Cu, Fe, Mn e Zn se apresentaram 2, 1,3, 1,5 e 5 vezes superiores aos limites críticos. Sob BRS Vitória, foram observados teores de Fe e Zn, respectivamente, 1,4 e 1,8 vez acima da faixa crítica. Na cultivar Arra 15®, com exceção do Cu, cujo teor se enquadrou a faixa adequada, o Fe (180%), o Zn (200%) e Mn (120%) estiveram acima do nível crítico. Teores excessivos de nutrientes em solos cultivados com uva têm sido reportados no Brasil e em outros países (TEIXEIRA et al., 2011; SANTOS et al., 2019; ZHAO et al., 2019; XUE et al., 2020; GATTI et al., 2020). Considerando que os teores dos atributos estão acima dos níveis críticos para a fertilidade do solo, nossos resultados podem indicar possível excesso na adubação. Esse excesso pode levar à poluição do solo e corpos hídricos, assim como prejuízos financeiros, principalmente com relação a adubação fosfatada, cujos teores estão muito elevados nas áreas avaliadas.

O coeficiente de variação (CV) apresentou amplitude de 5.67% a 72.97% (Tabela 2). Conforme a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), o CV na área da Cotton Candy® e Arra15® foi baixo para o pH e moderado para os demais atributos avaliados. No solo cultivado com uva BRS Vitória, o CV do pH foi baixo, do Ca, do N, do Mn e do Zn foi moderado, e para os demais nutrientes foi alto. O CV é um indicador da heterogeneidade dos dados, de modo que quanto menor o seu valor mais homogêneo é o atributo no campo (FROGBROOK et al., 2002; SILVA et al., 2020).

Semelhantemente, outros autores têm observados baixos CV para o pH e moderados a altos para os demais atributos químicos do solo (BOTTEGA et al., 2013; USOWICZ; LIPIEC, 2017; SONG et al., 2020). De acordo com Reza et al. (2016), a baixa variabilidade do pH é explicada por essa variável ser uma escala logarítmica da concentração de prótons no solo, de modo que o CV seria maior caso a acidez fosse expressa em termo de concentração direta. De outro modo, os altos CV dos demais atributos químicos do solo estão relacionados a alterações provocadas pelas adubações excessivas.

3.3.2. Distribuição espacial de atributos químicos do solo

O P, o Cu e o Mn nas áreas da cultivares Arra 15® e Cotton Candy®, e o Ca^{2+} no solo sob BRS Vitória não apresentaram variação espacialmente estruturada, ou seja, para esses atributos houve efeito pepita puro (Tabela 5). O efeito pepita puro ocorre quando C_0 (efeito pepita) é igual a $C_0 + C_1$ (patamar), neste caso a variabilidade não é explicada, estando o atributo distribuído de forma aleatória. Adicionalmente, este efeito pode ocorrer quando a distância amostragem não foi suficiente para detectar a dependência espacial (AQUINO et al., 2014A).

Tabela 5 - Modelos e parâmetros estimados de semivariogramas de atributos químicos do solo, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, em áreas cultivadas com três cultivares de *Vitis vinifera* no Vale do São Francisco no Brasil

Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	Alcance	$C_0/ C_0 + C_1$	SDC
			Cotton Candy®			
pH	Exp	0,0455	0,1840	14,70	0,22	Forte
P (mg dm^{-3})	Exp	3700	35980	19,80	0,89	Fraca
K (cmolc dm^{-3})	Exp	19240	38490	34,2	0,50	Moderada
Ca (cmolc dm^{-3})	Exp	0,03	3,199	18,9	0,99	Fraca
Mg (cmolc dm^{-3})	Exp	0,74	1,95	13,8	0,90	Fraca
N (g mg^{-1})	Sph	0,03	1,117	17,6	0,97	Fraca
Fe (mg kg^{-1})	Exp	191,00	2674	15,0	0,88	Fraca
Zn (mg kg^{-1})	Sph	147,00	329,40	12,7	0,55	Moderada
Mn (mg kg^{-1})	Sph	49,30	106,10	14,80	0,53	Moderada
Cu (mg kg^{-1})	-	-	-	-	-	-
			BRS Vitória			
pH	Exp	0,43	1,30	24,00	0,67	Moderada
P (mg dm^{-3})	-	-	-	-	-	
K (cmolc dm^{-3})	Exp	0,35	0,72	26,40	0,50	Moderada
Ca (cmolc dm^{-3})	-	-	-	-	-	
Mg (cmolc dm^{-3})	Exp	0,009	0,11	15,60	0,92	Fraca
N (g mg^{-1})	Sph	0,09	0,23	21,20	0,62	Moderada
Fe (mg kg^{-1})	Exp	0,07	0,29	21,30	0,74	Moderada
Zn (mg kg^{-1})	Exp	0,11	0,35	30,30	0,78	Fraca
Mn (mg kg^{-1})	-	-	-	-	-	
Cu (mg kg^{-1})	Sph	28,27	271,80	18,50	0,67	Fraca
			Arra15®			
pH	Sph	0,06	0,12	48,20	0,50	Moderada
P (mg dm^{-3})	PNE	-	-	-	-	
K (cmolc dm^{-3})	Exp	229,00	3028,00	13,50	0,92	Fraca
Ca (cmolc dm^{-3})	Exp	0,227	0,66	14,70	0,65	Moderada
Mg (cmolc dm^{-3})	Sph	0,13	0,28	13,20	0,93	Fraca
N (g mg^{-1})	Exp	0,01	0,20	17,40	0,90	Fraca
Fe (mg kg^{-1})	Exp	160,00	4107	22,50	0,96	Fraca
Zn (mg kg^{-1})	Gau	66,20	145,30	101,67	0,54	Moderada
Mn (mg kg^{-1})	PNE	-	-	-	-	
Cu (mg kg^{-1})	PNE	-	-	-	-	

pH: reação do solo; N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Cu: Cobre; Mn: Manganês; Fe: Ferro; Zn: Zinco. PNE: Efeito pepita puro; Exp: Exponencial; Sph: Esférico; Gau: Gaussiano.

No solo sob Cotton Candy®, o melhor modelo ajustado foi o exponencial para pH, P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e Fe, e o esférico para N e manganês. Na área da cultivar BRS Vitória, os semivariogramas apresentaram ajuste para os modelos exponencial (pH,

K, Mg, Fe, Zn) e esférico (N e Cu) (Tabela 6). Os atributos do solo cultivado com a Arra 15® apresentaram semivariogramas ajustados aos modelos exponencial para K, Ca, N e Fe, esférico para o Mg e gaussiano para o zinco.

Semelhante aos resultados do presente estudo, Zeraatpisheh et al. (2022), avaliando a variabilidade espacial de atributos do solo para delimitação de zonas de manejo, observaram modelos esféricos e exponenciais ajustados aos seus dados. Da mesma maneira, Marques Júnior et al. (2015) observaram a predominância do modelo esférico nos ajustes do semivariogramas em estudos com atributos químicos do solo. Os modelos esférico e exponencial são transitivos, visto que com determinada distância apresentam um patamar, a partir do qual o atributo não apresenta dependência espacial, se comportando de maneira aleatória (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Adicionalmente, esses modelos se apresentam como os mais comuns para estudo dos atributos do solo e das plantas (MONTOMIYA et al., 2011; LIMA et al., 2013; AQUINO et al., 2014B).

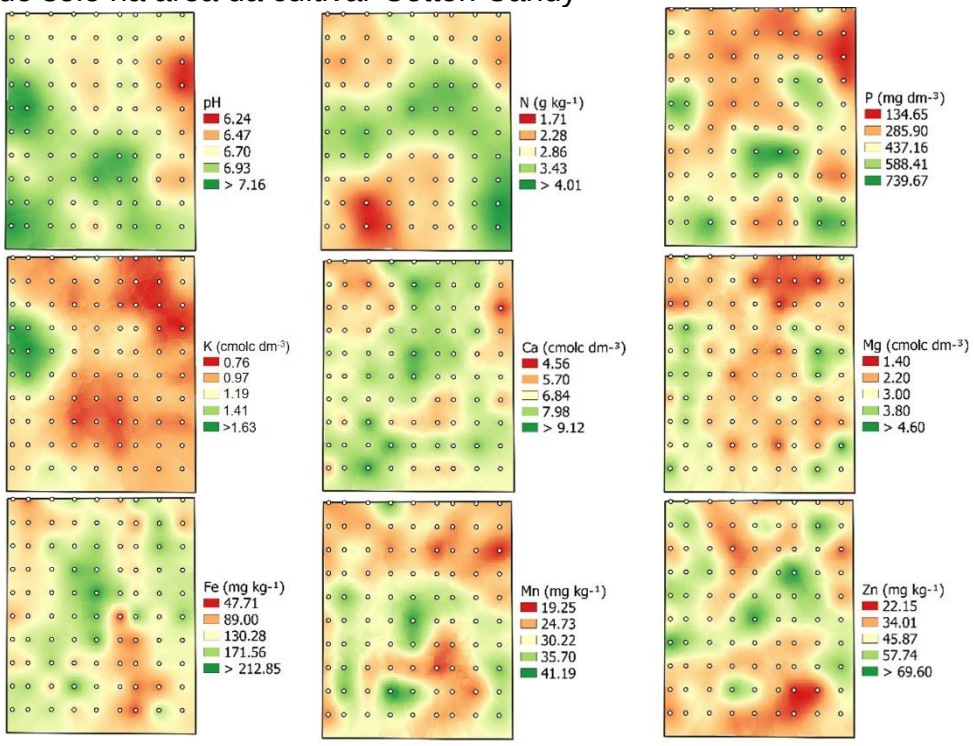
Na área com a uva Cotton Candy®, o alcance estimado teve valor mínimo de 12,70 m (Zn) e máximo de 34,20 m (K) (Tabela 6). Para a área com BRS Vitória, o menor valor de alcance foi observado para o Cu (18,50 m) e o maior para o Zn (30,30 m). Sob cultivo da Arra15, o alcance dos atributos variou de 13,20 (Mg) a 101,67 m (Zn). O alcance é o parâmetro utilizado na definição do raio até onde regiões não amostradas podem ter seus atributos estimadas (ZERAATPISHEH et al., 2022). Nossos resultados demonstraram que para 46% dos atributos avaliados no presente estudo, o alcance foi menor que 20 m, ou seja, próximo da distância de amostragem, o que pode indicar elevada interferência do manejo sobre a variabilidade dos atributos, visto que acima do valor de alcance as variáveis variam de forma aleatória.

Com exceção do pH na área com a uva Cotton Candy® que apresentou SDC forte, os demais atributos nas três áreas avaliadas apresentaram dependência espacial fraca (40%) a moderada (33,33%) (Tabela 6). Semelhantemente, outros autores têm reportado em estudos da variabilidade espacial com os mesmos atributos, estruturas de dependência espacial fraca a moderada em áreas com cereais (USOWICS; LIPIEC, 2017), com soja (MONDO et al., 2012), com arroz (ROSEMARY et al., 2017) e com milho (VASU et al., 2017). Os atributos cuja dependência espacial é classificada como forte são aqueles mais afetadas pelas características intrínsecas do solo, como o material de origem; por outro lado, aqueles com dependência moderada a fraca são mais suscetíveis a influências do manejo do solo como as

adubações, correções e revolvimento (CAMBARDELLA et al., 1994). Os atributos avaliados no presente trabalho podem ter seus teores constantemente alterados pelas adubações realizadas no campo, o que além de outras variáveis do manejo cultural podem implicar na baixa continuidade na distribuição no solo e, consequentemente, na fraca estrutura de dependência espacial.

Utilizando os parâmetros ajustados dos semivariogramas, os mapas de distribuição espacial dos atributos químicos do solo, para as áreas de três cultivares de uva, foram produzidos por meio da técnica de krigagem ordinária nos casos em que ocorreu dependência espacial (Figura 4). Por meio da análise visual, foi verificado que a distribuição dos nutrientes segue o padrão de comportamento espacial do pH, Ca e Mn no solo. Na área da Cotton Candy®, observa-se que na região superior dos mapas os teores mais baixos para a maioria dos nutrientes, ao contrário da região central e inferior com teores mais elevados (Figura 4). Destaca-se nessa área que a região superior corresponde ao final das linhas de fertirrigação, portanto, por ter menor pressão, ocorre a aplicação de menores doses dos fertilizantes.

Figura 4 - Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar Cotton Candy®



Na área da BRS Vitória, localizada no meio da válvula de produção, não foi possível observar o efeito do final das linhas de fertirrigação nos teores dos nutrientes

(Figura 5). Nesta área observou-se que os nutrientes apresentaram teores disponíveis mais elevados na região superior dos mapas, fato que pode estar relacionado aos valores de pH mais baixos e equilibrados. Adicionalmente, os mapas podem indicar a distribuição irregular de fertilizantes, realizada por linhas de fertirrigação que iniciavam da região lateral esquerda para a direita, visto que a região inferior dos mapas apresentou teores mais baixos dos nutrientes.

Figura 5 - Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar BRS Vitória

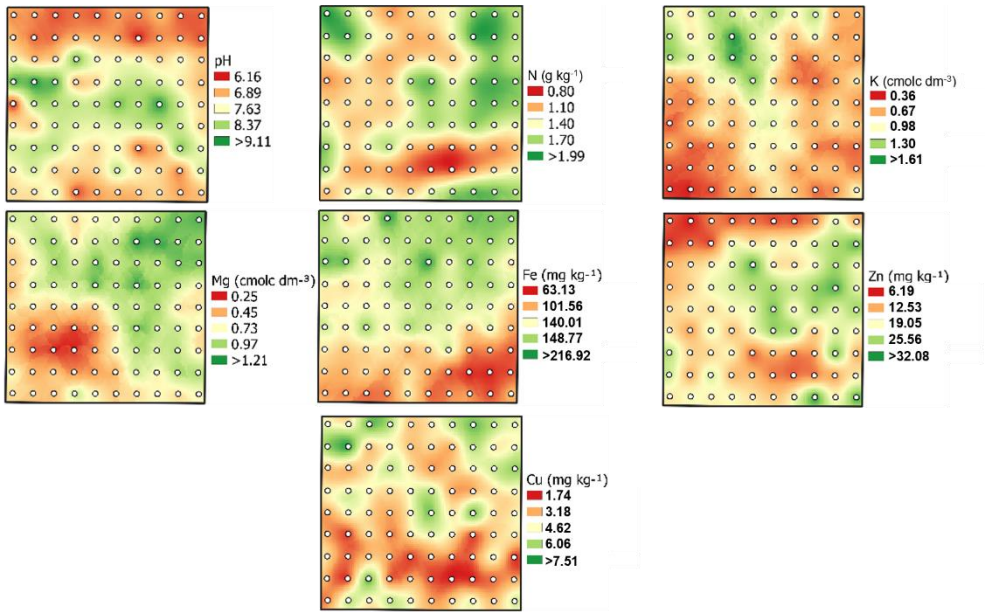
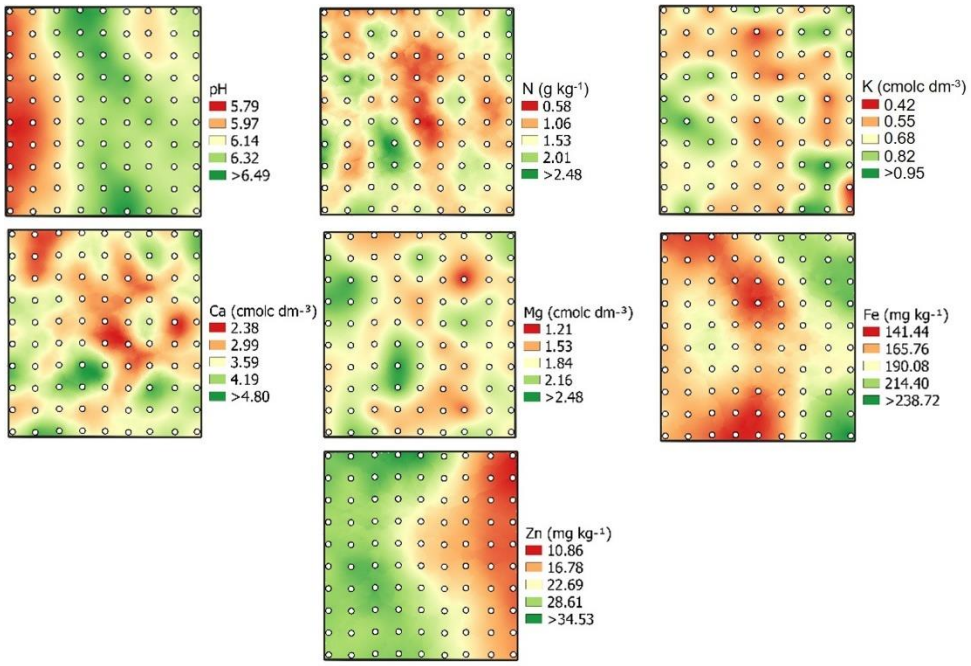


Figura 6 - Mapas de distribuição espacial de pH; N total; P disponível; K disponível; Ca trocável; Mg trocável; Fe trocável; Mn trocável; Zn trocável; na profundidade de 0 - 20 cm do solo na área da cultivar Arra 15®



