

**Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia Universidade
Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias**

Mestrado em Tecnologias em Agricultura de Precisão

Dissertação

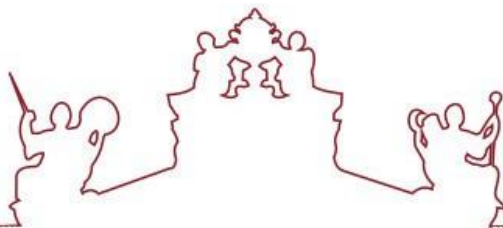
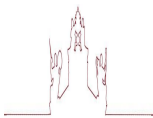
**Monitorização e Avaliação da Produção de Milho utilizando
Tecnologias de Agricultura de precisão: Estudo de caso
Huíla-Angola**

Hermenegildo Aurélio Rodrigues Sawambo

Orientador(es) | Adélia Maria Oliveira de Sousa

José Rafael Marques da Silva

Évora 2023



**Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia Universidade
Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias**

Mestrado em Tecnologias em Agricultura de Precisão

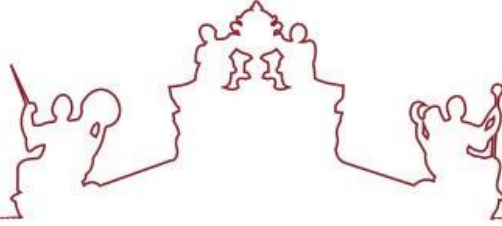
Dissertação

**Monitorização e Avaliação da Produção ao de Milho utilizando
Tecnologias de Agricultura de Precisão: Estudo de caso Huíla-
Angola**

Hermenegildo Aurélio Rodrigues Sawambo

Orientador(es) | Adélia Maria Oliveira de Sousa
José Rafael Marques da Silva

Évora 2023



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | João Manuel Serrano (Universidade de Évora)

Vogais | Adélia Maria Oliveira de Sousa (Universidade de Évora) (Orientador)
Luís Leopoldo Silva (Universidade de Évora) (Arguente)

Agradecimentos

Começo por agradecer a Deus por ter guiado os meus passos durante este percurso académico. As minhas palavras de agradecimento estendem-se também aos meus orientadores, Profa. Doutora Adélia Maria Oliveira de Sousa e ao Prof. Doutor José Rafael Marques da Silva, pela constante disponibilidade, cooperação, atenção dispensada e confiança que mostraram ao longo da elaboração. Foi um Prazer.

À minha Esposa Sália Sawambo, por ter aguentado com firmeza as minhas ausências durante a formação e pelo suporte, dedicação incentivo para que lutasse pelos meus objetivos. Aos meus pais e aos meus irmãos pela educação e incentivo ao longo do percurso formativo.

Aos professores do Mestrado em Tecnologias em Agricultura de Precisão, especialmente Professores (as) Doutora Maria Fernandes Pessoa, Doutora Manuela Simões, Doutor João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Doutor Luís Leopoldo Silva. Muito Obrigado.

Aos meus colegas do mestrado agradeço a todos especialmente à Mafalda da Costa, Manuel Verdasca e ao Rafael Pires. Muito obrigado, malta.

Ao Eng. João Saraiva, Diretor Geral da Empresa Jardins da Yoba por permitir a realização deste estudo num dos seus campos. Ao Prof. Doutor Adalberto Chiquete por dar-me todo o suporte técnico e apoio moral.

Aos meus amigos, que muitos contribuíram para o meu sucesso, muito obrigado manos...

Monitorização e Avaliação da Produção de Milho utilizando Tecnologias de Agricultura de precisão: Estudo de caso Huíla-Angola.

Resumo

Devido ao alto crescimento demográfico que o mundo enfrenta, surge uma urgente necessidade de aumentar os níveis de produtividade agrícola, para garantir a segurança alimentar. Este facto é realçado no continente africano em que todos os países estão em via de desenvolvimento. Neste sentido, foi realizado um estudo em Angola, na província da Huíla, município da Chibia, numa área de 25 hectares, com o objetivo de utilizar os dados de deteção remota para avaliar e monitorizar a cultura do milho, e validar um modelo para identificar as variáveis que mais influenciam na eficiência dos fatores de produção. Com base nos resultados obtidos a partir dos dados recolhidos no campo, que se correlacionaram com os valores do índice de vegetação NDVI, o estudo permitiu concluir que as variáveis que influenciam os fatores de produção são as técnicas agrícolas, a densidade de sementes, a acidez do solo e a deficiência de fósforo. Com base nestes resultados, propôs-se a gestão da variabilidade dos fatores de produção através da aplicação de uma taxa variada.

Palavras-chave: Milho, Deteção Remota, Produtividade, Agricultura de Precisão.

Monitoring and Evaluation of Maize Production using Precision Agriculture Technologies: Case Study Huíla-Angola.

Abstract

Due to the high population growth the world is facing, there is an urgent need to increase agriculture productivity levels. Bearing in mind that as the world's population increases, it becomes essential to produce more to ensure food security. e This fact is particularly emphasized on the African continent where all the countries are in a developmental phase. In this context, a study was conducted in Angola, in the Huíla province, Chibia municipality, covering an area of 25 hectares, with the objective to use remote sensing data to assess and monitor maize cultivation and validate a model to identify the variables that most influence the efficiency of production factors. Based on the results obtained from the data collected in the field, which were correlated with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values, the study concluded that the variables influencing production factors are agricultural techniques, seed density, soil acidity, and phosphorus deficiency. Based on this results, it was proposed to manage the variability of production factors through the application of variable rates for all factors, in order to enhance corn crop productivity.

Keywords: Corn, Remote Sensing, Productivity Precision Agriculture.

Índice Geral

| | |
|---|----|
| Agradecimentos..... | IV |
| Resumo..... | V |
| Abstract..... | VI |
| Índice de Tabelas..... | IX |
| Índice de Figuras..... | X |
| Lista de Abreviaturas..... | XI |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 2. Revisão bibliográfica..... | 3 |
| 2.1. Detecção Remota..... | 3 |
| 2.2. Índices de Vegetação..... | 5 |
| 2.3. Detecção Remota no Estudo do Solo..... | 8 |
| 2.4. Detecção Remota no Conforto Hídrico do Milho..... | 10 |
| 2.5. Detecção Remota para Nutrição Vegetal..... | 11 |
| 2.6. Detecção Remota e Estimativa da Produtividade..... | 12 |
| 2.7. Detecção Remota na Densidade de Plantas do Milho..... | 13 |
| 3. Material e Métodos..... | 16 |
| 3.1. Caracterização da Área de Estudo..... | 16 |
| 3.2. Materiais..... | 18 |
| 3.3. Metodologia..... | 19 |
| 3.4. Análises de Solo..... | 20 |
| 3.5. Tecnologia Utilizada..... | 22 |
| 3.6. Itinerário Técnico da Cultura/Ensaio..... | 22 |
| 3.7. Método da Medição das Características Biométricas das Plantas..... | 23 |
| 3.8. Tratamento Estatístico e Análise de Variância..... | 25 |
| 4. Resultados e Discussão..... | 26 |
| 4.1. Relação da Produtividade x NDVI..... | 27 |
| 4.2. Análise de correlação vs NDVI..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 4.3. Análise da Variância (ANOVA)..... | 36 |
| 4.4. Propostas para Otimização da Produtividade do Milho | 41 |
| 5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros..... | 46 |
| 6. Referências Bibliográficas | 48 |
| 7. Anexos..... | 55 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2- Características das bandas do satélite | 19 |
| Tabela 3- Resultados Análise dos Solos | 21 |
| Tabela 4- Itinerário Técnico da Cultura/Ensaio | 23 |
| Tabela 5- Anova para as diferentes variáveis | 37 |
| Tabela 6- Anova para a Zona 1 e Zona 2 | 38 |
| Tabela 7- Anova para Zona 1 e Zona 3 | 39 |
| Tabela 8- Anova para Zona 2 e 3 | 40 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1- Estádios fenológicos do milho (adaptado de Savandra 2020)..... | 15 |
| Figura 2- Mapa de enquadramento da parcela em estudo | 17 |
| Figura 3- Bandas multiespectrais do satélite Sentinel-2 | 18 |
| Figura 4- Carta do NDVI com indicação dos pontos de amostragem..... | 20 |
| Figura 5- Medição de um dos pontos de amostragem..... | 21 |
| Figura 6- Marcação de um dos pontos de amostragem..... | 22 |
| Figura 7- Medições da altura das plantas | 23 |
| Figura 8- Fotografias demonstrativas das secagem e pesagem das plantas | 24 |
| Figura 9- Carta do NDVI com as zonas de gestão | 26 |
| Figura 10- Relação entre a produtividade e o NDVI..... | 28 |
| Figura 11- Relação entre a Altura da Planta e o NDVI | 29 |
| Figura 12- Relação entre a Biomassa e o NDVI | 30 |
| Figura 13- Relação entre Comprimento da Espiga e o NDVI..... | 31 |
| Figura 14- Relação entre o Peso da Espiga e o NDVI | 32 |
| Figura 15- Relação entre o Peso de 100 Grãos e o NDVI..... | 33 |
| Figura 16- Relação entre o N° de Grão/Linha e o NDVI | 34 |
| Figura 17- N° Linha/Espiga..... | 35 |
| Figura 18- Mapa VRT Aplicação de Calcário | 42 |
| Figura 19- Mapa VRT Aplicação de Fósforo | 43 |
| Figura 20- Mapa VRT- Aplicação de Sementes | 44 |
| Figura 21- Mapa VRT -Adubação com NPK..... | 45 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|------------------|---|
| ARVI | Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente |
| CIred-edg | Eclorofila red-edge |
| CWSI | Crop Water Stress Index |
| DR | Deteção Remota |
| ETM+ | Enhanced Thematic Mapper Plus |
| GNDVI | Green Normalized Difference Vegetation Index |
| GSI | Índice de Separação Global |
| IVAS | Índice de Vegetação Ajustado ao Solo |
| IVDN | Índice de vegetação normalizada |
| Kcb | Coefficiente cultural basal |
| KML | Keyhole Markup Language |
| MINAGRI | Ministério da Agricultura e Florestas |
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| NDWI | Normalized Difference Water Index |
| OLI | Operational Land Imager |
| RF | Random Forests |
| RGB | Red, Green, Blue |
| SPAD | Soil Plant Analysis Development |
| SVM | Support Vector Machines |
| TIRS | Thermal Infrared Sensor |
| VANT | Veículos Aéreos não Tripulados |
| AP | Agricultura de Precisão |
| VRT | Variable Rate Technology |

1. Introdução

A população africana é uma das que mais cresce no mundo nos últimos anos e consigo uma grande pressão na produção de alimentos, devido aos elevados níveis de fome e pobreza, principalmente na África subsariana, onde a insegurança alimentar tem um crescimento exponencial devido às alterações climáticas e à degradação da terra. A produção de cereais com maior enfoque na produção de milho é um caminho adequado para mitigar este fenómeno.