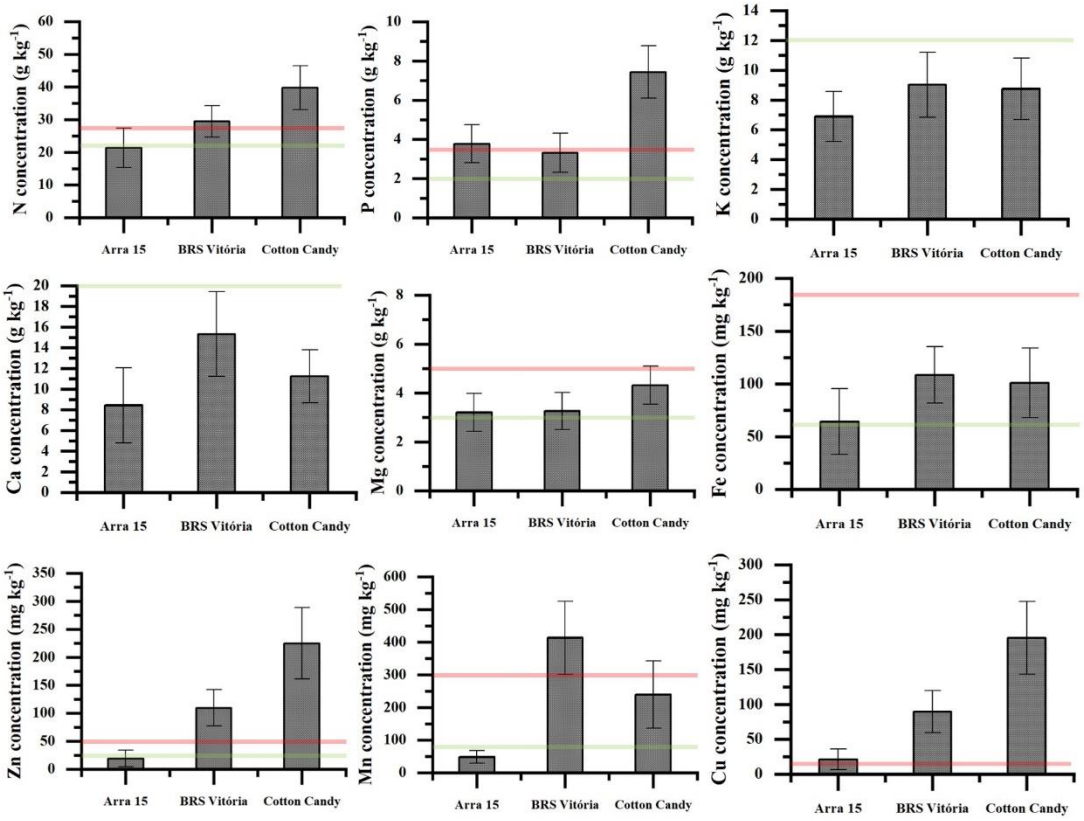
Na observação dos mapas, chama a atenção a heterogeneidade da distribuição dos atributos no campo, caso que vai de encontro com o manejo de adubação da cultura com a fertirrigação, onde se espera distribuição uniforme de fertilizantes. Adicionalmente, há predominância de “bull’s eye” nos mapas que evidencia zonas com teores mais elevados, apontando provável baixa performance no sistema de adubação. A amplitude nos teores dos atributos químicos também revela problemas quando se utiliza a média dos valores para o manejo da fertilidade, acarretando excesso de aplicação de fertilizante em algumas áreas e dosagem inferior à necessária em outros.

3.3.3. Teor de nutrientes nas plantas

A cultivar Cotton Candy® teve os maiores teores para 55% dos elementos avaliados (N, P, Mg, Zn e Cu), seguida da BRS Vitória e com valores mais baixos a Arra 15® (Figura 7). Este resultado está em consonância com os teores observados em solo, visto que o Argissolo Amarelo sob Cotton Candy® presentaram os maiores teores disponíveis dos macros e micronutrientes. Foi observado na Arra 15® que a

ordem de concentração dos nutrientes nas folhas foi N>Ca>K>P>Mg>Fe>Mn>Cu>Zn, na BRS Vitória e Cotton Candy® a ordem foi N>Ca>K>P>Mg>Mn>Zn>Fe>Cu.

Figura 7 - Concentração média (±desvio padrão) de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e) em folhas das cultivares de uva Arra 15®, BRS Vitória e Cotton Candy® cultivadas no Vale do São Francisco no Brasil. As linhas verdes e vermelhas são respectivamente o limite inferior e superior da faixa ótima de concentração de cada nutriente para a cultura da uva.



Os teores dos nutrientes nas folhas foram comparados com os valores de referência propostos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para a viticultura no Vale do São Francisco em amostras de folha inteira na fase de floração (FARIA; SILVA; PEREIRA, 2004). Nossos resultados demonstram que os valores de N, P e Cu estão em excesso. Especificamente, na Cotton Candy® foram observados teores 140% (N), 200% (P) e 1000% (Cu) acima do valor superior da faixa ótima. Ainda na faixa excessiva, os teores de Zn foram 2 e 4 vezes superiores ao limite ótimo nas cultivares BRS Vitória e Cotton Candy®, respectivamente.

De outro modo, os teores de Mg e Fe em todas as cultivares se enquadraram nas respectivas faixas ótimas de 3,0 a 5,0 g kg^{-1} e de 60 a 180 mg kg^{-1} para a cultura. Teores enquadrados na faixa deficiente foram observados para os nutrientes K e Ca

em todas as cultivares. Adicionalmente, na Arra 15®, os teores de Zn e Mn também estiveram abaixo das respectivas faixas ótimas de 25 a 50 mg kg^{-1} e de 80 a 300 mg kg^{-1}, sendo a única cultivar que apresentou deficiência para micronutrientes.

Semelhante aos nossos resultados, Karimi et al. (2021), avaliando o efeito da aplicação de óleo mineral em combinação com fertilizantes na nutrição da videira, observaram teores de fósforo 10% acima do nível ótimo. Em estudo avaliando agentes antioxidantes em cinco cultivares de uva, Kőrösi et al. (2019) observaram teores de P em média 2,4 vezes superiores aos valores de referência para o desenvolvimento ótimo da cultura. Em avaliação da aplicação de fertilizante foliar sobre a qualidade de frutos de uva da cultivar Kyoho, Ma et al. (2019) observaram teores de Cu até 11 vezes superiores ao limite ótimo devido ao uso de fungicida. Em estudo analisando a variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes em videiras no Vale do São Francisco da cultivar Sugraone, Mendes, Silva e Bassoi (2014) observaram teores de N, P e Cu, respectivamente, 120%, 206% e 425% superiores ao limite ótimo.

As adubações excessivas são comuns na viticultura e o uso de fungicidas cúpricos é uma prática recorrente para o manejo da cultura, de modo que teores de nutrientes acima dos limites críticos são comumente reportados. No presente trabalho, os teores deficientes de K e Ca podem estar relacionados ao seu antagonismo com o Cu, o qual apresenta-se em excesso nas cultivares. O antagonismo entre esses elementos é devido ao fato de no processo ativo de transporte de nutrientes nas plantas, a afinidade de ligação dos elementos metálicos nos componentes orgânicos de metaloproteínas e transportadores de metal seguir a ordem da série de Irvning-Williams, a qual demonstra de que o Cu^{2+} é ligado preferencialmente comparado ao Ca^{2+} e K^{+} (YRUELA, 2009; LIU et al., 2021).

A deficiência de Zn e Mn pode estar relacionada ao excesso de fósforo na Arra 15®. Em condições de alta disponibilidade de P no solo, pode ocorrer a precipitação de Zn como fosfato de zinco, impedindo sua absorção pelas plantas (MALAVOLTA et al., 1997). Adicionalmente, estudos apontam que a expressão de proteínas que controlam o transporte de P na planta possuem o Zn como co-fator, de modo que, quando o metal está deficiente, o vegetal pode absorver o macronutriente em quantidades excessivas (BOUAIN et al., 2014; RIETRA et al., 2017). Por outro lado, os teores mais baixos dos micronutrientes podem estar relacionados ao efeito de diluição, os quais decorrem da alta produção da biomassa devido aos altos teores de nutrientes disponíveis.

Nossos resultados indicam desequilíbrios em todas as cultivares. Os teores excessivos de N nas videiras podem retardar a produção de frutos por prolongar o período vegetativo, além de causarem baixa acumulação de açúcares no amadurecimento (DELGADO et al., 2004). Outros estudos têm reportado que o excesso de N ocasiona a redução de acumulação de flavonoides de antocianinas nas bagas, diminuindo sua qualidade nutricional (HABRAN et al., 2016). Os teores muito elevados de P podem favorecer a elevação da acidez da uva e a baixa qualidade do fruto (TECCHIO; TERRA; MAIA, 2012). O Cu em excesso ocasiona clorose nas folhas, deficiência no vigor floral e quedas das bagas (BRUNETTO et al., 2015; GIOVANNINI, 2014; JONNES JR, 2012).

3.3.4. Assinatura espectral do dossel de videiras

Considerando os dados de reflectância dos pontos de amostragem de folhas, foi observado que os índices de vegetação apresentaram valores semelhantes entre as cultivares (Tabela 6). O GNDVI apresentou amplitudes iguais (0.12 a 0.43) para as cultivares Arra 15® e BRS Vitória. O mesmo índice apresentou média ligeiramente inferior na cultivar Cotton Candy® (0.24). O GNDVI é sensível as variações na concentração de clorofila, assim como à taxa fotossintética (GITELSON et al., 1996). Adicionalmente, o GNDVI apresenta maior sensibilidade que o NDVI as mudanças no aparato fotossintético por utilizar a banda do verde em substituição ao vermelho (CANDIAGO et al., 2015). Considerando a variação de 0 a 1, para alvos vegetais, nossos resultados evidenciam que a Cotton Candy® pode estar sob condição de maior estresse que as demais cultivares. Esta constatação provavelmente é relacionada ao maior desequilíbrio nutricional apresentado por esta cultivar, visto ter apresentado os maiores teores excessivos os nutrientes N, P, Zn e cobre.

Tabela 6 - Estatística descritiva dos índices de vegetação, gerados por meio de dados de sensor embarcado em VANT, para três cultivares de *Vitis vinifera* cultivadas no Vale do São Francisco

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	SD	CV
			Arra15			
GNDVI	0,27	0,27	0,12	0,43	0,05	18,51
MCARI	0,29	0,32	0,10	0,52	0,13	44,82
NDVI	0,23	0,24	0,10	0,33	0,05	21,73
SAVI	0,35	0,36	0,12	0,49	0,08	22,85
TVI	0,85	0,86	0,76	0,91	0,03	3,52
			BRS Vitória			
GNDVI	0,28	0,28	0,12	0,43	0,06	21,42
MCARI	0,30	0,31	0,11	0,50	0,10	33,33
NDVI	0,24	0,25	0,10	0,32	0,04	16,66
SAVI	0,35	0,37	0,16	0,48	0,07	20,00
TVI	0,85	0,86	0,76	0,91	0,03	3,52
			Cotton Candy®			
GNDVI	0,24	0,23	0,09	0,45	0,07	29,16
MCARI	0,38	0,41	0,13	0,64	0,14	36,84
NDVI	0,26	0,27	0,10	0,36	0,07	26,92
SAVI	0,38	0,41	0,18	0,54	0,10	26,13
TVI	0,86	0,88	0,74	0,93	0,04	4,65

Índice de vegetação verde da diferença normalizada (GNDVI), do Índice de absorção de clorofila modificado na reflectância (MCARI), do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e do índice de vegetação transformado (TVI); SD – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação;

O MCARI apresentou tendência de aumento da Arra 15® (0,29) a BRS Vitória (0,30) e a Cotton Candy® (0,38) (Tabela 6). Esse índice é aplicado para avaliação da área foliar (HABOUDANE et al., 2004; JOALLAND et al., 2017). Em estudo avaliando índices de vegetação na estimativa da área foliar e teor de nitrogênio na cultura do trigo, Zhu et al. (2019) constataram que o MCARI apresentou o maior coeficiente de determinação ($r^2 = 0,83$) entre 39 índices avaliados. O valor mais elevado na cultivar Cotton Candy® indica maior superfície do dossel, relacionado a maior biomassa dessa cultivar.

O NDVI e o SAVI apresentaram maior amplitude na cultivar Cotton Candy®, respectivamente, 0,10 a 0,36 e 0,18 a 54 (Tabela 6). Nas cultivares Arra 15® e BRS Vitória, tanto a amplitude quanto as médias desses índices foram semelhantes. O SAVI é uma modificação do NDVI pela adição de um fator ao modelo matemática para diminuição da influência do solo, sendo indicado para áreas com menor cobertura da vegetação. Ambos são índices diretamente relacionados à saúde da vegetação,

podendo indicar áreas com crescimento saudável do vegetal daquelas com limitação, ou seja, sob estresse (DUBININ et al., 2018). Adicionalmente, esses índices têm sido aplicados de maneiras diversas como em estudos avaliando o estado nutricional, seca, ataque de pragas e doenças (BURNS et al., 2022; HAVLIN et al., 2022; MAZUR et al., 2022; MARIN et al., 2019; WHITE et al., 2022).

As três cultivares apresentaram faixas semelhantes para o índice de vegetação transformado, o qual apresentou amplitude de 0,74 a 0,91. O TVI é aplicado para avaliar a concentração de clorofila nas folhas, consequentemente, é sensível a atividade fotossintética (QIAN et al., 2022). Vários estudos com a utilização do TVI para avalição do teor de clorofila têm sido realizados para culturas como o trigo (CUI et al., 2019), o milho (LI et al., 2020), o arroz (NAQVI et al., 2021) e a uva (YUAN et al., 2015).

De acordo com os mapas dos índices de vegetação, a cultivar Arra 15® apresentou baixa variabilidade da reflectância, no entanto, é possível observar que na região nordeste dos mapas há uma queda no valor dos índices (Figuras 8B, 8C, 8D, 8E e 8F). Considerando o ortomosaico da referida área, há evidências de uma mudança na textura do solo, conforme mudança da coloração observa na Figura 8A. Para a cultivar BRS Vitória, foi constatada elevada variação no valor dos índices, sendo possível observar faixas mais elevadas na região sudeste dos mapas (Figuras 9B, 9C, 9D, 9E e 9F). De maneira semelhante, a cultivar Cotton Candy® apresentou alta variabilidade no campo, destacando-se o índice GNDVI, o qual significativamente indicou zonas com baixos valores, podendo representar menor atividade fotossintética e crescimento (Figura 10B).

Figura 8 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar Arra 15® cultivada na região semiárida do Brasil.

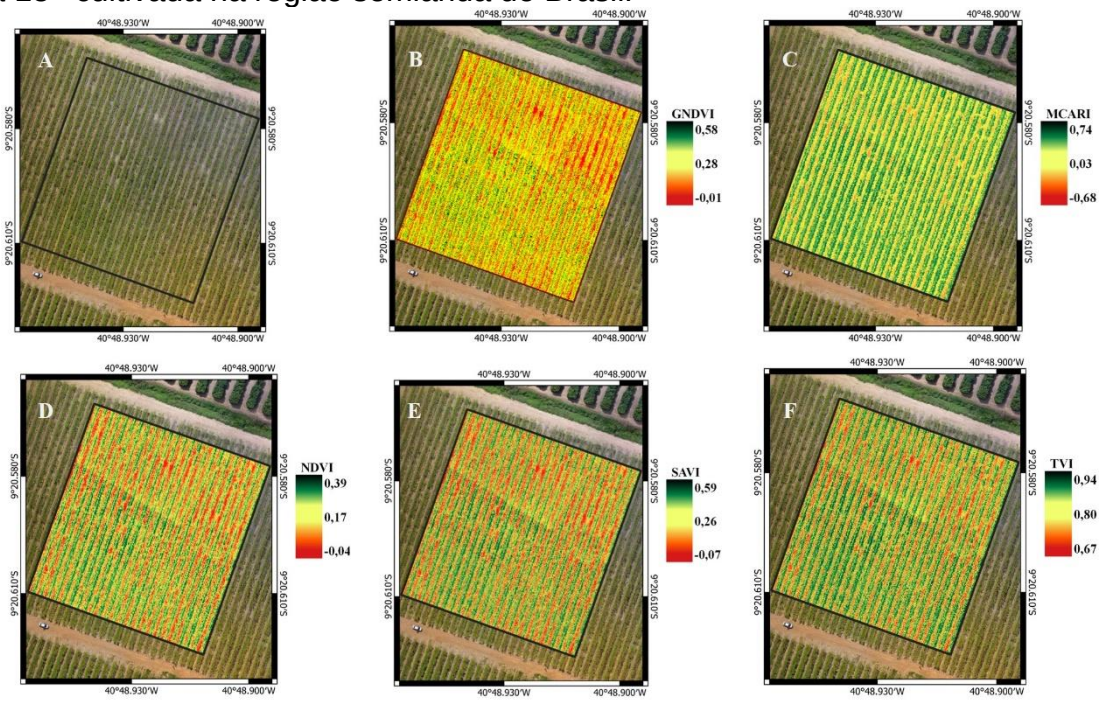


Figura 9 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar BRS Vitória cultivada na região semiárida do Brasil