A cultura do milho, tem sido considerada mundialmente como o grão-chave para o consumo humano e animal. Estima-se que até 2050, o consumo de milho nos países em desenvolvimento duplicará. Prevê-se também que a partir de 2025 a cultura do milho tornar-se-á o cereal com maior produção à escala global. No contexto africano em 2006, em Abuja, a Cimeira sobre a Segurança Alimentar em África, identificou o milho, como um dos alimentos fundamentais para alcançar a segurança alimentar e a redução da pobreza.

Em África, a produção dos alimentos é maioritariamente feita por pequenos produtores que não têm acesso a grandes tecnologias de produção, logo com a inserção das novas tecnologias, os agricultores poderão garantir um aumento significativo da sua capacidade produtiva.

Angola é um país com excelentes condições edafoclimáticas para a prática agrícola, embora a economia nacional seja maioritariamente suportada pelos recursos naturais não renováveis (indústria extrativa, petróleo, diamantes e gás natural); o sector agrário tem uma contribuição importante na economia do País, sendo o 3.º sector a contribuir para o valor do produto interno bruto nacional, assim como o que engloba o maior número de trabalhadores.

Com uma extensão territorial de terras aráveis de 35.000.000 ha, apenas cerca de 5.304.699 ha são cultivados (MINAGRI 2021) ou seja 15,2%. A cultura do milho ocupa uma área aproximada de 3.154.964 ha, dos quais 91,6% são predominantes na agricultura familiar e os restantes 8,4% são cultivados pela agricultura empresarial com uma produção aproximada de 3.065.750 t/ha. A produtividade média varia à volta dos 921kg/ha para agricultura familiar e 2.680 Kg/ha para agricultura empresarial.

A produção do milho em Angola é limitada por vários fatores, muitos dos quais estão relacionados com a falta de trabalhadores qualificados, baixo ou quase nenhum nível de tecnologia, clima, solos, deficiências de água e nutrientes, bem como ataques de pragas e doenças. Esses fatores influenciam negativamente o bom crescimento e, eventualmente, o rendimento da cultura.

A produtividade das culturas é um elemento-chave para o desenvolvimento rural sustentável e um indicador da segurança alimentar de um país. Quanto maior for a produtividade das culturas, maior será a oferta de alimentos, contribuindo para reduzir a dependência de importações e garantir a segurança alimentar da população. Por isso, é importante investir em técnicas de cultivo eficientes e sustentáveis, que aumentem a produtividade sem comprometer a qualidade do solo e dos recursos naturais.

Neste sentido, o Executivo angolano, através do Ministério da Agricultura e Pescas, tem desenvolvido programas que visam a promoção e o fomento da atividade económica privada, fundamentalmente a produção de bens e serviços, direta e indiretamente ligados à produção agropecuária, para desta forma contribuir significativamente no aumento da produção.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo utilizar os dados obtidos por deteção remota recorrendo às imagens de satélites (Sentinel-2) para avaliação e monitorização da cultura do milho, e validar modelos entre os dados de satélites e os dados colhidos no campo e assim identificar quais as variáveis que mais influenciam na eficiência dos fatores de produção (solo, clima, rega, técnicas culturais). Com base nos resultados, pretende-se propor medidas que visam aumentar a produtividade.

2. Revisão bibliográfica

O presente capítulo, tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica de vários trabalhos efetuados sobre a aplicação de detecção remota, com foco maior no uso dos Solos, água, plantas, bem como a estimativa de produtividade e as aplicações na cultura do milho.

2.1. Detecção Remota

A detecção remota (DR) é a ciência que trata dos métodos de observação da terra com sensores remotos (satélites, avião ou drone) para a obtenção de informações de um objeto à distância sem ter contato direto com o mesmo.

Este conceito tem como fundamento que todos os objetos na superfície terrestre (oceanos, rios, solos, florestas, cidades, rochas, etc.) refletem parte da radiação solar. A transferência de informação entre o objeto observado e o sensor, ocorre sob a forma de radiação eletromagnética (REM) e o sol é o emissor fundamental desta radiação (Saavedra, 2020). Steffen *et al.*, (2011) definiu bandas multiespectrais como um dispositivo capaz de responder à REM de determinada faixa do Espectro eletromagnético, (EEM) registá-la e conceber um produto numa forma adequada para a interpretação do utilizador.

A DR tem sido bastante utilizada na agricultura para distintas aplicações essenciais. A estimativa de produtividade, é uma das principais áreas de estudo que beneficia desta tecnologia. Através da DR, é possível obter informações precisas sobre o desenvolvimento das plantas, identificando elementos que influenciam a produtividade, como a quantidade de biomassa e o estado geral de saúde das plantas na determinação das suas necessidades nutricionais. E com base na análise espectral das plantas, é possível identificar carências ou excessos de nutrientes, auxiliando os agricultores a gerir adequadamente a fertilização e nutrição das culturas. (Saavedra, 2020; Shanmugapriya *et al.*, 2019; Haboudane *et al.*, 2002).

A principal vantagem da DR é a sua capacidade de fornecer dados de forma contínua, sem a necessidade de se manter em contacto físico com a cultura. Segundo Moreira (2000) os índices de vegetação (IVs) são resultantes de várias combinações de dados espectrais

de duas ou mais bandas com o objetivo de compilar e melhorar a correlação dos dados da vegetação e dos parâmetros biofísicos. Os IVs são usados frequentemente para a monitorização da cobertura vegetal na terra (Miura *et al.*, 2001).

Com base nos dados obtidos por detecção remota calculam-se índices de vegetação que permitem avaliar o vigor vegetativo das culturas, o que ajuda a entender como as alterações nas culturas ao longo do tempo. Vários autores apontam o potencial da DR para recolher dados precisos e de baixo custo sobre a dinâmica da cobertura do solo, ao longo de todo o ciclo cultural, em grandes áreas. Estes dados são obtidos pela energia refletida pelos vários intervalos de comprimento de onda (Saavedra, 2020).

Para McBratney *et al.* (2005), detecção remota aplicada em agricultura de precisão é frequentemente utilizada para fazer o diagnóstico de uma parcela, fornecendo informações específicas para uma melhor tomada de decisão, nas distintas zonas de gestão e realizar aplicações de forma localizada.

O estudo de Sonobe *et al.* (2018) analisou o uso das bandas espectrais do satélite Sentinel-2 e algoritmos de classificação, como o RF (Random Forest) e SVM (Support Vector Machine), para classificar terras agrícolas. Com a aplicação do algoritmo SVM obtiveram uma precisão global de 89,3% a 92,2%. Os índices de vegetação foram úteis para identificar culturas específicas.

Noutro estudo, Li *et al.* (2023) estabeleceram uma combinação de imagens multifásicas nos períodos-chave para mapear grandes áreas, evitando a interferência de nuvens e aerossóis. Essa abordagem, baseada no índice de separação global das culturas milho, trigo e soja, elimina diretamente o impacto das nuvens, alcançando uma precisão acima de 88,28%.

A interpretação de imagens obtidas por meio de detecção remota que contêm informações sobre a vegetação é baseada em diferenças e características espectrais da cobertura vegetal. Métodos robustos são usados para avaliar os índices de vegetação, comparando-os com dados obtidos no “terreno” para calibração Xue *et al.* (2017).

Madonsela *et al.* (2022) investigou a utilidade dos dados espectrais do Sentinel-2 para estimar o índice de Área Foliar (IAF), o conteúdo de clorofila foliar e da copa do milho em diferentes estágios de crescimento. Os resultados demonstraram que os índices de clorofila, apresentaram uma relação consistente e maior com o IAF da cultura do milho, com um coeficiente de correlação (r) de 0,65 e 0,63 durante os estágios iniciais de

crescimento, e um r de 0,79 e 0,81 durante a fase vegetativa. Os resultados indicaram a vantagem espectral do sensor Sentinel-2 com a presença de duas bandas do limite do vermelho para monitorização contínua do teor de clorofila do milho. Enquanto Zhang e Wegehenkel (2006) chegaram a concluir que a estimativa do teor de água, por meio do uso de índices hídricos aplicados à vegetação de uma plantação de trigo, representa uma alternativa viável e pode ser empregue como suporte na tomada de decisão relativamente à rega.

Abreu *et al.* (2022) no Brasil, estado de minas gerais usando a detecção remota estimou a produtividade da cultura do milho a partir de imagens multiespectrais. O autor discutiu a utilização de imagens multiespectrais como ferramenta para estimar a produtividade da cultura do milho e os resultados obtidos por meio da análise das imagens, garantiram um aumento da eficiência de 20,97% nos sistemas de produção de milho.

Ahmad *et al.* (2018) desenvolveram um modelo de previsão da produtividade do milho utilizando imagens do satélite Landsat-8 com intervalos de 2 a 3 meses após a sementeira. Os autores aplicaram algoritmos de aprendizagem automática e alcançaram um desempenho elevado, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,94. Isto demonstra a eficácia da utilização de imagens de satélite e aprendizagem automática para prever com precisão a produtividade do milho.

2.2. Índices de Vegetação

O índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) desenvolvido por Rouse *et al.* (1973), consiste na normalização do Índice de Vegetação da Razão Simples para uma escala de -1 a +1. Essa normalização é feita por meio da relação entre as medidas espectrais das bandas da região do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V) (Eq.1) (Ponzoni e Shimabukuro, 2010).

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad \text{Eq. 1}$$

O índice NDVI é utilizado com frequência para monitorizar a vegetação, permitindo identificar alterações no ecossistema (Sousa e Marques da Silva, 2017). Vários foram os estudos que demonstraram a utilidade do índice mencionado para estimativas de produtividade das culturas. Além disso, muitos autores destacam a importância desse índice na avaliação do estado de desenvolvimento das plantas, considerando-o uma

componente crucial para estimativas de produtividade (McConkey, 2001; Wojtowicz *et al.*, 2005; Piekarczyk, 2011).

Outro índice, NDWI (*Normalized Difference Water Index*) é um indicador que reflete o teor de água nas plantas e no solo, permitindo controlar a rega em tempo real na agricultura. O valor também varia entre -1 e 1, indicando alto conteúdo de água em valores elevados e baixo teor de água em valores baixos. Durante períodos de stresse hídrico, o valor do NDWI diminui. Este índice é calculado através de uma equação que tem como variáveis as bandas do IVP e do IVM, como apresentado na equação seguinte, (Eq.2).

$$NDWI = \frac{(IVP-IVM)}{(IVP+IVM)} \quad \text{Eq. 2}$$

O NDWI foi proposto por Gao (1996) com base em estudos experimentais de Cibula *et al.* (1992), que mostraram que a refletância em certos comprimentos de onda do “Landsat-5” aumentava quando o teor de água nas folhas diminuía. O NDWI, tal com o NDVI, é útil na gestão hídrica (Borgogno-Mondino *et al.*, 2018) e na avaliação da distribuição de água em sistemas de pivot (Farg *et al.*, 2017). No entanto, o NDWI não é adequado para áreas com solo descoberto ou baixa densidade de vegetação (Fensholt e Sandholt, 2013). Além disso, também foram observadas fortes correlações entre o NDVI e a produtividade dos colmos de cana-de-açúcar (Molin *et al.*, 2010; Lofton *et al.*, 2012).

Venâncio *et al.* (2020) estudaram o uso do NDVI para monitorizar a fenologia e detetar stress na cultura do milho. Correlacionaram os valores do NDVI obtido com imagens dos satélites Landsat OLI e MODIS com as fases fenológicas do milho, utilizando os dias após a sementeira como referência. Obtiveram bons ajustes polinomiais (R^2 de 0,96 e 0,95) e concluíram que o NDVI é um indicador preciso para monitorizar remotamente a fenologia do milho e identificar problemas ao longo do ciclo da cultura.

Bredemeier *et al.* (2013), determinaram o melhor momento para prever a produtividade do milho e analisaram a variação do NDVI em diferentes densidades populacionais (4, 6, 8 e 10 plantas/m²), concluindo que o uso de sensores óticos são bastantes úteis para estimar a densidade de plantas em tempo real. Shanahan *et al.* (2001) realizaram um estudo sobre o uso de dois índices, NDVI e GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), em diversas parcelas de milho de regadio e com diferentes níveis de azoto. Usando os dados obtidos por deteção remota, encontraram uma relação

significativa entre azoto, data de amostragem e variações no NDVI. Verificou-se uma correlação entre o aumento de azoto e a clorofila, embora limitada.

Existem muitos outros autores que recorrem aos dados obtidos por detecção remota para estimar a produtividade do milho usando imagens de satélite. No entanto, há uma divergência sobre o momento específico para realizar essa estimativa. Foi assim que Wahab *et al.* (2018) no Gana conduziram um estudo para estimar a produtividade e o vigor da cultura do milho. Eles realizaram três medições de campo, sendo a primeira entre 4 e 5 semanas após a sementeira, a segunda às 9 semanas e a terceira às 13 semanas, utilizando imagens multiespectrais de fotogrametria aérea. O estudo demonstrou que o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) derivado de dados obtidos por UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) estima de forma mais precisa o rendimento, $r = 0,372$ e $r = 0,393$ para GNDVI médio e máximo, após cinco semanas de plantação em comparação com os métodos de campo, como leituras SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) no mesmo estágio ($r = 0,259$).

Pode-se observar claramente que o NDVI é um produto da detecção remota que tem sido usado nos últimos tempos para correlacionar vários parâmetros agronômicos ligados à produtividade, tais como o teor de clorofila, biomassa verde, massa dos grãos, incidências de pragas e doenças, entre outros. Ao mesmo tempo, é também usado para a criação de mapas de zonas de gestão, recolha de amostras de solo e elaboração de diversas aplicações a uma taxa variável, nomeadamente de fertilizantes e/ou fitofármacos (Uebel, 2015; Molin *et al.*, 2010; Barker e Sawyer, 2012; Bredemeir *et al.*, 2013; Rissini; *et al.*, 2015; Caires, 2016; Amaral e Molin, 2011).

Segundo Solari *et al.* (2008), com a detecção remota é possível, de forma prática, fazer o diagnóstico da carência de N (Azoto) nas plantas do milho através do NDVI e aplicar fertilizantes azotados em taxas variadas, colocando o fator de produção somente onde é necessário e na mesma operação, usando sensores instalados nas máquinas agrícolas e sem a necessidade de um mapeamento prévio.

Além do NDVI e do NDWI, existem outros índices (Tabela 1) tais como o ARVI (*Index of Atmospherically Resistant Vegetation*) que serve para fazer a eliminação dos efeitos dos aerossóis atmosféricos, pois o mesmo atua baseando-se no princípio de que a atmosfera afeta a radiação vermelha com maior intensidade em detrimento da radiação atmosférica. A resistência do ARVI aos efeitos atmosféricos é feita por meio de um processo de autocorreção do efeito atmosférico na banda do vermelho (Kaufman e Tanré,

1992). Huete (1999) desenvolveu o SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*). Este índice introduz um fator de ajuste (L) ao índice de vegetação normalizada (NDVI) sendo mais utilizado, em áreas com climas do semiárido.

2.3.Deteção Remota no Estudo do Solo.

O solo desempenha um papel crucial no cultivo do milho, influenciando diretamente a saúde e a produtividade da planta. Sendo o meio primário de suporte e nutrição, o solo fornece água e nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Assim sendo, o tipo de solo pode afetar a retenção da água, o qual é um fator de produção importante para o milho, sendo uma cultura que exige muita água durante o seu crescimento. Freitas *et al.* (2013), definiu as zonas de gestão com base na condutividade elétrica aparente do solo em áreas de milho e soja usando métodos geoestatísticos por meio da Krigagem, permitindo a criar mapas com as propriedades químicas e físicas do solo, obtendo resultados ótimos de números de classes iguais permitindo detetar diferenças significativas entre as médias de produtividade.

A relação entre a saúde do solo e o rendimento das culturas é de facto complexa. Um estudo feito pelos autores Adhikari *et al.* (2021) no Texas, visou esclarecer esta relação e as suas implicações na produção de milho. Os objetivos principais deste estudo foram: quantificar os indicadores de saúde do solo utilizando a Ferramenta de Saúde do Solo denominada de "Haney" num campo de milho; correlacionar a saúde do solo com a produtividade do milho utilizando técnicas geoespaciais; e analisar a relação entre a saúde do solo e a produtividade do milho. Foram recolhidas 218 amostras de solo a uma profundidade de 0 a 10 cm num campo de 27 ha, seguindo um esquema de amostragem de grelha. O estudo revelou que o campo tinha um valor médio de saúde do solo de 8,5 ($\pm 2,2$) e uma produtividade de milho de 2,9 t ha⁻¹ ($\pm 1,3$). A produtividade do milho mostrou uma maior variabilidade (Coeficiente de variabilidade > 43%) do que a saúde do solo (CV = 26,7%). Os autores concluíram que o rendimento do milho pode ser fracamente predito pela saúde do solo (rendimento do milho = $-0,29 + 0,39 \times$ valor da saúde do solo, $R^2 = 0,28$).

Nunes *et al.*, (2018) e Van Es e Karlen, (2019) mostraram correlações positivas entre a saúde do solo e o rendimento das culturas a longo prazo, enquanto dois outros estudos relataram um aumento do rendimento das culturas através da melhoria da saúde do solo.

O estudo realizado por Costa (2017) efetuou análise da variabilidade espacial e fertilidade de uma área de cultivo de milho. O seu objetivo foi criar mapas de prescrição e identificar quais os nutrientes que são limitantes à produtividade. O estudo concluiu que a medição da variabilidade espacial é uma ferramenta importante para os agricultores, dando-lhes mais precisão. Os elementos minerais (Fe, Mn, Cu e Zn) foram identificados como fatores limitantes para a produtividade, pois tinham uma correlação significativa com a produtividade (39%, 56%, 36% e 48%, respetivamente). O mesmo estudo, confirmou que a quantidade de teor de argila e areia grossa afetavam negativamente a produtividade, com correlações de -36% com a argila e -49% com a areia grossa.