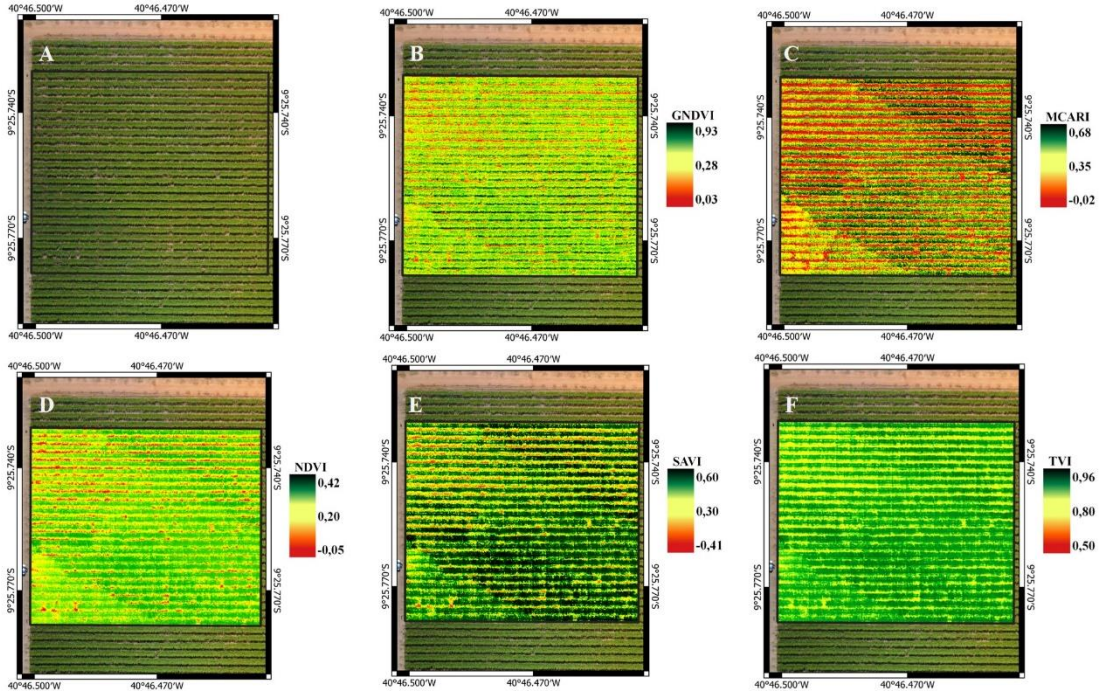
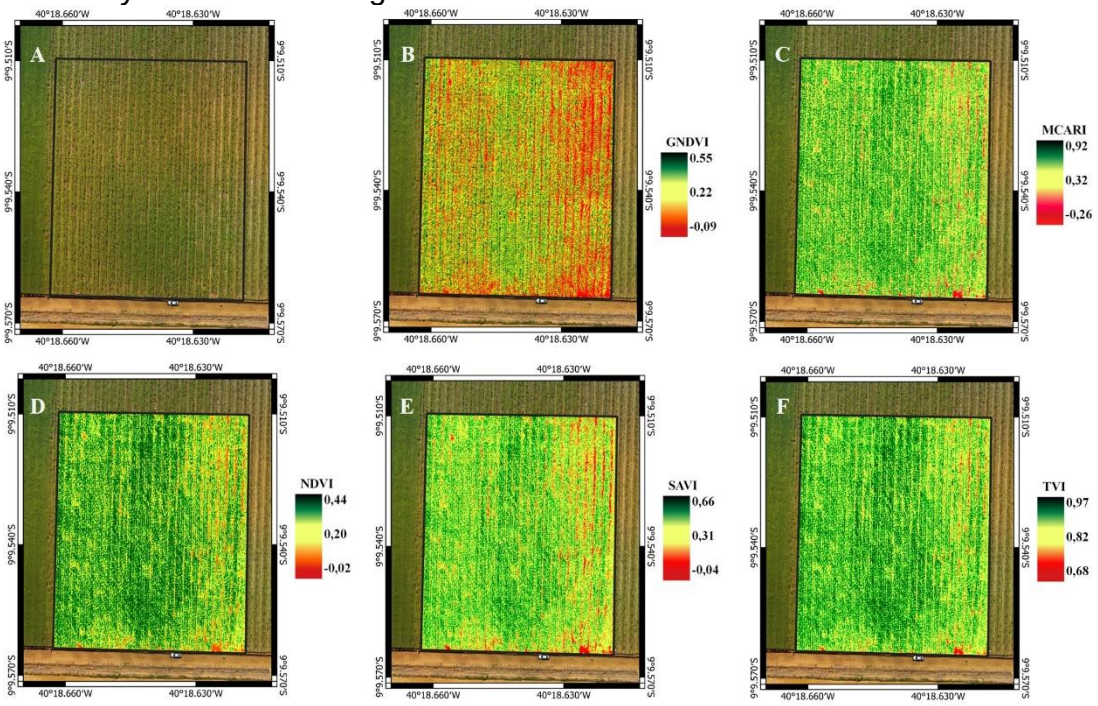


Figura 10 – Mapa do ortomosaico (A), do GNDVI (B), do MCARI (C), do NDVI (D), do SAVI (E) e do TVI (F) na área experimental de produção de uva de mesa da cultivar Cotton Candy® cultivada na região semiárida do Brasil



3.3.5. Correlação entre o teor de nutrientes e os índices de vegetação

A análise de correlação entre os nutrientes nas folhas e os índices de vegetação demonstraram que a assinatura espectral de cada cultivar refletiu de forma distinta a condição nutricional (Tabela 7). Na cultivar Arra 15® foi verificado correlação fraca e negativa do P com o MCARI ($r = -0,236$ $p<0,05$) e com o TVI ($r = -0,355$ $p<0,01$).

Tabela 7 - Matriz de correlação de Pearson entre os índices de vegetação obtidos por meio de um sensor multiespectral embarcado em VANT e os nutrientes determinados na folha completa de três cultivares de uva de mesa

Índice de vegetação	P	K	Ca	Mg	N	Fe	Zn	Mn	Cu
					Arra 15®				
GNDVI	0,083	0,065	0,053	-0,011	0,070	0,021	0,197	-0,111	0,083
MCARI	-0,**236***	-0,020	0,010	0,003	-0,091	0,080	0,000	-0,029	-0,005
NDVI	-0,044	0,038	0,098	0,044	0,155	0,123	0,188	-0,004	0,152
SAVI	-0,043	0,055	0,096	0,043	0,167	0,121	0,190	0,001	0,166
TVI	-0,**355****	0,013	-0,029	-0,087	-0,031	0,072	0,105	-0,159	0,129
					BRS Vitória				
GNDVI	0,053	-0,011	0,033	0,115	0,090	0,049	0,177	0,165	**0,525****
MCARI	0,156	0,033	0,068	0,027	0,053	0,090	0,039	-0,046	0,025
NDVI	-0,063	-0,092	0,035	-0,106	**0,485****	-0,098	-0,168	-0,161	-0,062
SAVI	-0,043	-0,077	0,036	-0,101	**0,469****	-0,085	-0,174	-0,170	-0,049
TVI	-0,066	-0,130	0,213	0,079	0,002	0,197	0,118	**0,245***	0,144
					Cotton Candy®				
GNDVI	**0,247***	0,011	**0,271***	0,122	0,005	0,063	-0,049	-0,123	-0,189
MCARI	**0,228***	0,101	0,033	0,117	0,055	0,059	0,075	-0,124	0,029
NDVI	**0,321****	0,096	0,175	0,167	0,142	0,089	0,042	-0,164	-0,065
SAVI	**0,321****	0,095	0,175	0,167	0,142	0,089	0,042	-0,163	-0,065
TVI	**0,316****	0,094	0,171	0,163	0,044	0,087	0,037	-0,165	-0,071

Índice de vegetação verde da diferença normalizada (GNDVI), do Índice de absorção de clorofila modificado na reflectância (MCARI), do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e do índice de vegetação transformado (TVI); *indica significância no nível de 0,05; * * indica significância no nível de 0,01.

Para a cultivar BRS Vitória, foi verificada correlação moderada e positiva entre o N e o NDVI ($r = 0,485$ $p<0,01$) (Tabela 7). De maneira semelhante, o SAVI apresentou correlação positiva e com o nitrogênio ($r = 0,469$ $p<0,01$). A BRS Vitória foi a única cultivar a apresentar correlação entre micronutrientes e índices de vegetação como verificado entre o Mn e o TVI ($r = 0.245$ $p<0.05$), assim como entre o Cu e o GNDVI ($r = 0,525$ $p<0,01$).

Os teores de P nas folhas na cultivar Cotton Candy® apresentaram correlação com todos os cinco índices de vegetação avaliados, sendo verificadas relações positivas com valor *r* de 0,247, 0,228, 0,321, 0,321 e 0,316, respectivamente, para GNDVI, MCARI2, NDVI, SAVI e TVI (Tabela 7). Adicionalmente, o Ca apresentou correlação positiva com o GNDVI ($r = 0,271$ $p<0,05$).

Utilizando o sensoriamento remoto multiespectral para predição de N, P e K em folhas de uva da cultivar Hutai nº 8, Peng et al. (2022) observaram correlações positivas moderadas a fortes do fósforo com o NDVI, o MCARI2 e o TVI nos estágios de brotamento, florescimento, amadurecimento dos frutos e na maturidade. De modo semelhante, Mazur et al. (2022), avaliando a aplicação de índices de vegetação e da condutividade elétrica para delineamento de zonas de manejo na cultura do milho, observaram alta correlação positiva entre o NDVI e o fósforo ($p<0,01$). Por outro lado, Gracia-Romero et al. (2017), avaliando a performance de índices de vegetação na cultura do milho, observaram correlação negativa entre o P e o MCARI (*$p<0,05$*). Do mesmo modo, Prasad, Sewal e Kalra, (2022), utilizando índices de vegetação na determinação do tempo ótimo para colheita de hortelã, observaram correlações forte e negativa entre MCARI e o fósforo (*$p<0,01$*).

Cada espécie e cultivar pode apresentar assinatura espectral distinta (ADEBAYO; KOLAWOLE, 2017), o que justifica o P na cultivar Arra 15® apresentar correlação negativa com alguns índices e na cultivar Cotton Candy® apresentar correlação positiva. O P pode influenciar na assinatura espectral das plantas devido afetar a concentração de clorofila, visto que esse nutriente afeta o metabolismo vegetal pela produção de ATP necessário ao crescimento das folhas e, portanto, à taxa fotossintética, além de afetar na concentração de proteínas (LIMA; MOSQUIM; MATTA, 1999; PENGLI et al., 2018). Adicionalmente, as correlações de todos os índices de vegetação com P na Cotton Candy® pode estar relacionado a essa cultivar apresentar os maiores teores desse nutriente, ou seja, a influência dele no aparato fotossintético da cultivar pode ser mais significativo comparado as demais cultivares.

A correlação do Ca com o GNDVI pode estar relacionada a esse nutriente atuar nas estruturas dos tecidos, ou seja, na arquitetura foliar e afetar diretamente na cadeia transportadora de elétrons, especificamente no fluxo do fotossistema II até a redução no fotossistema I, consequentemente afetando na reflectância do infravermelho próximo (HAYATA et al., 2010; HE et al., 2018). Corroborando os resultados do presente trabalho, Calzarano et al. (2021), avaliando os sintomas da doença esca das videiras, observaram que plantas com teores mais elevados de Ca apresentaram valores mais altos para o GNDVI.

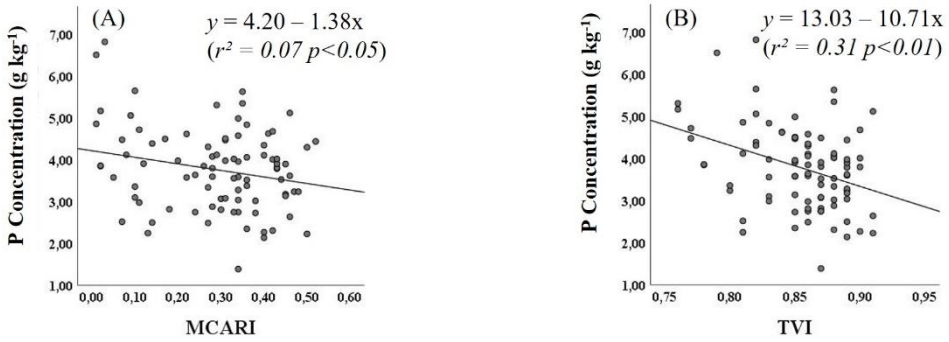
A relação entre o N e o NDVI e o SAVI tem sido amplamente reportados para várias culturas como trigo (MAHAJAN et al.,2014; LIU; ZHOU, 2022), milho (BURNS et al., 2022), uva (HAVLIN et al., 2022; DEBNATH et al., 2021), arroz (LU et al., 2022;

MAHAJAN et al., 2017) e algodão (ZHOU; YIN, 2014). O N está nos cloroplastos como constituinte da molécula da clorofila, ou seja, é diretamente relacionado com capacidade da planta em interceptar a radiação fotossinteticamente ativa, o que justifica ser possível seu monitoramento por meio de índices de vegetação (CHEN; BRUTSAERT, 1998; CABRERA-BOSQUET et al., 2011). Nossos resultados mostraram que para todas as cultivares o N teve tendência de apresentar maiores correlações com o NDVI e SAVI, porém só foi significativo na BRS Vitória que pode ser devido a fatores intrínsecos da cultivar, necessitando de avaliações mais aprofundadas.

A relação entre Cu e os índices de vegetação foi reportada em estudo avaliando plantas de amoreira cultivadas em solo contaminado por esse metal, no qual foi verificado correlação negativa ($r = -0,9$ $p<0,001$) (LUSSALLE et al., 2021). Em estudo avaliando a relação entre índices de vegetação, nutriente e a biomassa de braquiária, Rodrigues et al. (2022) observaram correlações positivas acima de 0.5 entre o Cu e os índices de vegetação. No presente trabalho, a correlação positiva entre o Cu e o GNDVI na BRS Vitória pode indicar que, apesar do nutriente estar em excesso, não representa um fator deletério ao vigor da planta.

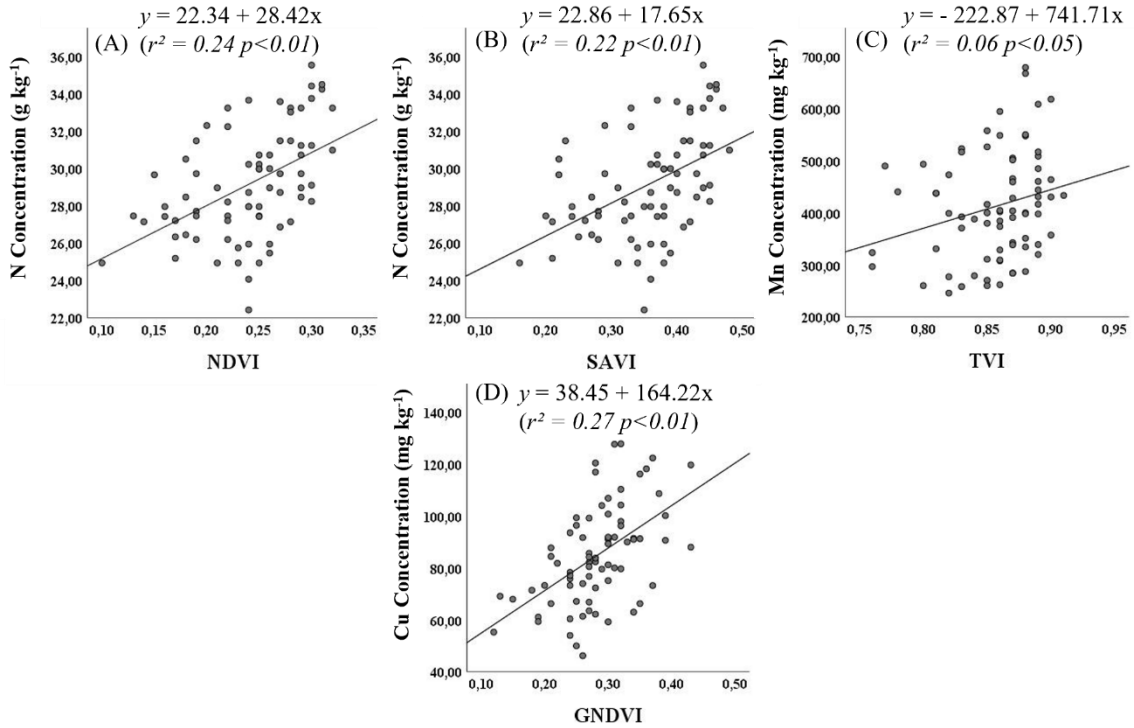
Em adição a análise de correlação, regressões lineares foram realizadas para avaliar a capacidade de predição dos nutrientes com base nas informações dos índices de vegetação. Para a cultivar Arra 15®, foi observada uma fraca, porém significativa, relação entre o MCARI e P, a qual explicou 7% da variação do nutriente ($r^2 = 0,07$ $p<0,05$) (Figura 11A). Para o mesmo nutriente, o TVI apresentou relação moderada e significativa, na qual o modelo de regressão explicou 31% da variação ($r^2 = 0,31$ $p<0,01$), portanto, sendo mais eficiente que o MCARI para a realização de estimativas dos nutrientes (Figura 11B).

Figura 11 – Relação entre a concentração de P nas folhas da cultivar de uva Arra 15® e o Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância – MCARI (A) e o Índice de Vegetação Transformado – TVI (B).



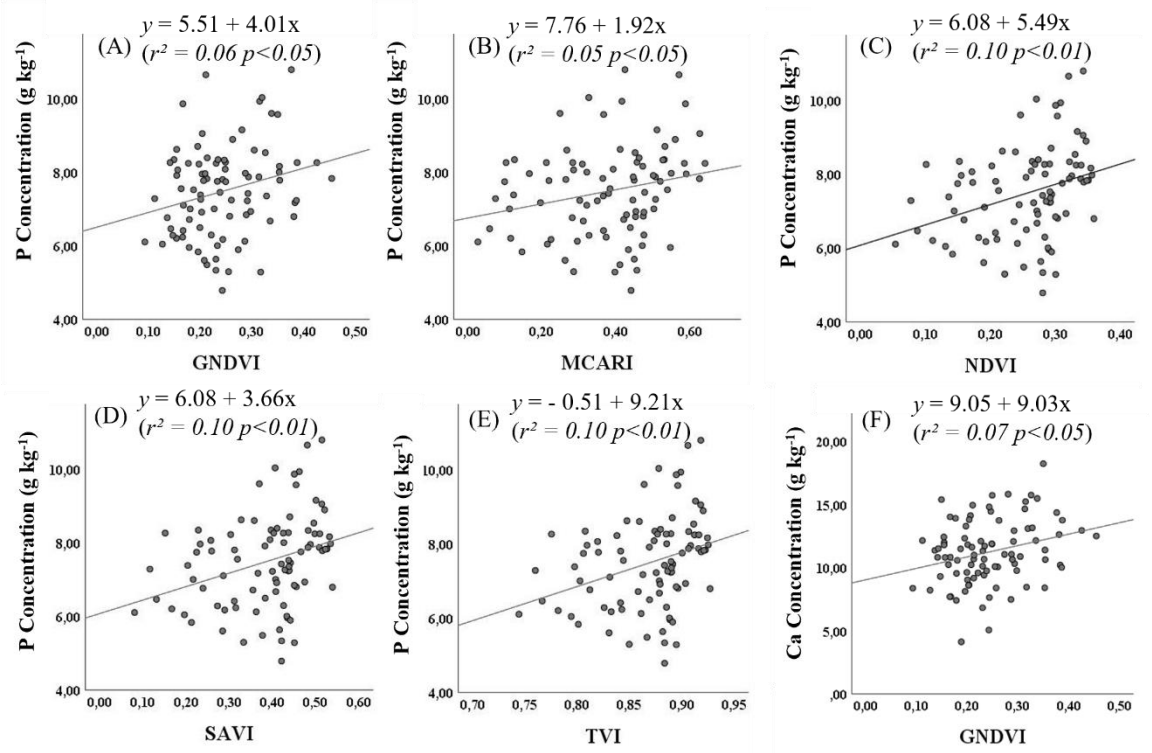
Na cultivar BRS Vitória, o N apresentou relação significativa com o NDVI e SAVI, os quais explicaram a variação do nutriente em 24% e 22%, respectivamente (Figura 12A e 12B). Para a mesma cultivar, o TVI foi capaz de explicar 6% da variação do Mn ($r^2 = 0,06$ $p<0,05$) (Figura 12C). De acordo com a regressão, o maior coeficiente de determinação entre os índices e os nutrientes para a cultivar foi verificado entre o GNDVI e o Cu, no qual explicou 27% da variação do elemento nas folhas das videiras ($r^2 = 0,27$ $p<0,01$) (Figura 12D).

Figura 12 – Relação entre a concentração de nutrientes nas folhas da cultivar de uva BRS Vitória e os Índices de Vegetação pela Diferença Normalizada – NDVI (A), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – SAVI (B) e o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada – GNDVI (D)



Os teores de P na cultivar Cotton Candy® apresentaram ajustes significativos com todos os índices de vegetação, de modo que sua variabilidade foi explicada pelo GNDVI em 6%, o MCARI em 5%, e o NDVI, o SAVI e o TVI em 10% (Figura 13). O GNDVI apresentou relação significativa com o Ca, com índice de determinação de 0.07 (*p<0,05*) (Figura 13F).

Figura 13 – Relação entre a concentração de P e Ca em folhas da cultivar de uva Cotton Candy® e o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada – GNDVI (A e F), Índice da Absorção de Clorofila Modificada na Refletância – MCARI (B), Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada – NDVI (C), Índice de Vegetação Ajustada ao Solo – SAVI (D) e Índice de Vegetação Transformada – TVI (E)



Estudos utilizando índices de vegetação baseados na assinatura espectral das plantas, especificamente, na reflectância do infravermelho próximo para estimação de nutrientes têm sido realizados para diversas culturas a exemplo de arroz (BRINKHOFF et al., 2021), da batata (YANG et al., 2021), do citrus (OSCO et al., 2019), do milho (FASSA et al., 2022; SANTANA et al., 2021), da pimenta (SOUZA et al., 2020), do trigo (SONG et al., 2021), da cana-de-açúcar (MIPHOKASAP et al., 2012; SHENDRYK et al., 2020).

Avaliando a performance do NDVI na estimativa do N em pimenteiras, Souza et al. (2020) observaram que o coeficiente de determinação se elevou na ordem dos estágios colheita ($r^2 = 0,27$) < vegetativo ($r^2 = 0,48$) < florescimento ($r^2 = 0,54$) < início

da frutificação (*r^2 = 0,65*). Semelhantemente, Taskos et al. (2015), utilizando sensoriamento remoto para avaliar o estado nutricional, constaram que o NDVI foi eficiente em estimar o N da cultivar Cabernet Sauvignon, porém não obtiveram o mesmo resultado para a cultivar Xinomavro, concluindo que o índice é dependente do fator genético da planta. No mesmo trabalho, os autores avaliaram quatro estados fenológicos e observaram que a maior acurácia do NDVI ocorreu no fechamento dos cachos, constatando que os índices são dependentes fenologia apresentada.

Nossos resultados indicaram os índices mais eficientes na estimativa de nutrientes para cada cultivar avaliada, como o TVI para a cultivar Arra 15®, o NDVI e GNDVI para a BRS Vitória e Cotton Candy®. Apesar da acurácia apresentada (r^2 abaixo de 0,50), as relações significativas indicam o potencial da utilização da assinatura espectral para o manejo nutricional da cultura da uva.

O estágio fenológico escolhido para levantamento dos dados pode ter influenciado na capacidade preditiva dos índices estudados. Em estudo avaliando sensores embarcados em diferentes plataformas para avaliar diferentes fases fenológica da videira, Gomes et al. (2021) constataram elevação do NDVI da floração até a segunda fase de crescimento das bagas devido ao crescimento vegetativo. Os mesmos autores observaram declínio do NDVI na fase de maturação dos frutos, visto que a área foliar estava completamente desenvolvida e os frutos atuavam como drenos. Peng et al. (2022), avaliando o N a partir de índices de vegetação em diferentes estágios fenológicos da variedade de uva Hutai No. 8, concluíram que os modelos matemáticos com o NDVI e outros índices apresentaram melhor performance preditiva no estágio de maturação das bagas.

Adicionalmente, a capacidade preditiva dos índices é dependente de características intrínsecas da planta e sua capacidade de absorção de nutrientes, de modo que estudos utilizando sensores devem ser específicos para cada cultivar visando precisão dos dados coletados. Corroborando essa conclusão, trabalho avaliando a extração de nutrientes pela videira Niagara Rosada, Tecchio et al. (2011) observaram que plantas diferentes porta-enxerto apresentaram diferentes comportamentos de extração de nutriente pelos cachos e ramos.

Nossos resultados apontaram que são necessárias investigações complementares em diferentes estágios fenológicos das diferente cultivares plantadas no Vale do São Francisco. Nos estudos, deverão ser consideradas variáveis como hábito de crescimento, arquitetura do dossel, porta-enxerto, manejo adotado, visando

melhorar a capacidade preditiva dos índices de vegetação em avaliar o estado nutricional das videiras.

3.4. Conclusões

Em todas as áreas avaliadas, os atributos pH, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn e Cu apresentaram teores acima do nível crítico para fertilidade do solo, apontando excessos na adubação e a consequente necessidade de revisão do manejo adotado para a cultura. Os atributos avaliados apresentaram dependência espacial fraca e moderada, e os alcances foram próximos a distância de amostragem.

Entre as cultivares, a Cotton Candy® apresentou os teores mais elevados para 60% dos nutrientes avaliados, sendo considerada a cultivar mais exigente. Foi observado que todas cultivares apresentaram desequilíbrios nutricionais, com teores excessivos de N, P e Cu, assim como deficiência para K, Ca, Zn e Manganês. Em destaque, o Cu na cultivar Cotton Candy® esteve em teores dez vezes acima da faixa ótima para a cultura da uva.

Os mapas dos índices de vegetação indicaram zonas de baixa performance das plantas. Para determinação do P na Arra 15®, o TVI mostrou a melhor coeficiente de determinação, enquanto para a Cotton Candy®, o NDVI e SAVI apresentaram a mesma eficiência. Na cultivar BRS Vitória, o NDVI e o GNDVI obtiveram os melhores ajustes em estimar o N e o Cu respectivamente. Os índices de vegetação avaliados apresentaram baixos a moderados coeficientes de determinação para estimativa dos nutrientes, porém nossos resultados indicaram potencial da utilização da ferramenta no manejo nutricional na viticultura.

Referências bibliográficas

ADEBAYO, M. A.; MENKIR, A.; HEARNE, S. KOLAWOLE, A. O. Gene Action Controlling Normalized Difference Vegetation Index in Crosses of Elite Maize (Zea mays L.) Inbred Lines. **Cereal Research Communications**, v. 45, p. 675–686, 2017. https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.043

AQUINO, R. E. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A. D.; SIQUEIRA, D. S. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p.32-41, 2014A. https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100001

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C.C.; OLIVEIRA, I. A. D.; MARQUES JUNIOR, J.; SILVA, D. M. P.; SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, p. 988-997, 2014B.

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v.13, p. 95 -120, 1995. doi:10.1080/02757259509532298

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. D. A. D. C.; SOUZA, C. M. A. D. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 1-9, 2013. https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001

BOUAIN, N.; SHAHZAD, Z.; ROUACHED, A.; KHAN, G. A.; BERTHOMIEU, P.; ABDELLY, C.; POIRIER, Y.; ROUACHED, H. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: Toward a better understanding of their homeostasis interaction. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 20, p. 5725–5741, 2014. https://doi.org/10.1093/jxb/eru314

BRINKHOFF, J.; DUNN, B. W.; ROBSON, A. J. Rice nitrogen status detection using commercial-scale imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 105, p. 102627, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102627.

BRUNETTO, G.; MELO, G. W. B.; TOSELLI, M.; QUARTIERI, M.; TAGLIAVINI, M. The role of mineral nutrition on yields and fruit quality in grapevine, pear and apple. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, p. 1089-1104, 2015. https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15

BURNS, B.W.; GREEN, V.S.; HASHEM, A. A. MASSEY, J. H.; SHEW, A. M.; ADVIENTO-BORBE, M. A. A.; MILAD, M. Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 791–811, 2022. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-021-09861-4

CABRERA-BOSQUET, L.; MOLERO, G.; STELLACCI, A. M.; BORTS, J.; NOGUÉS, S.; ARAUS, J. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. **Cereal Research Communications**, v. 39, p. 147 - 159, 2011. https://doi.org/10.1556/crc.39.2011.1.15

CALZARANO, F.; PAGNANI, G.; PISANTE, M.; BELLOCCI, M.; CILLO, G.; METRUCCIO, E. G.; DI MARCO, S. Factors Involved on Tiger-Stripe Foliar Symptom Expression of Esca of Grapevine. **Plants**, v. 10, p. 1041, 2021. https://doi.org/10.3390/plants10061041

CAMBARDELLA, C.A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURVO, R.F.; KONOPA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil. Sci. Soc. Am. J**., v. 58, p. 1501-1511, 1994. https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x

CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; DE GIGLIO, M.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026–4047, 2015. https://doi.org/10.3390/rs70404026

CAVALCANTI, F. J. A. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2a aproximação.** 3rd ed. Recife: Instituto Agronômico de Pernambuco, 2008. 212 p.

CHEN, D.; BRUTSAERT, W. Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over a tallgrass prairie. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 55, p. 1225–1238, 1998. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<1225:SSDASP>2.0.CO;2

CUI, B.; ZHAO, Q.; HUANG, W.; SONG, X.; YE, H.; ZHOU, X. A New Integrated Vegetation Index for the Estimation of Winter Wheat Leaf Chlorophyll Content. **Remote Sensing,** v. 11, n. 8, p. 974, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11080974

DEBNATH, S.; PAUL, M.; RAHAMAN, D. M. M.; DEBNATH, T.; ZHENG, L.; BABY, T.; SCHMIDTKE, L. M.; ROGIERS, S.Y. Identifying Individual Nutrient Deficiencies of Grapevine Leaves Using Hyperspectral Imaging. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3317, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13163317

DEERING, D. W.; ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; AND SCHELL, J. A. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. In: **Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment**. Environmental Research Institute of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1975; pp. 1169–1178.

DELGADO, R.; MARTÍN, P.; DEL ÁLAMO, M.; GONZÁLEZ, M. R. Changes in the phenolic composition of grape berries during ripening in relation to vineyard nitrogen and potassium fertilisation rates. **Journal of the Science of Food and Agriculture,** v. 84, p. 623-630, 2004. https://doi.org/10.1002/jsfa.1685

DUAN, L.; LI, Z.; XIE, H.; LI, Z.; ZHANG, L.; ZHOU, Q. Large-scale spatial variability of eight soil chemical properties within paddy fields. **Catena**, v. 188, p. 104350, 2020. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104350

DUBININ, V.; SVORAY, T.; DORMAN, M.; PEREVOLOTSKY, A. Detecting biodiversity refugia using remotely sensed data. **Landscape. Ecology**, v.33, p. 1815-1830, 2018. https://doi.org/10.1007/s10980-018-0705-1

FARIA, C. M. B.; SILVA, D. J.; PEREIRA, J. R. Avaliação nutricional da videira no Submédio São Francisco. Petrolina: **Embrapa Semi-Árido**, p. 20, 2004.

FASSA, V.; PRICCA, N.; CABASSI, G.; BECHINI, L.; CORTI, M. Site-specific nitrogen recommendations' empirical algorithm for maize crop based on the fusion of soil and vegetation maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 203, p.107479, 2022. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107479

GATTI, M.; SCHIPPA, M.; GARAVANI, A.; SQUERI, C.; FRIONI, T.; DOSSO, P.; PONI, S. High potential of variable rate fertilization combined with a controlled released nitrogen form at affecting cv. Barbera vines behavior. **European Journal of Agronomy**, v. 112, p. 125949, 2020. https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125949

GIOVANNINI, E. **Manual de viticultura**. Porto Alegre: Bookman, p. 188, 2014.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing Environ**, v. 58, p. 289-298, 1996. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7

GOMES, M. D. A.; ROMÁN, R. M. S.; TORRES-RUA, A.; ALVES, É. S.; MCKEE, M. Comparação do NDVI obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. **Irriga**, **Sensoriamento Remoto,** v. 26, n. 3, p. 605-619, 2021. https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619

GRACIA-ROMERO, A.; KEFAUVER, S. C.; VERGARA-DÍAZ, O.; ZAMAN-ALLAH, M. A.; PRASANNA, B. M.; CAIRNS, J. E.; ARAUS. J. L. "Comparative Performance of Ground vs. Aerially Assessed RGB and Multispectral Indices for Early-Growth Evaluation of Maize Performance under Phosphorus Fertilization." **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02004

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004. https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013

HABRAN, A.; COMMISSO, M.; HELWI, P.; HILBERT, G.; NEGRI, S.; OLLAT, N.; GOMES, E.; LEEUWEN, C. V.; GUZZO, F.; DELROT, S. Roostocks/scion/nitrogen interactions affect secondary metabolism in the grape berry. **Frontiers in plant science**, v. 7, p.1134, 2016. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01134

HAVLIN, J. L.; AUSTIN, R.; HARDY, D.; HOWARD, A.; HEITMAN, J. L. Nutrient Management Effects on Wine Grape Tissue Nutrient Content. **Plants**, v. 11, n. 2, p.158, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11020158

HAYAT, S.; HASAN, S.A.; YUSUF, M.; HAYAT, Q.; AHMAD, A. Effect of 28-homobrassinolide on photosynthesis, fluorescence and antioxidant system in the presence or absence of salinity and temperature in Vigna radiata. **Environmental and Experimental Botany,** v. 69, n. 2, p.105 –112, 2010. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.03.004

HE, L.; YU, L.; LI, B.; DU, N.; GUO, S. The effect of exogenous calcium on cucumber fruit quality, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and fast chlorophyll fluorescence during the fruiting period under hypoxic stress. **BMC Plant Biology,** v.18, p.1 -10, 2018. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s12870-018-1393-3

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An Introduction to applied geostatistics: **Oxford University Press, New York**, p. 561, 1989. https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90055-I

JOALLAND, S.; SCREPANTI, C.; LIEBISCH, F.; VARELLA, H. V.; GAUME, A.; WALTER, A. Comparison of visible imaging, thermography and spectrometry methods to evaluate the effect of Heterodera schachtii inoculation on sugar beets. **Plant Methods**, v.13, p. 73, 2017. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s13007-017-0223-1

KARIMI, R.; SABERI, A.; KHADIVI, A. Effects of foliar spray of agricultural grade mineral oil in springtime, in combination with potassium and calcium sulfates on the phenological and biophysical indices of clusters, and foliar nutritional levels in grapevine (Vitis vinifera L.) cv. Sultana (Id. Thompson seedless, Sultanina). **Biological Researche**, v. 54, p. 28, 2021. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1186/s40659-021-00353-3

KŐRÖSI, L.; BOUDERIAS, S.; CSEPREGI, K.; BOGNÁR, B.; TESZLÁK, P.; SCARPELLINI, A.; JAKAB, G. Nanostructured TiO2-induced photocatalytic stress enhances the antioxidant capacity and phenolic content in the leaves of Vitis vinifera on a genotype-dependent manner. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.190, p.137-145, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.11.010

LAZZAROTTO, J. J.; FIORAVANÇO, J. C. Tendências e sazonalidades nas exportações e importações brasileiras de uva de mesa. **Informações Econômicas**, v. 43, p. 43–58, 2013.