De acordo com Inman *et al.* (2007), na sua pesquisa no Colorado, USA, onde avaliou o impacto da deteção remota para estimar o rendimento do milho e avaliar o teor de nitrato no solo, realizou-se um estudo de regressão para a modelação dos rendimentos dos grãos onde a correlação entre o NDVI e a produtividade do milho foi positiva e a produção do grão variou de 5 a 24 mg /h e o coeficiente de determinação variou de 0,10 a 0,70. Matias *et al.* (2015) usaram o NDVI para determinar zonas de gestão uniforme do milho e correlacionar com a produtividade do solo utilizando imagens do Landsat 8 OLI/TIRS por meio da classificação do K-means, foram identificadas zonas de gestão e a análise de regressão linear demonstrou resultados coerentes entre a produtividade em campo e a produtividade estimada com base no NDVI. Os mesmos concluíram ser possível estimar a produtividade em diferentes zonas de gestão com base no NDVI e o rendimento médio de cada zona.

O estudo realizado por Naka (2019) teve com base estabelecer uma correlação entre os atributos químicos pH, P, K, Ca + Mg, SB, M.O., CTC, V% e H + A e os valores obtidos pelo índice NDVI. Para tal, foi efetuada a recolha das amostras, e determinados os referidos atributos químicos após cruzados com os dados do cálculo do NDVI. Feita a análise geoestatística, os parâmetros avaliados mostraram um bom ajuste, apresentando coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,7. Os parâmetros P, K, Ca + Mg, M.O. e pH apresentaram coeficiente de correlação linear de Pearson (r) positivos, indicando serem diretamente proporcionais aos valores de NDVI, enquanto o parâmetro H + Al apresentou r negativo, indicando assim ser inversamente proporcional aos valores do respetivo índice. Desta forma os autores concluíram ser possível correlacionar os valores atribuídos ao solo com os valores obtidos de NDVI.

2.4. Detecção Remota no Conforto Hídrico do Milho

Na cultura do milho, a evapotranspiração no estado do Rio Grande do Sul, Brasil é, em média, de aproximadamente 650mm, durante todo o seu ciclo. Na fase inicial, a planta tem maior necessidade de água e vai aumentando até a fase vegetativa que pode atingir a média diária de 7mm (Bergamaschi *et al.*, 2001).

A gestão sustentável da rega, e a ETC (EvapoTranspiração da Cultura) deve ser definida com a maior precisão (Johnson e Trout, 2012). Os coeficientes de cultura são frequentemente avaliados com base nos dias que vão desde a sementeira até ao crescimento completo das plantas (Allen *et al.*, 1998).

Várias são as pesquisas sobre o milho que têm demonstrado melhorias na gestão e programação da rega, devido à estimativa do uso eficiente da água, quando existem estimativas de Kcb (*Coefficiente cultural basal*) derivadas de valores de índices de vegetação multiespectrais calculados e que foram remotamente incorporadas em algoritmos de programação de rega (Hunsaker *et al.*, 2003). Vilar *et al.* (2015) efetuaram um estudo sobre monitorização das culturas com uso em dados de deteção remota usando as bandas do satélite Landsat e um modelo de balanço hídrico do solo para estimar a necessidade hídrica nos estados fenológicos das culturas. Os melhores resultados foram obtidos com o algoritmo SVM, com uma precisão de 87%.

No caso de Bausch (1995), no seu estudo conseguiu observar o uso de água e a transpiração de plantas com base nos valores do índice NDVI. No entanto outros autores (Anderson *et al.*, 2007; Hunsaker *et al.*, 2003; Zhang e Wegehenkel, 2006; Gonzalez-Dugo *et al.*, 2008; Droogers *et al.*, 2010) tiveram a preocupação principal na definição de estabelecer relações confiáveis entre o NDVI e o Kcb. Toureiro *et al.* (2017) no seu estudo, utilizou dados do satélite Landsat 5 para determinar a disponibilidade de água no solo para otimização da cultura do milho em Évora, permitindo calcular indicadores biofísicos e índice de “stress” hídrico na vegetação com base nos valores do NDVI, e Kc. Os mesmos chegaram a conclusão de que a informação obtida por meio de deteção remota pode contribuir significativamente para a economia e gestão da água. Avozani (2023), avaliou a influência da água na produtividade da cultura do milho em dois ambientes, com rega e sem rega. Este estudo mostrou que houve no ambiente com regado um aumento de 46% em relação ao que não foi aplicada a rega.

Estudos de Parmar *et al.* (2023) no sentido de determinar a melhor estimativa das necessidades da água para rega do milho, fizeram uma avaliação das necessidades hídricas da cultura utilizando o NDVI, sendo que o NDVI e o coeficiente de cultura Kc (FAO) apresentaram uma correlação mais elevada com $R^2 = 0,80$. Consequentemente, as correlações do coeficiente de cultura serviu para criar um mapa de estimação de necessidade de água e ajudou a explicar a variabilidade do uso da água pelas culturas durante a fase de crescimento.

2.5. Detecção Remota para Nutrição Vegetal.

O uso de fatores de produção de forma racional diminui significativamente o impacto ambiental, através de aplicações de fertilizantes e herbicidas em lugares específicos, tornando a atividade mais sustentável. Isso é possível recorrendo às tecnologias de agricultura de precisão que dão um conhecimento geral das diferentes zonas de gestão dando maior capacidade na distribuição dos fatores de produção (Fernandes, 2016).

De acordo com Fontoura e Bayer (2009), um dos fatores que pode contribuir para aumentar a produção de milho é a gestão adequada da fertilidade do solo, especialmente através da adubação nitrogenada. Nos seus estudos, Fontoura (2005) já tinha constatado que a quantidade média recomendada de azoto a ser aplicada em cobertura, 150 kg/ha, a fim de obter a máxima eficiência económica do fertilizante. No entanto, é importante destacar que essa dose pode variar consideravelmente, entre 40 e 240 kg/ha, devido às características específicas de cada solo, e tipo de planta. Esses fatores têm impacto direto no potencial de rendimento da cultura do milho e na resposta à adubação nitrogenada.

O azoto (N) é o nutriente mais absorvido e exportado pela cultura do milho. No entanto, a sua absorção é seriamente afetada por condições de défice hídrico (Soratto *et al.*, 2010).

Prado, (2021), avaliou a produtividade do milho em diferentes doses de Azoto (N) em sistemas de cultivo com e sem regadio. Foram realizados testes com quatro tratamentos, variando as doses de N entre 0, 100, 200 e 300 kg/ha. Após colhidas 15 espigas por parcela, efetuaram-se medições do número de grãos por fileira, número de fileiras por espiga, peso de 1000 grãos e teor de humidade dos grãos. Os resultados revelaram que a cultura do milho obteve uma produtividade excelente, principalmente nos sistemas de cultivo de regadio, o que contribuiu para reduzir as perdas de N. Além disso, a aplicação adequada de água em momentos críticos durante o desenvolvimento da cultura, com altas

doses de N, resultou em rendimentos elevados. A dose de 300 kg/ha de N demonstrou a melhor resposta no aumento da produtividade, alcançando médias satisfatórias acima de 14.000 kg/ha nas parcelas regadas e acima de 11.000 kg/ha nas parcelas não regadas.

2.6. Detecção Remota e Estimativa da Produtividade

Há diversas metodologias para a estimativa de produtividade, todas baseadas em amostras representativas dos locais avaliados. A escolha do local para avaliação é primordial, uma vez que variações podem afetar a precisão das estimativas de produtividade.

Hauagge e Madalóz (2020) afirmam que o progresso tecnológico tem possibilitado aos produtores a antecipação da produtividade das suas culturas. Esta previsibilidade, crucial para uma eficaz preparação da lavoura, contribui para a otimização do uso de máquinas e a gestão de armazenamento e logística.

Meirelles, (2022) avaliou a produtividade do milho usando dados de detecção remota (NDVI) e dados de um sensor na ceifeira. Utilizando imagens do satélite Sentinel-2 e o programa QGIS, correlacionou-se os valores do NDVI com a produtividade em cada pixel. A técnica permitiu monitorizar a produtividade do milho antes da colheita, facilitando a gestão da lavoura. Cardoso *et al.* (2021), utilizaram imagens do satélite Sentinel-2 para prever a produtividade do milho. A análise resultou numa correlação significativa ($R^2=0,99$), demonstrando a viabilidade do NDVI na previsão da produção de milho.

Para validar a metodologia de estimativa do estado nutricional das plantas, e com suporte a dados de detecção remota vários estudos confirmaram uma forte correlação entre o NDVI e o Azoto (N) acumulado na biomassa nas culturas trigo e cevada (Serrano *et al.*, 2000; Grohs *et al.*, 2009). Damian *et al.* (2019), por meio de imagens de satélites, definiram as diferentes zonas de gestão na cultura do milho no Brasil e usando a correlação de Spearman baseado no NDVI das imagens de satélite correlacionaram a produtividade da cultura ($0,48 < r < 0,61$), concluindo que o NDVI pode estimar os dados de produtividade das zonas de gestão.

Ainda para o cultivo de milho, diversos estudos apontaram uma correlação significativa entre os valores de NDVI e a produção de biomassa da parte aérea, além da produtividade dos grãos (Freeman *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2012). Tais descobertas

fortalecem a utilidade e precisão desta metodologia para a avaliação da condição nutricional das plantas em diferentes culturas.

Existem diversas metodologias disponíveis para a estimativa de produtividade, cada uma com os seus graus de precisão e características distintas. Contudo, todas elas convergem para um objetivo comum.