LI, Z.; ZHANG, Q.; LI, J.; YANG, X.; WU, Y.; ZHANG, Z.; WANG, S.; WANG, H.; ZHANG, Y. Solar-induced chlorophyll fluorescence and its link to canopy photosynthesis in maize from continuous ground measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111420, 2020. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111420

LIMA, J. D.; MOSQUIM, P. R.; MATTA, F. M. "Leaf Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence Parameters in Phaseolus Vulgaris as Affected by Nitrogen and Phosphorus Deficiency." **Photosynthetica,** v. 37, p.113-121, 1999. https://doi.org/10.1023/A:1007079215683

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto**. Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 16-23, 2013. https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100003

LIU, S.; HU, Z.; HAN, J.; LI, Y.; ZHOU, T. Predicting grain yield and protein content of winter wheat at different growth stages by hyperspectral data integrated with growth monitor index. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 200, p. 107235, 2022. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107235.

LIU, Z.; BAI, Y.; LUO, L.; WAN, J.; WANG, W.; ZHAO, G. Effects of high dose copper on plant growth and mineral nutrient (Zn, Fe, Mg, K, Ca) uptake in spinach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 37471-37481, 2021. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13395-7

LOWE, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. In**: Proceedings of the seventh IEEE international conference on Computer vision**, v. 2, p.1150-1157, 1999. DOI: 10.1109/ICCV.1999.790410

LU, J.; DAI, E.; MIAO, Y.; KUSNIEREK, K. Improving active canopy sensor-based in-season rice nitrogen status diagnosis and recommendation using multi-source data fusion with machine learning. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134926, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134926

MA, J.; ZHANG, M.; LIU, Z.; CHEN, H.; LI, Y. C.; SUN, Y.; MA, Q.; ZHAO, C. Effects of foliar application of the mixture of copper and chelated iron on the yield, quality, photosynthesis, and microelement concentration of table grape (Vitis vinifera L.). **Scientia Horticulturae**, v. 254, p. 106-115, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.075

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (Triticum aestivum L.). **Precision Agriculture**, v. 15, p. 499–522, 2014. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-014-9348-7

MAHAJAN, G.R.; PANDEY, R.N.; SAHOO, R.N.; GUPTA, V. K.; DATTA, S. C.; KUMAR, D. Monitoring nitrogen, phosphorus and sulphur in hybrid rice (Oryza sativa L.) using hyperspectral remote sensing. **Precision Agriculture**, v.18, p. 736–761, 2017. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-016-9485-2

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5 ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1989. 292 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações, **Potafos**: Piracicaba, 1997. p. 319.

MARIN, D. B.; ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; BELAN, L. L.; FREITAS, M. L. O. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 959–982, 2019. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-018-09623-9

MARQUES JÚNIOR, J. M.; ALLEONI, L. R. F.; TEIXEIRA, D. de D.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 91–99, 2015. https://doi.org/10.1016/j. geodrs.2014.12.004.

MAZUR, P.; GOZDOWSKI, D.; WÓJCIK-GRONT, E. Soil Electrical Conductivity and Satellite-Derived Vegetation Indices for Evaluation of Phosphorus, Potassium and Magnesium Content, pH, and Delineation of Within-Field Management Zones. **Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 883, 2022. https://doi.org/10.3390/agriculture12060883

MENDES, A. M. S.; SILVA, D. J.; BASSOI, L. H. Variabilidade espacial da fertilidade de solo em pomar de uva de mesa em Petrolina-PE. **Embrapa Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E),** p. 380-388, 2014.

MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p.1651-1670, 2012. https://doi.org/10.3390/rs4061651

MIRÁS-AVALOS, J. M.; FANDIÑO, M.; REY, B. J.; DAFONTE, J.; CANCELA, J. J. Zoning of a newly-planted vineyard: spatial variability of physico-chemical soil properties. **Soil Systems**, v. 4 n. 4, p. 62, 2020. https://doi.org/10.3390/soilsystems4040062

MOGHIMI, A.; POURREZA, A.; ZUNIGA-RAMIREZ, G.; WILLIAMS, L. E.; FIDELIBUS, M. W. A. Novel Machine Learning Approach to Estimate Grapevine Leaf Nitrogen Concentration Using Aerial Multispectral Imagery. **Remote Sensing,** v. 12, p. 3515, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12213515

MOLOINYANE, S.; ADDISON, P.; ACHIANO, K.A.; NCHU, F. Association between chemical properties of vineyard soils and occurrence of entomopathogenic fungi causing different levels of mortality in Planococcus ficus. **BioControl,** v. 65, p.197–209, 2020. https://doi.org/10.1007/s10526-019-09989-3

MONDO, V. H. V.; GOMES JUNIOR, F. G.; PINTO, T. L. F.; MARCHI, J. L. D.; MOTOMIYA, A. V. D. A.; MOLIN, J. P.; CICERO, S. M. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, p. 193-201, 2012. https://doi.org/10.1590/S0101-31222012000200002

NAJI, T. A. H. Study of vegetation cover distribution using DVI, PVI, WDVI indices with 2D-space plot. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1003, n. 1, p. 012083, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1003/1/012083

NAQVI, S. M. Z. A.; AWAIS, M.; KHAN, F. S.; AFZAL, U.; NAZ, N.; KHAN, M. I. Unmanned air vehicle based high resolution imagery for chlorophyll estimation using spectrally modified vegetation indices in vertical hierarchy of citrus grove. **Remote Sensing Applications: Society and Environment,** v. 23, p. 100596, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100596.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, M. K. D.; SILVA, F. B. V.; LIMA, L. H. V.; SILVA, F. L.; VELOSO, V. L.; SILVA, J. R.; LINS, S. A. S. NDVI, Nutrient Accumulation and Yield of Onion Fertilized with Amorphous Silica in a Semiarid Setting in Brazil. **Silicon**, v. 1, p. 1 – 10, 2022. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12633-022-02222-4

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; LIMA, L. H. V.; SILVA, J. R.; LIMA VELOSO, V.; SILVA, F. L.; SANTOS, M. A. Silicon application to soil increases the yield and quality of table grapes (Vitis vinifera L.) grown in a semiarid climate of Brazil. **Silicon**, p. 1-12, 2022. https://doi.org/10.1007/s12633-022-02129-0

NASCIMENTO, P. D. S.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S.; BASSOI, L. H. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1101-1113, 2014. https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400006

OLIVEIRA, I. A.; FREITAS, L.; AQUINO, R. E.; CASAGRANDE, J. C.; CAMPOS, M. C. C.; & SILVA, L. S. Chemical and physical pedoindicators of soils with different textures: spatial variability. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 3, p. 1-12, 2018. https://doi.org/10.1007/s12665-017-7216-2

OSCO, L. P.; RAMOS, A. P. M.; PEREIRA, D. R.; MORIYA, É. A. S.; IMAI, N. N.; MATSUBARA, E. T.; ESTRABIS, N.; SOUZA, M.; MARCATO JUNIOR, J.; GONÇALVES, W. N.; LI, J.; LIESENBERG, V.; CRESTE, J. E. Predicting Canopy Nitrogen Content in Citrus-Trees Using Random Forest Algorithm Associated to Spectral Vegetation Indices from UAV-Imagery. **Remote Sensing,** v. 11, p. 2925, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11242925

PENG, X.; CHEN, D.; ZHOU, Z.; ZHANG, Z.; XU, C.; ZHA, Q.; WANG, F.; HU, X. Prediction of the Nitrogen, Phosphorus and Potassium Contents in Grape Leaves at Different Growth Stages Based on UAV Multispectral Remote Sensing. **Remote Sensing**, v.14, n. 11, p. 2659, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14112659

PRASAD, N.; SEMWAL, M.; KALRA, A. "Hyperspectral Vegetation Indices Offer Insights for Determining Economically Optimal Time of Harvest in Mentha Arvensis." **Industrial Crops and Products**, v.180, p. 114753, 2022. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114753

QIAN, B.; YE, H.; HUANG, W.; XIE, Q.; PAN, Y.; XING, N.; REN, Y.; GUO, A.; JIAO, Q.; LAN, Y. A sentinel-2-based triangular vegetation index for chlorophyll content estimation, **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 322, p. 109000, 2022. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109000.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas (Boletim técnico, 100),1996, 285 p.

REZA, S.K.; BARUAH, U.; SARKAR, D.; Singh, S. K. Spatial variability of soil properties using geostatistical method: a case study of lower Brahmaputra plains, India. **Arabian Journal of Geoscienses**, v. 9, n. 446, p. 1 - 8, 2016. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2474-y

RIETRA, R. P. J. J.; HEINEN, M.; DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017. https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429

RODRIGUES, M.; CEZAR, E.; ARGENTA, J. C.; BARCELOS, L. B.; REIS, A. S.; SANTOS, G. L. A. A.; ... & NANNI, M. R. Relationship Between Vegetation Indices, Nutrients Content, and the Biomass Production of Brachiaria (Brachiaria ruziziensis). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.53, n. 18, p. 2400 - 2419, 2022. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2071926

ROSEMARY, F.; VITHARANA, U.W.A.; INDRARATNE, S.P.; WEERASOORIYA, R.; MISHRA, U. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. **Catena**, v. 150, p. 53-61, 2017. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.017

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. In: **NASA/GSFC**. Final Report: Greenbelt, 1973. P. 1–137.

SANTANA, D. C.; COTRIM, M. F.; FLORES, M. S.; BAIO, F. H. R.; SHIRATSUCHI, L. S.; SILVA JUNIOR, C. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. UAV-based multispectral sensor to measure variations in corn as a function of nitrogen topdressing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100534, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100534.

SANTOS, C. V.; LEVIEN, R.; MAZURANA, M.; ZULPO, L. Alterations of chemical attributes in soils under different years of Vitis vinifera L. cultivation. **Acta Brasiliensis**, v. 3 n. 3, p. 116-123, 2019. https://doi.org/10.22571/2526-4338218

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, Brasília: Embrapa, p. 355, 2018.

SERRANO, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, L. L.; SOUSA, A.; BAPTISTA, F. Differential vineyard fertilizer management based on nutrients spatio-temporal variability. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.17, n.1, p.46-61, 2017. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000004.

SHENDRYK, Y.; SOFONIA, J.; GARRARD, R.; RIST, Y.; SKOCAJ, D.; THORBURN, P. Fine-scale prediction of biomass and leaf nitrogen content in sugarcane using UAV LiDAR and multispectral imaging. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 92, p. 102177, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102177

SILVA, F.C.S. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 191-233.

SILVA, E. R. O. D.; BARROS, M. M.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; SOARES, S. C. Effects of spatial variability of soil chemical parameters on Tifton 85 grass yield. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 236-245, 2020. https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n125rc

SILVA, M. A.; CORREIA, K. C.; BARBOSA, M. A. G. Characterization of Phaeoacremonium isolates associated with Petri disease of table grape in Northeastern Brazil, with description of Phaeoacremonium nordesticola sp. nov. **European Journal of Plant Pathology,** v. 149, p. 695–709, 2017. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10658-017-1219-4

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo. **EMBRAPA Tabuleiros Costeiros - SE**, p. 15, 2015.

SOIL SURVEY STAF. **Keys to soil taxonomy**, 12th ed. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ survey/class/?cid=nrcs142p2_053580>. Acesso em: 19 de agosto de 2022

SONG, F.; XU, M.; DUAN, Y.; CAI, Z.; WEN, S. CHEN, X.; SHI, W.; COLINET, G. Spatial variability of soil properties in red soil and its implications for site-specific fertilizer management. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, p. 2313-2325, 2020. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63221-X

SONG, X.; XU, D.; HUANG, C.; ZHANG, K.; HUANG, S.; GUO, D.; ZHANG, S.; YUE, K.; GUO, T.; WANG, S.; ZANG. H. Monitoring of nitrogen accumulation in wheat plants based on hyperspectral data, **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100598, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100598.

SOUZA, R.; PEÑA-FLEITAS, M.T.; THOMPSON, R.B.; GALLARDO, M.; PADILLA, F.M. Assessing Performance of Vegetation Indices to Estimate Nitrogen Nutrition Index in Pepper. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 763, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12050763

TASKOS, D.G.; KOUNDOURAS, S.; STAMATIADIS, S.; ZIOZIOU, E.; NIKOLAOU, N.; KARAKIOULAKIS, K.; THEODOROU, N. Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity. **Precision Agriculture,** v.16, p. 77– 98, 2015. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-014-9363-8

TECCHIO, M.A.; TERRA, M.M.; MAIA, J.D.G. Nutrição, calagem e adubação da videira Niágara. p.137-173. In: Maia, J.D.G.; Camargo, U.A. O cultivo da videira Niágara no Brasil. **Embrapa**, p. 139-173, 2012

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solos, plantas e outros materiais. **UFRGS,** v. 5, p. 174, 1995.

TEIXEIRA, L. A. J.; TECCHIO, M. A.; MOURA, M. F.; TERRA, M. M.; PIRES, E. J. P.; HERNANDES, J. L. Alterações em atributos químicos de um solo submetido à adubação e cultivado com videira'Niágara Rosada'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 983-992, 2011. https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000300035

URRETAVIZCAYA, I.; SANTESTEBAN, L.G.; TISSEYRE, B.; GUILLAUME, S.; MIRANDA, S.; ROYO, J. B. Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling. **Precision Agriculture**, v.15, p. 111–129, 2014. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11119-013-9328-3

USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 241-250, 2017. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015.

VASU, D.; SINGH, S.K.; SAHU, N.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; DURAISAMI, V.P.; RAMAMURTHY, V.; LALITHA, M.; KALAISELVI, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 25-34, 2017. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.006.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D.; ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. p.319-344

WHITE, J. G.; SPARRIUS, J.; ROBINSON, T.; HALE, S.; LUPONE, L.; HEALEY, T.; COOKE, R.; RENDALL, A. R. Can NDVI identify drought refugia for mammals and birds in mesic landscapes? **Science of The Total Environment**, v. 851, p.158318, 2022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158318.

XUE, C.; ZHANG, T.; YAO, S.; GUO, Y. Effects of Households' Fertilization Knowledge and Technologies on Over-Fertilization: A Case Study of Grape Growers in Shaanxi, China. **Land,** v. 9, n. 9, p. 321, 2020. https://doi.org/10.3390/land9090321

YANG, H.; LI, F.; HU, Y.; YU, K. Hyperspectral indices optimization algorithms for estimating canopy nitrogen concentration in potato (Solanum tuberosum L.). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,** v. 102, p. 102416, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102416.

YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology** v. 36, n. 5, p. 409–430, 2009. https://doi.org/10.1071/FP08288

ZERAATPISHEH, M.; BOTTEGA, E. L.; BAKHSHANDEH, E.; OWLIAIE, H. R.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; KERRY, R.; XU, M. Spatial variability of soil quality within management zones: Homogeneity and purity of delineated zones. **Catena**, v. 209, p. 105835, 2022. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105835

ZHAO, Z.; CHU, C.; ZHOU, D.; SHA, Z.; WU, S. Soil nutrient status and the relation with planting area, planting age and grape varieties in urban vineyards in Shanghai, **Heliyon**, v. 5, n. 8, p. e02362, 2019. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02362

ZHOU, G.; YIN, X. Relationship of cotton nitrogen and yield with Normalized Difference Vegetation Index and plant height. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 100, p. 147–160, 2014. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10705-014-9640-y

ZHU, W.; SUN, Z.; HUANG, Y.; LAI, J.; LI, J.; ZHANG, J.; YANG, B.; LI, B.; LI, S.; ZHU, K.; LI, Y.; LIAO, X. Improving Field-Scale Wheat LAI Retrieval Based on UAV Remote-Sensing Observations and Optimized VI-LUTs. **Remote Sensing,** v. 11, p. 2456, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11202456

4. VARIAÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO OBTIDO POR MEIO DE SENSORES EMBARCADOS EM VANT E EM SATÉLITE NAS FASES FENOLÓGICAS DA VIDEIRA E SUA CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Resumo

Com base na assinatura espectral do dossel vegetal, o sensoriamento remoto tem sido utilizado na estimação de indicadores do solo diretamente relacionados a aplicação fertilizantes, atividade biológica e conteúdo de matéria orgânica. A utilização dos VANT nos campos de produção agrícola tem se popularizado pela fácil operacionalização e a possibilidade de carregar diversos tipos de sensores. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a geração de NDVI por sensores embarcados em satélite e VANT em duas fases fenológicas de videiras e verificar a relação e a capacidade preditiva de índice de vegetação dos diferentes sensores na estimativa dos atributos químicos do solo. Uma área comercial de cultivo de uva (*Vitis vinifera*) da cultivar BRS Vitória (-9° 25.754', -40° 46.450') foi avaliada. A coleta de dados foi realizada utilizando sensores embarcados nas plataformas VANT e satélite, a partir dos quais foi gerado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) nas diferentes fases fenológicas. A caracterização química do solo foi realizada com a determinação de pH, P, K, N, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, H+Al, matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação de bases (V). Ocorreu aumento do NDVI da fase do florescimento a maturação com média de 0,32 a 0,42 para o satélite e de 0,32 a 0,39 para os dados do VANT. Os teores dos nutrientes no solo se apresentaram acima do nível crítico para a cultura. Os teores de MO e CTC foram médios e apresentaram r^2 acima de 0,15 em relação ao NDVI. Nossos resultados apontaram baixa capacidade preditiva do NDVI em relação aos atributos. No entanto, dada a significância estatística, há potencial do uso da ferramenta para o manejo da cultura, sendo necessários estudos complementares para melhorar a predição dos atributos pelos dados espectrais.

Palavras-chave: NDVI. *Vitis vinifera*. Sensoriamento Remoto. Agricultura de Precisão.

VARIATION OF VEGETATION INDEX OBTAINED THROUGH SENSORS EMBEDDED IN UAV AND SATELLITE IN THE PHENOLOGICAL PHASES OF THE VINE AND ITS CORRELATION WITH CHEMICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL

Abstract

Based on the spectral signature of the plant canopy, remote sensing has been used to estimate soil indicators directly related to fertilizer application, biological activity and organic matter content. The use of UAVs in agricultural production fields has become popular due to its easy operation and the possibility of carrying different types of sensors. The objective of this work was to evaluate the generation of NDVI by sensors embedded in satellite and UAV in two phenological phases of grapevines and to verify the relationship and the predictive capacity of the vegetation index of the different sensors in the estimation of the chemical attributes of the soil. A commercial area of grape cultivation (*Vitis vinifera*) of the cultivar BRS Vitória (-9° 25.754', -40° 46.450') was evaluated. Data collection was carried out using sensors onboard the UAV and satellite platforms, from which the vegetation index by normalized difference (NDVI) was generated in the different phenological stages. The chemical characterization of the soil was carried out with the determination of pH, P, K, N, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, H+Al, organic matter (OM), cation exchange capacity (CEC), base sum (SB) and base saturation (V). There was an increase in NDVI from flowering to maturation with an average of 0.32 to 0.42 for the satellite and from 0.32 to 0.39 for the UAV data. Nutrient contents in the soil were above the critical level for the crop. The OM and CTC contents were medium and presented r^2 above 0.15 in relation to the NDVI. Our results showed a low predictive capacity of the NDVI in relation to the attributes. However, given the statistical significance, there is potential for using the tool for crop management, requiring further studies to improve the prediction of attributes by spectral data.

Keywords: NDVI. *Vitis vinifera.* Remote Sensing. Precision Agriculture.

4.1. Introdução

Na agricultura de precisão, o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa na obtenção de significativa quantidade de dados das culturas de forma prática e rápida, permitindo a geração de informações úteis para a tomada decisão no manejo cultural (KASAMPALIS et al., 2018). Com base na assinatura espectral do dossel vegetal, o sensoriamento remoto tem sido utilizado na estimação de indicadores do solo diretamente relacionados a aplicação fertilizantes, atividade biológica e conteúdo de matéria orgânica (DIAZ-GONZALEZ et al., 2022; KOMOLAFE et al., 2021). Neste contexto, sensores embarcados em plataformas suborbitais como os veículos aéreos não tripulados (VANT) têm recebido grande atenção pela rapidez, baixo custo e qualidade na obtenção de dados de culturas agrícolas e no potencial destes na predição de atributos do solo.

A utilização dos VANT nos campos de produção agrícola tem se popularizado pela fácil operacionalização e a possibilidade de carregar diversos tipos de sensores (SILVA et al., 2021; GUNAL et al., 2021). As imagens coletadas por esses equipamentos geram ortomosaicos com informações referentes as bandas do espectro captado pelo seu sensor, pelas quais pode ser avaliado o vigor da planta, a atividade fotossintética, o estado nutricional, além de usos no monitoramento da erosão do solo, em levantamentos topográficos entre outros (HAVLIN et al., 2022; MEINEN; ROBINSON, 2021; PECINA et al., 2021).

Nas predições de atributos do solo, tem sido reportadas utilizações de índices de vegetação, os quais são combinações algébricas das bandas espectrais (KOMOLAFE et al., 2021; MAZUR et al., 2022). Dentre os índices, um dos mais amplamente utilizados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o qual é obtido pela relação entre as bandas do vermelho a 680 nm e do infravermelho próximo (NIR) a 850 nm (ROUSE, 1973). O potencial de utilização dos índices de vegetação é devido à forte relação entre o ambiente edáfico e a vegetação, tornando essa ferramenta sensível a mudanças dos atributos do solo (MAHMUDABADI et al., 2017).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a geração de NDVI por sensores embarcados em satélite e VANT em duas fases fenológicas de videiras e verificar a relação e a capacidade preditiva de índice de vegetação dos diferentes sensores na estimativa dos atributos químicos do solo.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Área experimental

O trabalho foi realizado entre junho e agosto de 2021 no município de Casa Nova, estado da Bahia, no nordeste do Brasil. A temperatura na região variou entre 21,9 ºC a 26,7 ºC, com umidade média de 54%, precipitação de 11 mm e evapotranspiração de 350 mm (LABMET/UNIVASF, 2023). Uma área comercial de cultivo de uva (*Vitis vinifera*) da cultivar BRS Vitória (-9° 25.754', -40° 46.450') foi avaliada. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo quartzarênico.

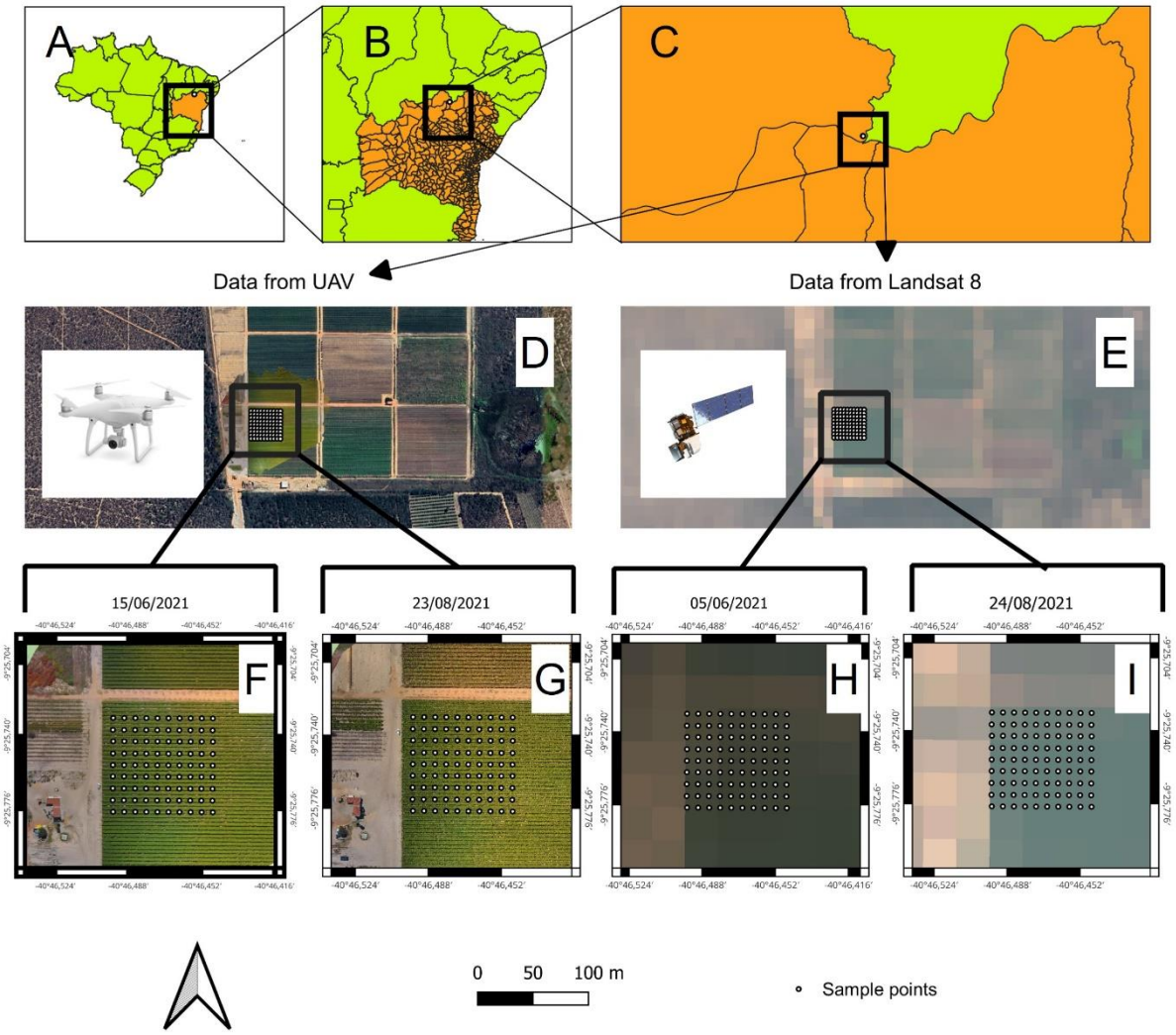
4.2.2. Sistema de cultivo

O campo experimental apresentava área de 1 ha, o cultivo era realizado com espaçamento era 3.5 m entre as linhas e 3.0 m entre as plantas. A cultivar BRS Vitória, com idade de cinco anos, foi conduzida em sistema tipo espaldeira trellis. Visando obter informações na fase de máximo acúmulo de nutrientes e maior sensibilidade na diagnose nutricional, o estudo foi realizado na fase de florescimento. Adicionalmente, considerando a fase de máximo crescimento do dossel vegetal, a investigação também foi realizada na época de colheita. O florescimento e colheita corresponderam, respectivamente, a 40 e 110 dias após a poda. A área de cultivo foi fertirrigada e apresentava produtividade média de 15 ton ha^{-1}.

4.2.3. Aquisição e processamento de dados obtidos por sensores

A coleta de dados foi realizada utilizando sensores embarcados em diferentes plataformas: VANT e satélite (Figura 14). Considerando a resolução temporal do satélite, não foi possível obter imagens sincronizadas com o voo do VANT, de modo que para a fase fenológica de florescimento as imagens foram capturadas em 5 de junho de 2021 (35 dias após a poda) e, para a colheita, em 24 de agosto de 2021 (115 dias após a poda). As imagens do VANT foram capturadas em 15 de junho de 2021 (45 dias após a poda) e 23 de agosto de 2021 (114 dias após a poda) (Figura 1).

Figura 14 – Grid amostral (10 x 10 m) e Localização do vinhedo em estudo no Brasil (A), estado da Bahia (B) e na Fazenda Santa Felicidade (C). Vista panorâmica da área de estudo capturada por VANT (D) e pelo satélite Landsat 8 (E). Captura do campo experimental em diferentes fases fenológicas por diferentes sensores (F, G, H e I)



Os dados obtidos por satélite foram computados utilizando um conjunto de imagens multiespectrais de alta resolução das bandas B4 e B5 do sensor OLI do Landsat 8/LDCM (Landsat Data Continuity Mission), as quais corresponderam ao vermelho (655-690 nm) e infravermelho próximo (780-920 nm) respectivamente. As imagens foram obtidas por meio do EarthExplore (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2019). As imagens apresentavam resolução espacial ao nível do solo de 30 m e a resolução radiométrica de 16 bits.

Para o processamento das imagens, prévia calibração radiométrica e atmosférica foi realizada visando mitigar fontes de erros como partículas suspensa e materiais na atmosfera como vapor de água, aerossóis e outro gases sobre o valor dos pixels (SONG et al., 2001; DU et al., 2002). As calibrações foram executadas pelo

plugin Semi-Automatic Classification Plugin (SPC) no Quantum GIS v3.14.16 (QGIS Development Team, www.qgis.org), o qual utilizou o método de subtração de objeto escuro (DOS) para remoção de efeitos atmosféricos (CHAVEZ, 1988). No mesmo software, via recurso de calculadora raster, foi obtido o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) por meio da equação descrita por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = \frac{\rho 4 - \rho 3}{\rho 4 + \rho 3}$$

onde ρ4 e ρ3 são os valores de refletâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente.

Na obtenção da assinatura espectral das videiras por VANT foi utilizado um quadricóptero Phantom® 4 (SZ DJI Technology Co., Ltd, Shenzhen, China) equipado com o sensor multiespectral MAPIR® Survey 3W (MAPIR, San Diego, EUA). O sensor MAPIR apresenta campo de visão (FOV) de 87° e captura imagens correspondentes a três bandas do espectro, referentes ao vermelho em 660 nm, verde em 550 nm e infravermelho próximo (NIR) em 850 nm. Cada imagem capturada recebeu uma geo-tag com a respectiva localização geográfica, obtida a partir de um receptor GNSS que acompanha a câmera.

Visando padronizar a captura de imagens, as missões de voo do VANT ocorreram de forma automatizada seguindo planos gerados pelo aplicativo DroneDeploy® (DroneDeploy, San Francisco, USA), cujos parâmetros foram: 3 m s^{-1} de velocidade da aeronave, 1.5 s de intervalo de captura de imagem, 70 m de altitude, sobreposição frontal (overlap) de 80% e lateral (sidelap) de 75%, e distância de amostragem de chão (GSD) de aproximadamente 3 cm $pixel^{-1}$. Os voos foram realizados entre 10h e 14h, considerando o período de maior incidência de luz solar, menor presença de nuvens e baixa intensidade do vento.

As imagens multiespectrais RAW armazenadas em formato TIFF foram exportadas ao software MAPIR Camera Control para correção radiométrica a partir de valores de refletância do alvo de calibração MAPIR obtidos em cada voo. Posteriormente, as imagens foram processadas no software Agisoft Metashape v1.5.2 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) que utiliza o algoritmo computacional Scale Invariante Feature Transform (SIFT) para detecção de feições idênticas em diferentes ângulos de visada de fotografias aéreas (LOWE, 1999). A partir desse software foi

gerada a nuvem de pontos, o modelo digital de superfície e o ortomosaico. No software Quantum GIS, o ortomosaico foi cortado com base no arquivo vetorial (shapefile) da parcela no campo, selecionando a área de interesse e evitando efeito de borda sobre os pixels. Para extração da assinatura espectral, considerando-se um grid amostral de 10 x 10 m, foi tomada uma área útil de 1 m² em cada ponto de cruzamento da malha de amostragem, sendo obtidos os valores da média ponderada da reflectância em um total 237.968 pixels e as informações foram utilizadas para o cálculo do NDVI.

4.2.4. Amostragem de solo

A amostragem de solo foi realizada conforme grid amostral, a qual compreendeu amostras de 10 linhas de cultivo, desconsiderando 10 m de bordadura. Nos pontos de cruzamento da grade, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm, totalizando 90 amostras simples. Os pontos de amostragem foram georreferenciados com auxílio de equipamento GNSS (GPS Garmin eTrex) e localizaram-se nas linhas de plantio. As amostras foram levadas ao laboratório, secadas ao ar, homogeneizadas e peneiradas em malha de 2.0 mm para a caracterização química.

4.2.5. Análise química de solo

As análises químicas de solo foram realizadas conforme métodos padrão (TEIXEIRA et al., 2017). O pH foi mensurado em água na relação de 1:2.5 (solo/solução). O P disponível foi determinado por colorimetria e os teores trocáveis de K^+ e Na^+ foram determinados por fotometria de chama após extração com Mehlich-1. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram determinados por titulação com EDTA após extração com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1}. A capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada a partir da soma de K^+, Na^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}. Acidez potencial (H^++Al^{3+}) foi determinada por titulação alcalimétrica do extrato após extração com solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 mol L-1 a pH 7,0. O N total foi obtido pelo método de Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). O carbono orgânico do solo foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado e a por meio de relação matemática foi obtido o teor de matérias orgânica (SILVA et al., 1999). Os teores

disponíveis de micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu) foram extraídos com DTPA e determinados por meio de espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES Perkin Elmer 7000 DV).

4.2.6. Análise estatística

Os dados foram avaliados por meio de análise descritiva no software SPSS (IBM). Foram calculados o valor máximo, o valor mínimo, a média, e o desvio padrão dos atributos químicos do solo. A análise de correlação de Pearson foi realizada para investigar as relações entre os dados do NDVI dos diferentes sensores e os atributos do solo. Visando averiguar a capacidade preditiva do índice de vegetação com relação aos atributos, foi realizada análise de regressão.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. NDVI obtido por VANT e satélite

A assinatura espectral da área experimental cultivada com a cultivar BRS Vitória foi analisada por meio do NDVI objetivando verificar a variabilidade no campo e no desenvolvimento da cultura. Os dados coletados pelo VANT (Figura 15) e pelo satélite (Figura 16) mostraram significativas distinções quanto ao detalhamento, fato relacionado a resolução espacial de cada sensor embarcado nas plataformas. Foi observado que, enquanto as imagens do satélite demonstraram resposta agregada devido a cada pixel compreender 900 m^2, os dados do VANT apresentaram maior detalhamento, visto que apresentaram 1111 pixels m^{-2}.