Além disso, todas as estimativas efetuadas numa plantação ou parcela baseiam-se em amostras representativas dos locais de avaliação e na produção prevista para esses mesmos locais. Nesse sentido, a escolha do local para avaliação assume importância primordial. Qualquer condição distinta no local escolhido para a recolha da amostra pode conduzir a estimativas de produtividade que desviam da realidade (Hauagge e Madalóz, 2020).

2.7. Detecção Remota na Densidade de Plantas do Milho

A densidade de plantas de milho é um fator crítico que influencia a produtividade da cultura. Densidades elevadas podem aumentar a produtividade ao permitir mais plantas por unidade de área. Assim sendo, demasiadas plantas podem competir pelos recursos disponíveis no solo, o que pode reduzir significativamente a produtividade. A densidade ideal de plantas depende de vários fatores tais como: O tipo de milho, o clima, a disponibilidade de água e nutrientes, e as práticas agrícolas. Assim, é necessária uma cuidadosa gestão da densidade de plantas para otimizar a produção de milho.

Vários trabalhos que nos últimos tempos têm sido efetuados para determinar a densidade ótima de plantas, utilizando híbridos de milho com elevado potencial produtivo (Mundstock, 1977; Silva *et al.*, 1995; Almeida *et al.*, 2000).

Estudos propostos por Almeida *et al.* (2000), mostram que densidades superiores a oito plantas por metro quadrado resultam em rendimentos mais elevados, sugerindo que a recomendação tradicional de densidade pode ser ampliada, dependendo das condições ambientais e do uso de híbridos modernos.

Estudo de Merotto Júnior *et al.* (1997) revelou que o aumento da densidade de plantas, de 3,7 para 8,1 plantas por metro quadrado, resultou num aumento linear no rendimento de grãos. Esse incremento foi devido ao maior número de espigas por área, compensando

a redução no peso dos grãos e no número de espigas por planta. Portanto, o uso de densidades mais altas tem se mostrado viável para aumentar a produtividade do milho.

Marchão *et al.* (2005) investigaram a influência de diferentes densidades populacionais e espaçamento reduzido no desempenho de diversos híbridos de milho. Os resultados revelaram que a altura da planta, altura de inserção da espiga, acamamento, comprimento e diâmetro da espiga, diâmetro do sabugo, número de grãos por fileira, massa de cem grãos e produtividade foram afetados pela densidade de plantas. Foi observado que a maior produtividade foi alcançada em densidades acima de 70 mil plantas por hectare.

A redução do espaçamento entre linhas, combinada com o uso de híbridos de milho de porte menor, permitiu aumentar a densidade de plantas. Além disso, foi evidenciada uma interação entre híbridos e densidades de plantas no rendimento de grãos, indicando que diferentes híbridos respondem de maneira distinta às densidades populacionais. Concluíram que, é possível obter maior rendimento de grãos ao aumentar a densidade de plantas sob espaçamento reduzido, considerando o híbrido de milho utilizado. Schnitt (2014) durante a sua pesquisa sobre o espaçamento da cultura do milho avaliou o impacto da redução do espaçamento usando linhas duplas, chegando à conclusão de que este aumento de população está implicitamente ligado ao aumento da produtividade e não influencia significativamente o crescimento das plantas.

No que diz respeito à fisiologia, o desenvolvimento do milho compreende duas fases principais: a fase vegetativa e a fase reprodutiva. A fase vegetativa (V) coincide com um crescimento rápido e inclui os estágios VE (emergência), V1 (uma folha) até V12 (doze folhas), culminando no estágio VT (embandeiramento). Por sua vez, a fase reprodutiva (R) engloba os estágios R1 (aparecimento das sedas), R2 (emborrachamento), R3 (estado leitoso), R4 (estado pastoso), R5 (vítreo) e R6 (maturação fisiológica) Savandra 2020.

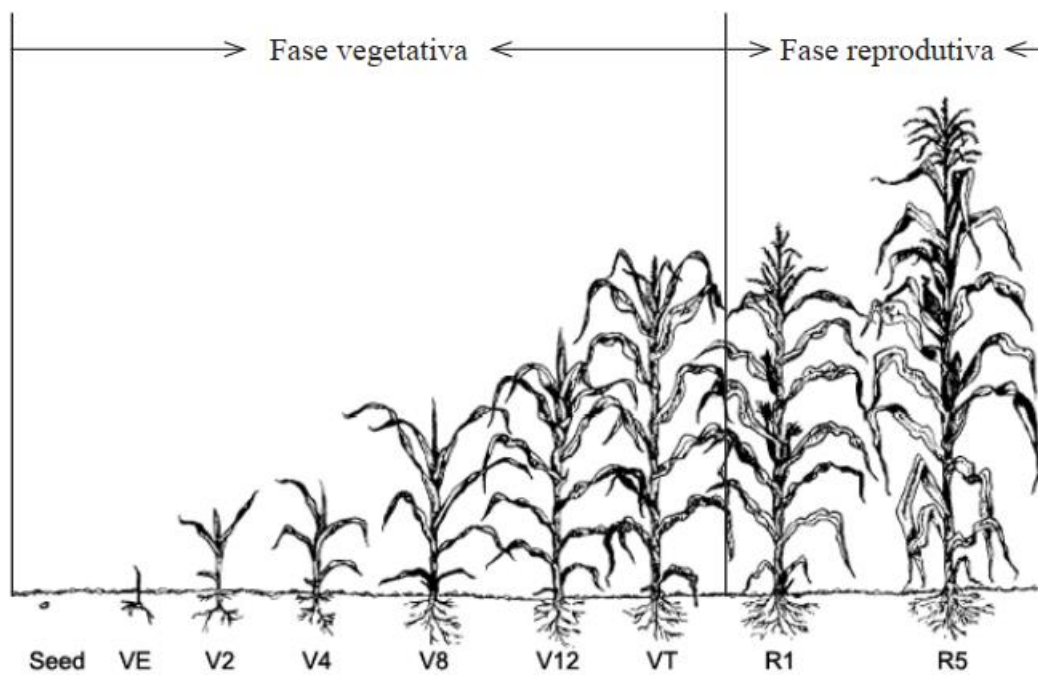


Figura 1- Estádios fenológicos do milho (adaptado de Saavedra, 2020)

3. Material e Métodos

O presente capítulo, tem como objetivo fazer uma descrição geral sobre a área de estudos, descrição dos métodos, metodologias e tecnologias utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

3.1. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Jardins da Yoba, localizada na comuna do Chaungo município da Chibia, Província da Huila, situada entre os paralelos de 12° e 15° Sul, latitude 14° 11' 33,858''(S), longitude 13° 41' 02,264''(E) e uma altitude média de 1.484m. Segundo a classificação de Thornthwait, o clima desta região é húmido, mesotérmico, em que as características da área enquadram-se na zona tropical de clima húmido e seco, com temperaturas médias anuais variando entre 19 °C a 22 °C, podendo atingir valores mais baixos na ordem de 5 °C durante a estação seca do ano, os valores médios anuais da humidade relativa atingem 60% a 70%, e as precipitações vão de 1.100 mm a 1.400 mm por ano (Dinis, 2006) (Figura 2).

Os solos predominantes são do tipo ferralíticos, vermelho intensos, friável, sem estrutura notável profundo (Dinis, 2006). Com um pH de 4,73, apresentam baixo conteúdo de nutrientes minerais e de matéria orgânica, baixa capacidade de troca catiónica e grau de saturação de bases respetivamente (Dinis, 2006).