Figura 15 - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com VANT nas fases de floração e maturação

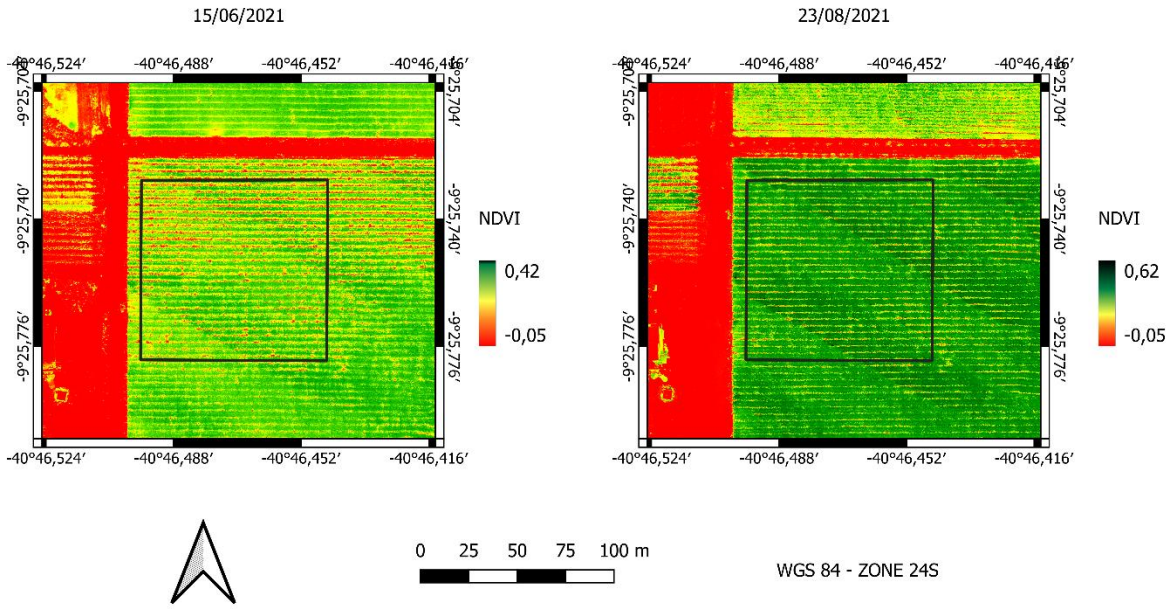
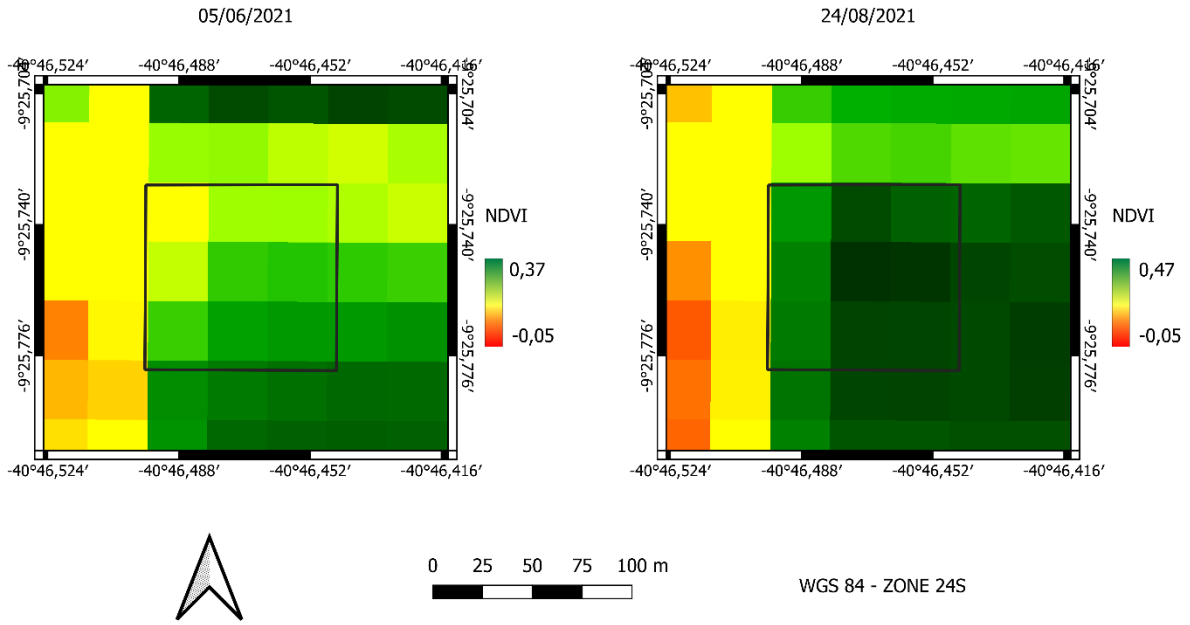


Figura 16 - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a cultura da videira determinado por meio de imagens obtidas com satélite nas fases de floração e maturação



Com relação ao desenvolvimento da cultura, ambos sensores detectaram a mesma tendência em que houve aumento do NDVI da fase de florescimento a

maturação (Tabela 8). No florescimento, o valor mínimo do índice detectado pelo VANT foi 0,25 e o máximo 0,37, enquanto o sensor do satélite detectou uma variação de 0,23 a 0,42. Na colheita, para o VANT o valor máximo e mínimo foram, respectivamente, 0,32 e 0,48 e para o satélite foram 0,37 e 0,47. Entre os sensores, na fase de florescimento tanto o VANT quanto o satélite apresentaram a mesma média para o valor de NDVI (0,32), no entanto, os períodos de coleta de dados foram distintos. Na colheita, o satélite detectou valor médio do índice 10% superior ao obtido pelo VANT.

Tabela 8 - Estatística descritiva do NDVI de área experimental cultivada com *Vitis vinifera* cv. NBS Vitória no Vale do São Francisco, Brasil, em diferentes fases fenológicas

Plataforma	Média	Mediana	Minímo	Máximo	Desvio	CV
			Florescimento			
VANT	0,32	0,33	0,25	0,37	0,02	8,89
Satélite	0,32	0,33	0,23	0,42	0,05	15,89
			Maturação			
VANT	0,39	0,39	0,32	0,48	0,03	8,11
Satélite	0,43	0,44	0,37	0,47	0,02	6,98

Diferentemente dos nossos resultados, Gomes et al. (2021), avaliando o uso de VANT e satélite na avaliação de estágios fenológico da videira, observaram redução média de 15% nos valores de NDVI da fase floração a maturação dos frutos. Adicionalmente, os mesmos autores observaram valores mais altos do índice detectados pelo VANT. No presente trabalho, a aquisição de dados foi realizada no início da fase de florescimento, ou seja, a planta continuava em crescimento e fechamento do dossel, de modo que se esperava aumento no NDVI devido a maior atividade fotossintética. Corroborando nossos achados, Ahmad et al. (2022), avaliando o uso de dados de VANT e satélite para estimativa da produtividade da cultura de grão-de-bico, observaram elevação média de 20% nos índices SAVI e NDVI da floração até o estágio de máximo de crescimento vegetativo.

A maior amplitude nos valores de NDVI observada nos dados do satélite podem estar relacionadas ao fato que, visto que o pixel corresponde à média ponderada das reflectâncias, a região sul fora da área experimental apresentava altos valores do índice, o que pode ter afetado os dados extraídos, ou seja, a resolução decamétrica da plataforma apresentou sensibilidade em detectar a variabilidade por ser uma área

experimental pequena. Neste contexto, nossos resultados demonstraram que o uso do VANT se apresentou como melhor ferramenta para geração do índice de vegetação, visto a melhor resolução espacial, baixa influência das condições atmosféricas e pela detecção mais precisa da resposta espectral da cultura. Similar ao presente estudo, outros trabalhos avaliando a cultura da uva têm demostrado dados mais precisos com índices de vegetação gerados com dados coletados por VANT (POBLETE-ECHECERRIA et al., 2017; GOMES et al., 2021; KHALIQ et al., 2019).

4.3.2. Atributos químicos do solo

Conforme interpretação dos atributos químicos do solo para fins de fertilidade apresentados por Sobral et al. (2015), o teor de P estava 10 vezes acima do nível crítico, enquanto o K^+ e o Ca^{2+} apresentaram valor 1,8 e 1,5 acima faixa adequada (Tabela 9). Os teores de Fe e Zn foram classificados como altos, estando, no mínimo, 1,4 vez acima do nível crítico. A MO e a CTC apresentaram teores enquadrados como médios, enquanto a saturação por bases (V) apresentou valor alto.

Tabela 9 - Caracterização química do solo, na profundidade de 0 - 20 cm, de área cultivada com a cultivar de *Vitis vinifera* NRS Vitória no Vale do São Francisco, Brasil

Variável	Média	Mediana	Minímo	Máximo	Desvio	CV
pH	7,45	7,42	4,79	10,66	1,13	15,16
P (mg dm^{-3})	222,03	180,23	31,59	672,15	158,34	71,31
K^+ (mg dm^{-3})	0,84	0,71	0,13	2,49	0,61	72,97
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	4,55	4,49	1,73	9,50	1,55	34,06
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	0,76	0,68	0,05	1,93	0,51	67,10
N (g mg^{-1})	1,43	1,37	0,17	2,41	0,48	33,56
H + Al (cmolc dm^{-3})	1,30	1,25	0,10	4,04	0,88	67,69
MO (g kg^{-1})	17,29	16,74	5,34	32,74	5,76	33,31
SB (cmolc dm^{-3})	6,60	6,34	2,96	17,89	2,33	35,30
CTC (cmolc dm^{-3})	7,91	7,64	3,70	20,08	2,63	33,24
V (%)	83,84	81,82	64,57	100,00	9,91	11,82
Fe (mg kg^{-1})	143,86	137,85	31,97	381,62	75,80	52,68
Zn (mg kg^{-1})	18,17	16,75	3,89	52,84	9,69	53,50
Mn (mg kg^{-1})	26,36	23,94	8,70	59,60	10,75	40,83
Cu (mg kg^{-1})	4,24	4,03	1,36	9,82	1,75	41,23

Considerando a classe do solo, cuja fertilidade natural é baixa, conclui-se que os altos teores dos nutrientes provêm da fertilização no manejo das videiras. As adições excessivas de fertilizantes podem ocasionar desequilíbrios nutricionais e ambientais com queda de produção frutos, com a consequentes prejuízos financeiro. Constatação similar foi realizada por Wang et al. (2019), os quais observaram redução nos teores de antocianas, brix, açúcares solúveis e outras variáveis relacionadas a qualidade dos frutos com o excesso da adubação. Outros autores observaram que o superdosagens na adubação causou crescimento vegetativo excessivo e amadurecimento tardio após a frutificação (NEILSEN et al., 2010). Outros trabalhos constataram que a fertilização excessiva ocasionou a salinização do solo, com a consequente inibição do crescimento da videira (LI et al., 2022).

4.3.3. Correlação entre o NDVI e os atributos químicos do solo

Visando analisar em qual estágio há melhor relação entre o atributo do solo e o sensor, foram realizadas as análises de correlação. No estágio do florescimento, foram observadas correlações positivas e significativas da MO ($r = 0,368, p < 0.01$) e da CTC ($r = -0, 310, p < 0.01$) com o NDVI obtido por VANT (Tabela 10). Adicionalmente, o Mn apresentou correlação negativa e significativa com o índice de vegetação gerado pelo VANT. De maneira distinta, o NDVI obtido por satélite apresentou correlação significativa e negativa com o K^+ ($r = -0,220, p < 0.05$), Fe ($r = -0, 400, p < 0.01$). No estágio maturação, o NDVI gerado a partir do VANT apresentou correlação positiva com a MO ($r = 0,402, p < 0.01$) e com a CTC ($r = 0,427, p < 0.01$), porém foram observadas correlações negativas com N, P, K^+, Mn e Fe.

Baio et al. (2019), avaliando a correlação do NDVI gerado por dados do Landsat e atributos químicos do solo em área cultivada com algodão, também verificaram correlações negativas entre os teores dos nutrientes e o índice vegetação (r = 0,30 p<0,05). Da mesma forma, Demattê et al. (2017), avaliando atributos do solo sob vegetação natural por meio do sensoriamento remoto, observaram correlações negativas do NDVI com o teor de nutriente no solo, dentre eles o P ($r = -0,19$) e K ($r = -0,18$). Os mesmos autores observaram correlação significativas e positivas da MO e CTC com o NDVI, apresentando r igual a 0,16 e 0,19, respectivamente. Com objetivo de realizar o mapeamento digital da capacidade de troca catiônica em solos sob cultivos agrícolas, floretas e pastagens, Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2015)

observaram que até a profundidade de 30 cm, a CTC apresentou correlação positiva e significativa com o NDVI com r igual a 0,51 ($p<0,01$), constataram que o fato está relacionado a essa profundidade ser efetivamente explorada pelas raízes e, portanto, a planta é influenciada diretamente pelo atributo.

As correlações observadas entre a MO e o NDVI no presente trabalho pode estar relacionada a este atributo ser uma das principais fontes de N às plantas. O N, por fazer parte das moléculas de clorofila, as quais são integrantes das antenas nas membranas dos tilacóides nos cloroplastos, atua diretamente na absorbância e reflectância da radiação interceptada afetando significativamente os dados coletados pelos sensores remotos.

Correlações negativas entre teor de alguns nutrientes e o índice de vegetação podem estar relacionadas às concentrações em excesso desses atributos no solo com consequentes desequilíbrios nutricionais e efeito direto sobre o metabolismo vegetal e na sua capacidade fotossintética, afetando negativamente na reflectância da banda do infravermelho próximo e com redução do NDVI.

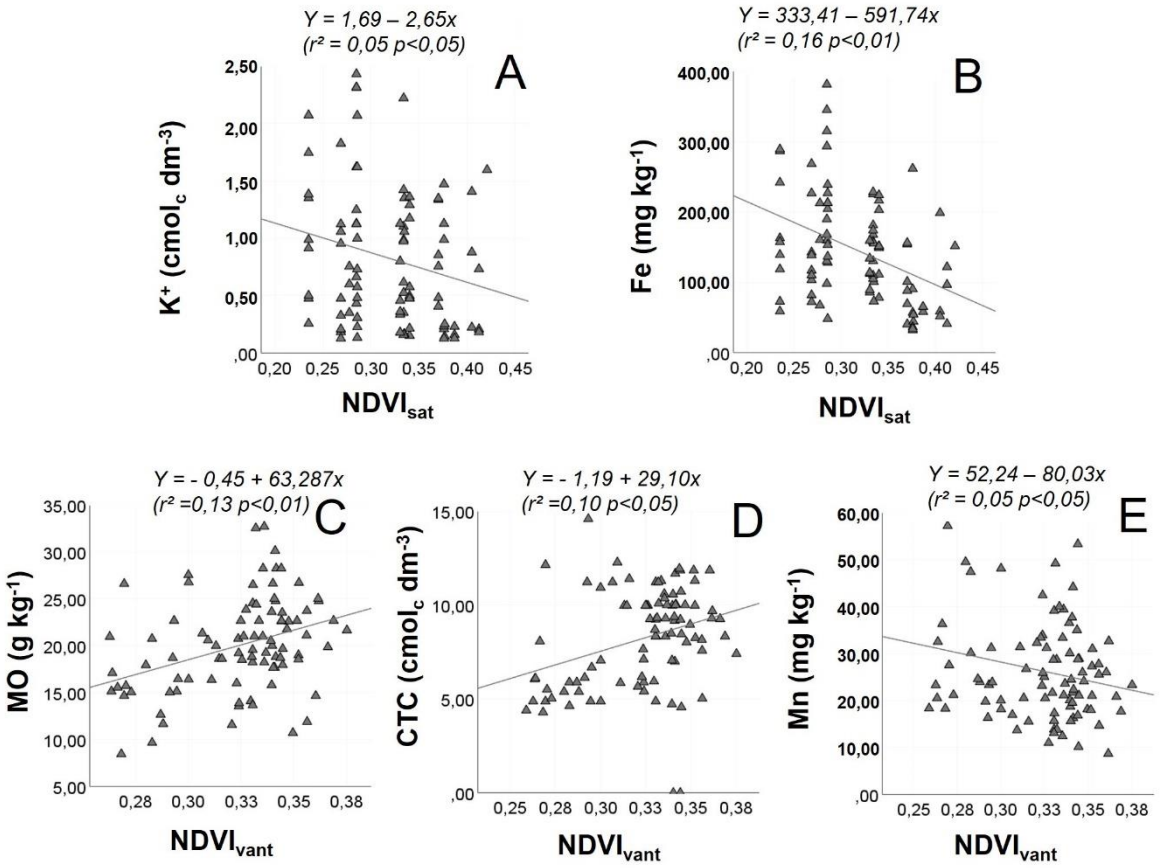
Tabela 10 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson para as propriedades do solo da área de estudo e o NDVI obtidos por por VANT e satélite em diferentes fases fenológica de videiras cultivadas no semiárido do Brasil.

Índice de vegetação	pH	N	P	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H+Al	MO	SB	CTC	V	Mn	Cu	Fe	Zn
									Florescimento						
$NDVI_{VANT}$	0,052	-0,138	-0,088	-0,117	0,001	-0,060	-0,083	**0,368****	-0,101	**0,310****	0,037	**-0,215***	-0,154	-0,131	-0,087
$NDVI_{sat}$	0,056	-0,144	-0,060	**-0,220***	0,113	-0,115	-0,103	-0,079	-0,041	-0,039	0,063	-0,098	0,052	**-0,400****	-0,189
									Maturação						
$NDVI_{VANT}$	0,150	**-0,278****	**-0,243***	**-0,219***	-0,147	-0,001	-0,159	**0,402****	-0,144	**0,427****	0,103	**-0,317****	-0,172	-0,139	-0,173
$NDVI_{sat}$	0,107	-0,138	-0,009	0,033	0,056	-0,010	-0,045	0,144	0,038	-0,010	0,035	-0,164	-0,069	-0,147	-0,011

** e * são significativos a0,01 e 0,05, respectivamente. pH: reação do solo; N: nitrogênio; P: Fósforo disponível; K+: Potássio trocável; Ca^{2+}: cálcio trocável; Mg^{2+}: magnésio trocável: Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco.

De forma complementar aos dados de correlação, foi realizada a análise de regressão dos atributos químicos do solo e o NDVI gerado por dados de VANT e satélite. De modo geral, todos os coeficientes de determinação estiveram abaixo de 0,20, o que indica baixa correlação com os preditores. O NDVI obtido por imagens de satélite explicou 5% da variação do K^+ ($r^2 = 0,05$ $p<0,05$) e 16% da variação do Fe ($r^2 = 0,16$ $p<0,01$) (Figura 17A e 17B). Com relação aos dados obtidos por VANT, foi observada relação significativa com a matéria orgânica, na qual o índice de vegetação explicou 13% da variação da variável dependente (Figura 17C). A CTC e o Mn apresentaram variação explicada pelo NDVI obtido por VANT com r^2 igual a 0,10 e 0,05 *(p<0,05),* respectivamente (Figura 17D e 17E).

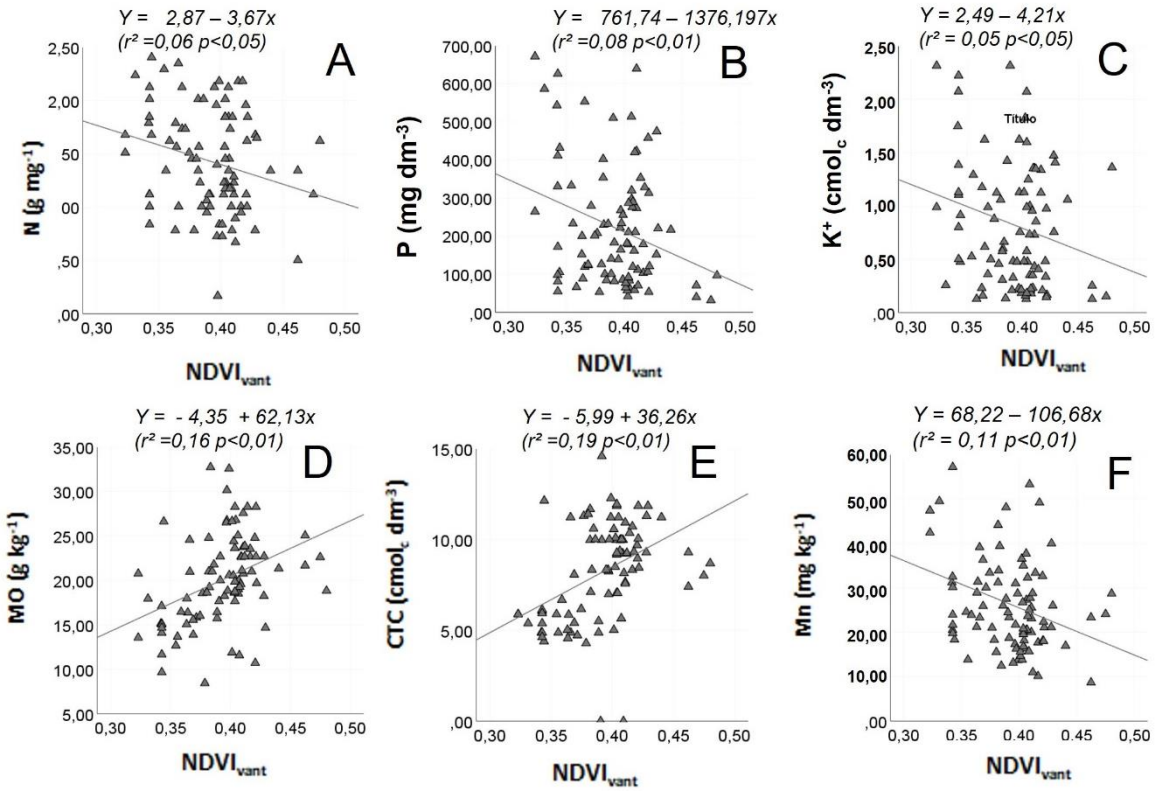
Figura 17 - Relação entre atributos químicos do solo cultivado com a cultivar de uva BRS Vitória e o NDVI gerado por VANT e satélite na fase de florescimento



No estágio de maturação, não foram observadas regressões com resultados significativos entre os atributos do solo e o NDVI gerado por imagens do satélite Landsat. Houve relação linear significativa entre o NDVI obtido por VANT e os teores

do N ($r^2 = 0,06$ $p<0,05$), do P ($r^2 = 0,08$ $p<0,01$) e do K^+ ($r^2 = 0,05$ $p<0,05$) (Figura 18). Com os maiores coeficiente de determinação, a MO, a CTC e o Mn apresentaram variações explicadas pelo NDVI gerado pelo VANT com r^2 igual a 0,16, 0,19 e 0,11, respectivamente.

Figura 18 - Relação entre atributos químicos do solo cultivado com a cultivar de uva BRS Vitória e o NDVI gerado por VANT na fase de maturação



Similarmente aos nossos resultados, Mazur et al. (2022), avaliando a relação entre o NDVI e atributos químicos do solo, observaram relações lineares significativas, porém fracas, com teores de P ($r^2 = 0,09$), K ($r^2 = 0,20$) e Mg ($r^2 = 0,03$). Utilizando dados espectrais e técnicas de machine learning na predição de atributos do solo, John et al. (2020) não observaram relação significativa entre os nutrientes e o NDVI, porém verificou modelos matemáticos capazes de explicar 51% da variação da MO a partir deste índice de vegetação. Avaliando a capacidade preditiva de atributos químicos por meio de sensor remoto, Komolafe et al. (2021) obtiveram modelos de regressão polinomal contendo o NDVI como variável independente capazes de explicar variação da MO, N, P e K em 66%, 59%, 46%, respectivamente.

Considerando que o solo da área experimental possui naturalmente baixa capacidade de retenção de cátions, a adição de matéria orgânica se torna essencial para o aumento das cargas. Neste ambiente, espera-se incremento na biomassa e na atividade fotossintética nas plantas cultivadas nos locais com teores mais elevados de MO, com consequente maior NDVI (GUO et al., 2017). Constatações similares foram feitas por Safanelli et al. (2021), avaliando atributos do solo a partir de dados do Landsat, constataram padrões de distribuição espacial entre a variável carbono orgânico do solo e a CTC. Adicionalmente, os mesmos autores, a partir dos dados espectrais, observaram modelos preditivos com r^2 de 0,50 para a CTC.

Nossos resultados demonstraram maior sensibilidade dos dados adquiridos pelo VANT comparado aos do satélite. Outros autores têm feito a mesma constatação em trabalhos com a cultura do algodão (LACERDA et al., 2022), do milho (FURLANETTO et al., 2023) e do trigo (RASMUSSEN et al., 2021). No entanto, há ressalvas na utilização dos VANT, visto que apesar do bom custo-benefício, melhor resolução espacial e temporal, esses equipamentos possuem limitações para levantamento de áreas extensas. Além disso, o uso de índices de vegetação obtidos seja por VANT ou satélite e sua relação com os atributos químicos do solo ainda devem ser mais bem estudados, pois apesar do potencial na geração de resultado e na utilização do manejo agrícola, foram obtidos baixos coeficientes de determinação.

4.4. Conclusão

O presente trabalho avaliou a variação do índice de vegetação por diferença normalizada, gerado a partir de VANT e de satélite, na fase do florescimento e maturação da cultura da videira e sua relação com os atributos químicos do solo. O NDVI obtido por ambas as plataformas apresentou elevação da fase de florescimento para a maturação. Os mapas gerados demonstraram a variabilidade do vigor das plantas, porém os dados do VANT pela melhor resolução espacial foram mais sensíveis a variação, diferente do sensor do satélite que apresentou dados de forma agregada.

Os teores dos nutrientes no solo se apresentaram acima do nível crítico para a cultura da videira. A capacidade de troca catiônica e o teor de matéria orgânica foram

os únicos atributos enquadrados na classificação adequada, além de apresentarem relação linear significativa com o NDVI gerado a partir dos dados do VANT nas duas fases fenológicas avaliadas. Foram encontrados baixos índices de determinação nas regressões, apontando baixa capacidade preditiva do NDVI em relação aos atributos. No entanto, dada a significância estatística, há potencial do uso da ferramenta para o manejo da cultura, sendo necessários estudos complementares para melhorar a predição dos atributos pelos dados espectrais.

Referências bibliográficas

AHMAD, N.; IQBAL, J.; SHAHEEN, A.; GHFAR, A.; AL-ANAZY, M. M.; OULADSMANE, M. Spatio-temporal analysis of chickpea crop in arid environment by comparing high-resolution UAV image and LANDSAT imagery. **Int. J. Environ. Sci. Technol**., v. 19, p. 6595–6610, 2022. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13762-021-03502-z

BAIO, F. H. R.; NEVES, D. C.; TEODORO, P. E. Soil chemical attributes, soil type, and rainfall effects on normalized difference vegetation index and cotton fiber yield variability. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2910-2919, 2019. https://doi.org/10.2134/agronj2019.05.0375

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3

DEMATTÊ, J. A.; SAYÃO, V. M.; RIZZO, R.; FONGARO, C. T. Soil class and attribute dynamics and their relationship with natural vegetation based on satellite remote sensing. **Geoderma,** v. 302, p. 39-51, 2017. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.019

DU, Y.; TEILLET, P. M.; CIHLAR, J. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection **Remote Sensing. Environment**, v. 82, p. 123-134, 2002. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00029-9

GOMES, M. D. A.; ROMÁN, R. M. S.; TORRES-RUA, A.; ÁLVES, É. S.; MCKEE, M. Comparação do NDVI obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 605-619, 2021. https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619

GUO, L.; ZHAO, C.; ZHANG, H.; CHEN, Y.; LINDERMAN, M.; ZHANG, Q.; LIU, Y. Comparisons of spatial and non-spatial models for predicting soil carbon content based on visible and near-infrared spectral technology. **Geoderma**, v. 285, p. 280–292, 2017. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.010

HAVLIN, J. L.; AUSTIN, R.; HARDY, D.; HOWARD, A.; HEITMAN, J. L. Nutrient Management Effects on Wine Grape Tissue Nutrient Content. **Plants**, v. 11, n. 2, p. 158, 2022. https://doi.org/10.3390/plants11020158

FURLANETTO, J.; DAL FERRO, N.; LONGO, M.; SARTORI, L.; POLESE, R.; CACEFFO, D.; NICOLI, L.; MORARI, F. LAI estimation through remotely sensed NDVI following hail defoliation in maize (*Zea mays* L.) using Sentinel2 and UAV imagery. **Precision Agriculture,** p. 1-25, 2023. https://doi.org/10.1007/s11119-023-09993-9.

RASMUSSEN, J.; AZIM, S.; BOLDSEN, S. K.; NITSCHKE, T.; JENSEN, S. M.; NIELSEN, J.; CHRISTENSEN, S. The challenge of reproducing remote sensing data from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of management zones and precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 834–851, 2021. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09759-7

SAFANELLI, J. L.; DEMATTÊ, J. A.; CHABRILLAT, S.; POPPIEL, R. R.; RIZZO, R.; DOTTO, A. C.; SILVEIRA, N. E. Q.; MENDES, W. S; BONFATTI, B. R.; RUIZ, L. F. C.; CATEN, A. T.; DALMOLIN, R. S. Leveraging the application of Earth observation data for mapping cropland soils in Brazil. **Geoderma**, v. 396, p. 115042, 2021. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115042

KASAMPALIS, D.; ALEXANDRIDIS, T.; DEVA, C.; CHALLINOR, A.; MOSHOU, D.; ZALIDIS, G. Contribution of remote sensing on crop models: a review. **J. Imaging**, v. 4, n. 4, p. 52, 2018. https://doi.org/10.3390/jimaging4040052.

KHALIQ, A.; COMBA, L.; BIGLIA, A.; RICAUDA AIMONINO, D. R.; CHIABERGE, M.; GAY, P. Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. **Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 436, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11040436

LACERDA, L. N.; SNIDER, J.; COHEN, Y.; LIAKOS, V.; LEVI, M. R.; VELLIDIS, G. Correlation of UAV and satellite derived vegetation indices with cotton physiological parameters and their use as a tool for scheduling variable rate irrigation in cotton. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 2089–2114, 2022. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09948-6.

LABMET/UNIVASF. **Dados Climáticos Diários observados nas Estações Meteorológicas da UNIVASF de Petrolina e Juazeiro**. Disponível em: <univasf.edu.br>. Acesso em: 31 jan 2023.

LOWE, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. In:_____. **The proceedings of the seventh IEEE international conference on.** Corfu: IEEE XPLORE, 1999. p.1150-1157, DOI**:** 10.1109/ICCV.1999.790410

MAHMOUDABADI E.; KARIMI A.; HAGHNIA GH.; SEPEHR A. Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. **Environ Monit Assess**, v. 189, n. 10, p. 1–20, 2017. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6197-7

MAZUR, P.; GOZDOWSKI, D.; WNUK, A. Relationships between Soil Electrical Conductivity and Sentinel-2-Derived NDVI with pH and Content of Selected Nutrients**. Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 354, 2022. https://doi.org/10.3390/agronomy12020354

MEINEN, B. U.; ROBINSON, D. T. Agricultural erosion modelling: evaluating USLE and WEPP feld-scale erosion estimates using UAV time-series data**. Environ Model Software**, v. 137, p. 104962, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104962

NEILSEN, G.H.; NEILSEN, D.; BOWEN, P.; BOGDANOFF, C.; USHER, K. Effect of timing, rate, and form of N fertilization on nutrition, vigor, yield, and berry yeast-assimilable N of grape. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 61, n. 3, p.327–336, 2010. https://doi.org/10.5344/ajev.2010.61.3.327

PECINA, M. V.; BERGAMO, T. F.; WARD, R. D.; JOYCE, C. B.; SEEP, K. A novel UAV-based approach for biomass prediction and grassland structure assessment in coastal meadows. **Ecological Indicators**, v. 122, p. 107227, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107227

POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; OLMEDO, G.F.; INGRAM, B.; BARDEEN, M. Detection and Segmentation of Vine Canopy in Ultra-High Spatial Resolution RGB Imagery Obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Case Study in a Commercial Vineyard. **Remote Sensing,** v. 9, n. 3, p. 268, 2017. https://doi.org/10.3390/rs9030268

ROUSE, J.; HASS, R.; SCHELL, J.; DEERING, D. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In:_____. **Third ERTS Symposium.** Greenbelt: NASA, 1974. p. 309–317.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; ABREU JUNIOR, J. S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista da Universidade de Alfenas**, v. 5, n. 1, p. 21-26, 1999.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros**,** 2015. p. 13.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 230-244, 2001. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3

SUN, N.; WANG, L.; SUN, Y.; LI, H.; LIAO, S.; DING, J.; WANG, G.; SUO, L.; LI, Y.; ZOU, G.; HUANG, S. Positive Effects of Organic Substitution in Reduced-Fertilizer Regimes on Bacterial Diversity and N-Cycling Functionality in Greenhouse Ecosystem. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 24, p. 16954, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph192416954

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R. Digital mapping of cation exchange capacity using genetic programming and soil depth functions in Baneh region, Iran**. Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 109-126, 2016. https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1038253

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solos, plantas e outros materiais,** v. 5, p. 174, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise do solo.** 3 ed. rev. e ampl. Brasilia: Embrapa, 2017. p. 573.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY**. EarthExplorer**. Disponível em:https://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso em: 22 dez 2022

WANG, R.; QI, Y.; WU, J.; SHUKLA, M. K.; SUN, Q. Influence of the application of irrigated water-soluble calcium fertilizer on wine grape properties. **Plos One**, v. 14, n. 9, p. e0222104, 2019. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222104

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferentes cultivares apresentaram distinto comportamentos quanto a assinatura espectral. Os dados do dossel das videiras, obtidos por sensor remoto embarcado no VANT, utilizados na geração dos índices de vegetação se mostraram capazes de avaliar os nutrientes na planta e alguns atributos do solo. No entanto, dados os baixos coeficiente de determinação, o uso dessas informações deve ser realizado com cautela no manejo nutricional da cultura. São necessárias avaliações adicionais, com a investigação do uso de covariáveis ou a utilização de outras bandas espectrais além do infravermelho e o vermelho para aumento da capacidade preditiva dos índices em relação atributos do solo e nutrientes nas folhas.