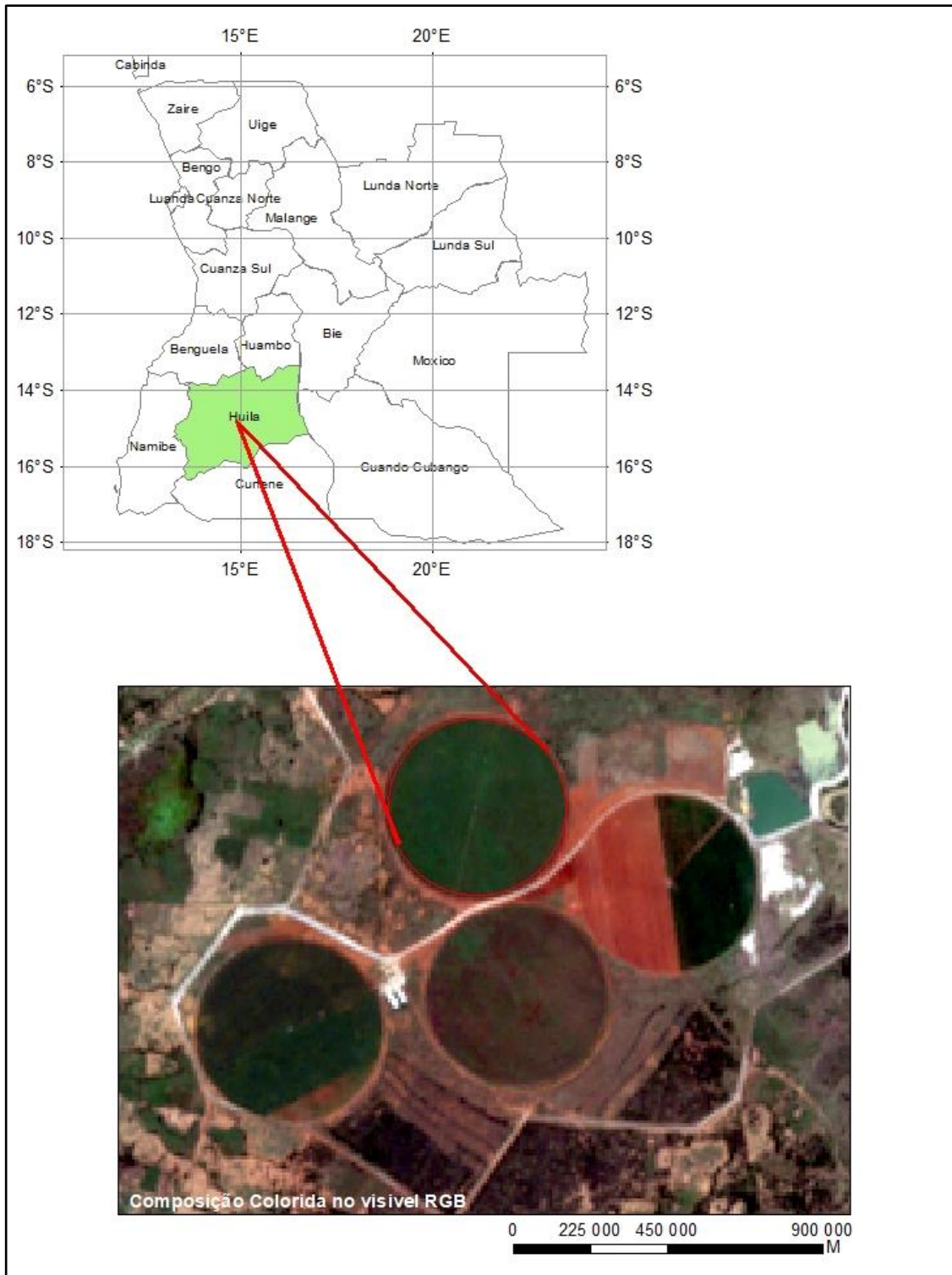


Figura 2- Mapa de enquadramento da parcela em estudo

(Fonte: Google Earth, 2023)

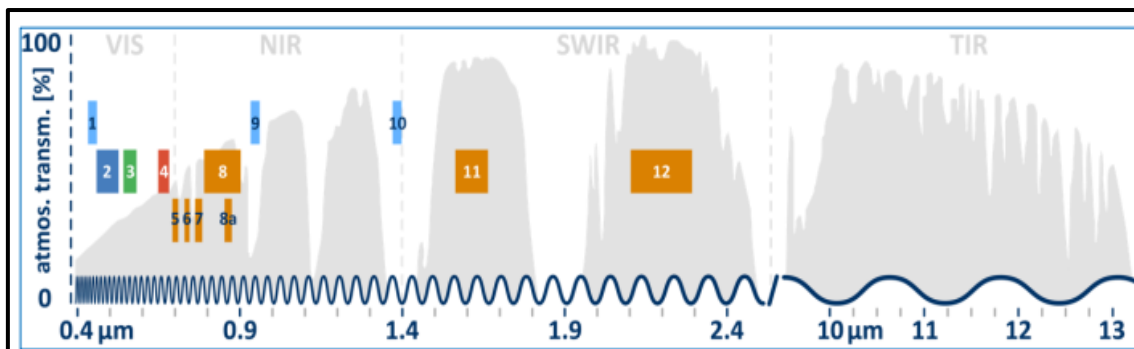
3.2. Materiais

Foram utilizadas as imagens provenientes do Sentinel-2 que é um dos satélites do Programa Copernicus desenvolvido pela União Europeia em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA).

O Sentinel-2 é um conjunto de dois satélites 2A e 2B que foram projetados para fornecer imagens de alta resolução espacial da superfície terrestre para diversas aplicações, incluindo agricultura, gestão florestal, monitorização de recursos hídricos e mapeamento da cobertura do solo. Isso permite que o satélite capte imagens de alta resolução da superfície terrestre em diferentes comprimentos de onda, o que é importante para aplicações específicas, como a identificação de culturas agrícolas, florestas e corpos de água.

Cada satélite Sentinel-2 leva cerca de 100 minutos para orbitar a Terra numa órbita polar, cobrindo toda a superfície terrestre a cada 10 dias com uma altitude de 786 km, cobrindo uma faixa de 290 km de largura e com uma diferença de fase de 180°. Considerando os dois satélites 2A e 2B desfasados de 5 dias na sua órbita, permite ter uma cobertura do mesmo local de 5 em 5 dias.

Com estas características o Sentinel-2 permite que as imagens de alta resolução espacial da superfície terrestre sejam capturadas com frequência e regularidade, permitindo que os utilizadores acompanhem as mudanças na superfície terrestre ao longo do tempo. O Sentinel-2 é equipado com um conjunto de sensores multiespectrais que registem informações em 13 bandas multiespectrais diferentes (Tabela 1), incluindo visível (VIS com 4 bandas), infravermelho próximo (IVP com 6 bandas) e infravermelho médio (SWIR com 3 bandas) (Figura 3).



(Fonte: Freie Universität Berlin, 2022)

Figura 3- Bandas multiespectrais do satélite Sentinel-2

Tabela 1- Características das bandas do satélite

| Banda | Nº | Comprimento de onda (nm) | Resolução espacial (m) |
|-----------------------|-----------|---------------------------------|-------------------------------|
| Costeira | 1 | 430-450 | 60 |
| Azul | 2 | 458-523 | 10 |
| Verde | 3 | 543-578 | 10 |
| Vermelho | 4 | 650-680 | 10 |
| Limite do Vermelho | 5 | 698-713 | 20 |
| Limite do Vermelho | 6 | 733-748 | 20 |
| Limite do Vermelho | 7 | 733-793 | 20 |
| Infravermelho próximo | 8 | 785-899 | 10 |
| Limite do Vermelho | 8A | 855-875 | 20 |
| Infravermelho médio | 11 | 1565-1655 | 20 |
| Infravermelho médio | 12 | 2100-2280 | 20 |

As 13 bandas do satélite Sentinel-2, incluindo o comprimento de onda, a resolução espacial, são utilizadas para num vasto número de aplicações, detetar clorofila, vigor vegetativo, água, nutrientes, mapeamento de solos e geológico, e correção atmosférica, entre outros.

3.3. Metodologia

A sementeira da cultura do milho da variedade SAHA foi efetuada a 10 de janeiro de 2023, com uma densidade de sementeira de aproximadamente 25 kg/ha e um compasso de 75 cm na linha e 22 cm na entrelinha numa área de 25 hectares.

Três semanas após a data da sementeira, começou a ser efetuado o acompanhamento do crescimento das plantas. Este acompanhamento em causa foi concretizado respeitando uma periodicidade de 15 dias. Consistiu na medição da altura das plantas e sua densidade numa disposição geográfica consistindo em 3 pontos iniciais. De salientar que estes pontos de observação da cultura, são zonas de amostragem que ocupam uma área de 3 m².

Seguidamente, recorrendo à aplicação SmartAG que é um aplicativo da empresa Agroinsider, que tem como objetivo captar imagens do satélite Sentinel-2 criando relatórios semanais de acordo com o estado da vegetação e variações de cor (verde, amarelo ou vermelho) consoante a maior variabilidade permitindo a criação de mapas de gestão em função das zonas distintas dentro de uma parcela. Realizou-se uma análise das

imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2 em campanhas anteriores. Com base no cálculo do índice NDVI, foi criado um mapa que identifica três zonas de gestão com base no vigor vegetativo, tendo sido assim classificadas, por ordem decrescente do vigor, em Zona alta, Zona intermédia e Zona baixa. Visitaram-se os três pontos de amostragem, com a intenção de recolher amostras de solo (Figura 4).

Para que as amostras sejam representativas em cada um dos 3 pontos de amostragem, definiram-se, em cada um deles, quatro pontos de subamostragem, seguindo a lógica de ziguezague para termos uma amostra homogénea de cada uma das zonas.

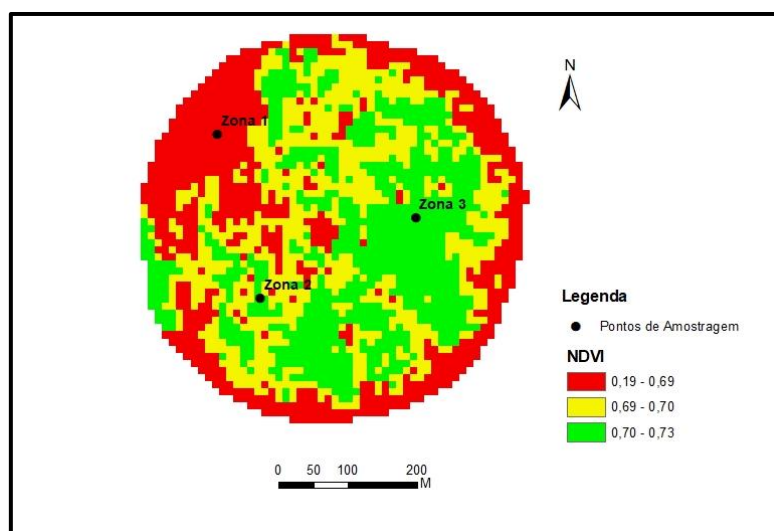


Figura 4- Carta do NDVI com indicação dos pontos de amostragem

Quanto às plantas a serem observadas durante o ciclo, foi selecionado, em cada zona, um ponto de amostragem correspondente a 3 m² (Figura 5), servindo como zonas para o acompanhamento da caracterização dos diferentes níveis de desenvolvimento vegetativo, de forma a tentar descodificar se as problemáticas associadas a níveis de desenvolvimento distinto residiam nos fatores que influenciam na produção.

3.4. Análises de Solo

Os resultados derivados das análises de solos feitos no laboratório da Ambiterria da Universidade de Évora mostraram que o valor de pH na Zona 2 corresponde à zona mais ácida, o que pode afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Os valores de CE mostraram que a Zona 2 tem uma condutividade elétrica mais elevada, indicando uma

possível maior salinidade do solo, o que pode afetar o crescimento das plantas se for excessivamente alta (Tabela 2).

Em relação aos nutrientes essenciais (**P, Mg, Ca, N, K**): existem diferenças entre as zonas, sendo a Zona 2 a que apresenta os valores mais altos para a maioria desses nutrientes, exceto para o magnésio, que é mais alto na Zona 3.

No que diz respeito aos micronutrientes (**Fe, Zn, Mn, B, Cu**): A Zona 2 e a Zona 3 têm valores mais elevados para a maioria destes nutrientes em comparação com a Zona 1, o que indica uma maior disponibilidade desses elementos nessas zonas.

Tabela 2- Resultados Análise dos Solos

| Zonas | pH | CE | P | MO (%) | Mg | Ca | N | Fe | Zn | Mn | B | Cu | K |
|--------|------|-------|-------|--------|-----|------|------|------|------|-----|------|-----|-------|
| Zona 1 | 5,94 | 0,073 | 30,5 | 3,827 | 460 | 966 | 0,17 | 78,0 | 0,10 | 139 | 0,22 | 2,4 | 175,4 |
| Zona 2 | 5,34 | 0,299 | 167,0 | 4,008 | 420 | 1178 | 0,25 | 84,5 | 1,80 | 248 | 0,12 | 4,8 | 319,6 |
| Zona 3 | 5,97 | 0,076 | 30,8 | 3,890 | 560 | 1166 | 0,19 | 60,0 | 1,30 | 213 | 0,10 | 4,8 | 135,2 |



Figura 5- Medição de um dos pontos de amostragem

Com a intenção de marcar no terreno os pontos de amostragem definidos no procedimento anterior, passaram-se os três pontos para formato *KML*. Depois, utilizando o GPS Garmin64, identificou-se no terreno a localização dos 3 pontos, com as respectivas coordenadas geográficas, foi delimitada a área e identificadas as plantas

selecionadas em cada uma das áreas, para acompanhamento constante durante o desenvolvimento do nosso trabalho. No dia seguinte, visitaram-se os 3 pontos e, em cada um deles, marcaram-se de forma aleatória em ziguezague 10 plantas em cada ponto, fazendo um total de 30 plantas (Figura 6).



Figura 6- Marcação de um dos pontos de amostragem.

3.5. Tecnologia Utilizada

No âmbito de AP as tecnologias a serem utilizadas nesta dissertação foram as seguintes:

- Plataforma **SmartAG** pertencente à empresa Agroinsider, a qual serviu para adquirir e processamento das imagens Sentinel-2, cálculo do NDVI e definição de pontos de amostragem. A mesma permitiu tratar os dados do NDVI organizando-os por classes e também criar todos os mapas necessários para a aplicação.
- **Rstudio** – Cujo objetivo é fazer o tratamento estatístico e visualização da variação dos valores do NDVI na área de estudo.

3.6. Itinerário Técnico da Cultura/Ensaio

Como anteriormente foi descrito, a sementeira foi feita no mês de janeiro de 2023, e vários processos foram desenvolvidos ao longo do ciclo da cultura. Para tal, foi elaborado um itinerário técnico que retrata resumidamente todas as operações desde a sementeira até a colheita (Tabela 3).

Tabela 3- Itinerário Técnico da Cultura/Ensaio

| Data | Atividade | Quantidade |
|---------------------|---|-------------------|
| 20 a 30 de dezembro | Preparação do solo com Gradagem | |
| 4 a 10 de janeiro | Sementeira do milho | 25Kg/ha |
| 4 a 10 de janeiro | Adubação de Fundo NPK (12-24-12) | 250kg/ha |
| 26 de janeiro | Herbicida pré emergente | 25l/ha |
| 2 de fevereiro | Adubação de cobertura NPK (12-24-12) | 260/kg |
| 7 de fevereiro | Aplicação de inseticida (Cipremetrina) | 25l |
| 10 de março | Aplicação de Cipremetrina | 25 l |
| 3 de abril | Aplicação de Sulfato de Potássio e ferti- alfa | 125kg e 12l |
| 05 de abril | Aplicação do Fungicida Radox | 40l |
| 14 de abril | Aplicação de ureia em líquido | 500 litros |
| 26 de abril | Aplicação de Sulfato de Potássio | 100kg |
| 13 de maio | Colheita dos dados | |

3.7.Método da Medição das Características Biométricas das Plantas

No dia 8 de abril, foram visitados três pontos de amostragem, onde se mediram parâmetros biométricos para cada uma das 30 plantas em análise. Com auxílio de uma régua telescópica, foi possível medir a altura das plantas e comprimento das espigas (Figura 7).

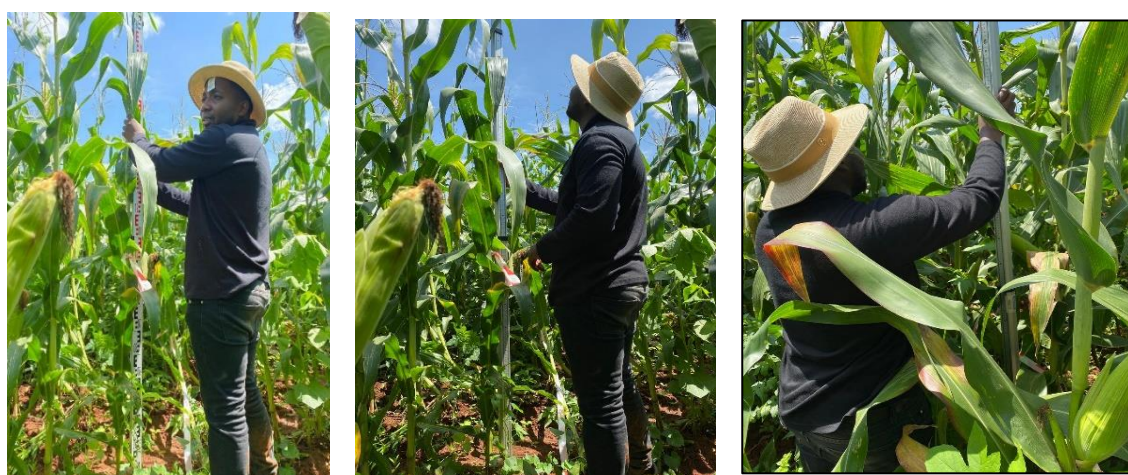


Figura 7- Medições da altura das plantas

Foram recolhidas plantas nos 3 pontos, um dos pontos numa zona com NDVI elevado, outro com NDVI médio, e outro com o NDVI baixo. No total recolheram-se as 30 plantas nos pontos, numa área que corresponde a 3m² de plantas em cada ponto.

Estas plantas após colhidas, foram cortadas em talos pequenos, foram pesadas em verde, e após secas colocou-se numa estufa, mediu-se o peso de 100 grãos, a biomassa total da planta, o peso da espiga, n.º de linhas/espiga, o n.º de grãos/linha de cada espiga. As plantas e as espigas, após medido o peso fresco, foram submetidas a estufas durante 24 h e posteriormente fez-se uma medição periódica, com um intervalo de 4 a 6 h até encontrar um peso constante (Figura 3).

Esse valor de peso seco foi considerado, sabendo que no campo se colheu 30 plantas em 3m² correspondente a 4 m lineares de plantas, permitiu estimar dois outros parâmetros, a densidade de plantas por hectare e a produtividade estimada (t/ha) (Figura 8).



Figura 8- Fotografias demonstrativas das secagem e pesagem das plantas

3.8. Tratamento Estatístico e Análise de Variância

Para uma análise estatística mais completa, utilizando todos os dados recolhidos. Utilizou-se o método de análise de variância ANOVA, com o qual serão comparadas as produtividades das diferentes zonas de gestão diferenciada (zonas de maior vigor, nas zonas intermédias, nas zonas de menor vigor) para perceber qual a influência do NDVI na produtividade.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, analisar-se-á os resultados dos dados de solos recolhidos, dos quais algumas conclusões foram retiradas. A análise dos parâmetros biométricos nas zonas definidas e, depois, os valores do NDVI derivados das imagens de satélite de 17 de abril de 2023, quando o milho se entrava na fase R1, que, segundo Savandra 2020, é considerada a época do pico vegetativo da cultura. (Figura 9).

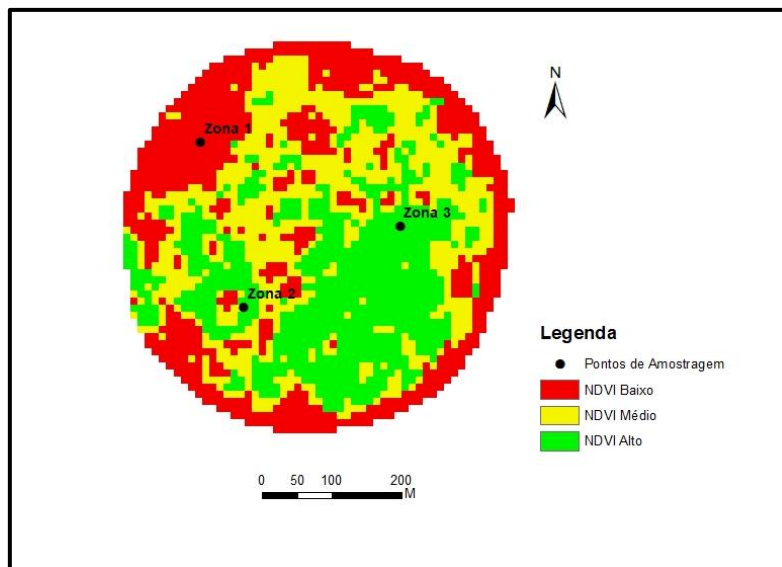


Figura 9- Carta do NDVI com as zonas de gestão

Na figura 9, é exibido o mapa das três zonas de gestão que foram selecionadas devido às variações no comportamento do NDVI. Essas áreas específicas foram escolhidas estrategicamente para permitir a colheita de dados biométricos, para avaliar o crescimento e o desenvolvimento das plantas, incluindo a colheita das amostras do solo e os seus respetivos resultados.

Considerando os parâmetros registados, destaca-se a altura das plantas, altura das espigas, biomassa total da planta, peso das espigas, número de linhas por espiga, número de grãos por linha e peso de 100 grãos. Além de fornecer os dados sobre as características individuais das plantas, esses dados permitiram determinar a densidade das plantas por hectare em cada uma das zonas e a produtividade estimada para cada. As zonas foram classificadas conforme os seus níveis de vigor vegetativo.

A Zona 1 foi classificada como zona de baixo vigor vegetativo onde os valores do NDVI estavam na ordem de 0,70, a Zona 2 designada como Zona de médio vigor vegetativo com o NDVI na ordem 0,73, e a Zona 3 como de alto vigor vegetativo onde o NDVI ronda na ordem de 0,75. Estes valores, permitiram calcular a densidade de plantas nas zonas e posteriormente correlacionar com a produtividade estimada para cada uma das zonas para determinar diferenças significativas nas zonas de gestão.

4.1. Relação da Produtividade x NDVI

Conforme o gráfico apresentado na figura 10, é possível observar claramente uma forte correlação positiva entre o NDVI e a produção do milho. Os dados mostram que a Zona 1 conforme o comportamento espectral apresenta níveis baixo de produção e isso deve-se talvez à densidade de plantas destas zonas bem como às características do solo, vemos claramente diferenças significativas.

A Zona 1 apresenta uma população de 13 plantas em 3m² ou 43.000 plantas/ha e uma produtividade média de 2,0 t/ha. Enquanto a Zona 2 considerada como zona de média produção, possui uma população de 17 plantas em 3m² ou 56.000 plantas/ha e uma produtividade média de 3,6 t/ha e a Zona 3, considerada como a zona de alta produtividade possui uma população de 20 plantas em 3m² ou 66.000 plantas/ha e a produtividade média 5,20 t/ha. O teste da ANOVA, (Tabela 5) sugere que o valor p (Pr(>F)) é (2.54e-05), indicando que existem diferenças significativas entre as zonas.

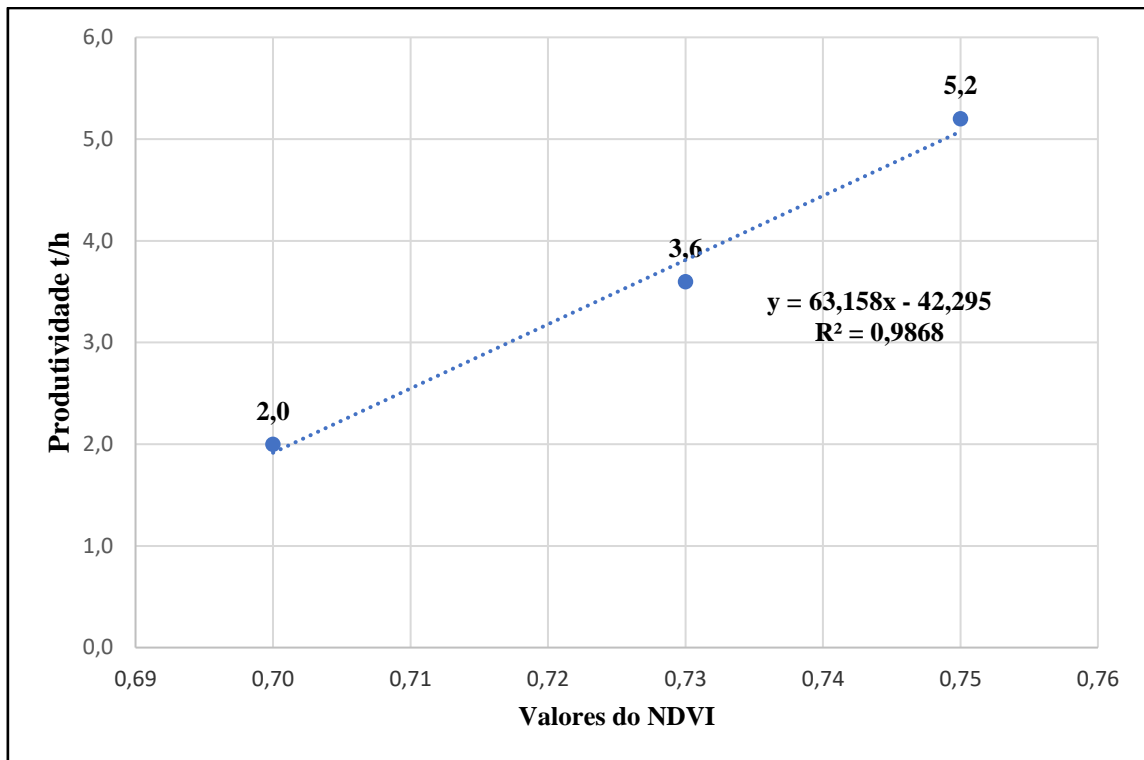


Figura 10- Relação entre a produtividade e o NDVI

4.2. Análise de correlação vs NDVI

A análise de correlação serve para medir o grau de relação existente entre duas ou mais variáveis num determinado estudo. A mesma é medida através do coeficiente de correlação de Pearson que varia de -1 a 1.

Outros dados foram analisados ao longo do ciclo da cultura. Esses dados sugerem que existem variações nas zonas, o que resulta em algumas diferenças estatísticas entre elas.

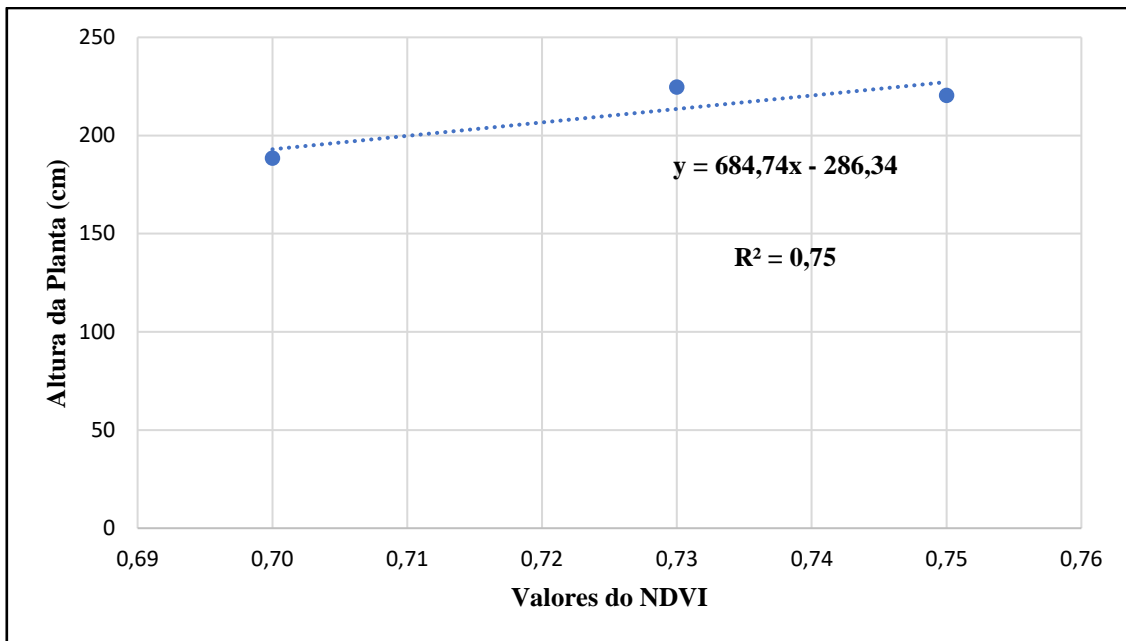


Figura 11- Relação entre a Altura da Planta e o NDVI

O gráfico de dispersão apresentado na Figura 11 ilustra a relação entre o NDVI e a altura das plantas de milho. Ao analisar os resultados, observa-se uma correlação moderada entre os pontos, formando uma linha reta ascendente. Isso sugere que, à medida que os valores do NDVI aumentam, a altura das plantas também tende a aumentar. Essa tendência indica que as plantas bem desenvolvidas e saudáveis tendem a ter um NDVI mais alto e, conseqüentemente, crescem mais em altura.

Como se observa o gráfico anterior (Figura 11) a equação polinomial $y = 684,74x - 286,34$, confirma essa tendência positiva. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) de 0,7575 indica que aproximadamente 75,75% da variação na altura das plantas de milho pode ser explicada pela variação no NDVI. Isso reforça a relação entre essas duas variáveis.

No entanto feito a ANOVA (Tabela 4) o valor de ($Pr(>F)$) é de 0,0828 que aceita a hipótese nula de que não existem diferenças significativas entre as zonas. Isso leva-nos a referir que pelo facto da Zona 1 ter menor densidade de plantas, esperava-se que estas plantas estivessem mais desenvolvidas em altura, . Esta situação não aconteceu, apesar de ter espaços vagos pela falha na sementeira, houve uma forte invasão das plantas infestantes que competiram com a cultura do milho, tornando-as mais pequenas, dificultando assim o seu bom desenvolvimento.

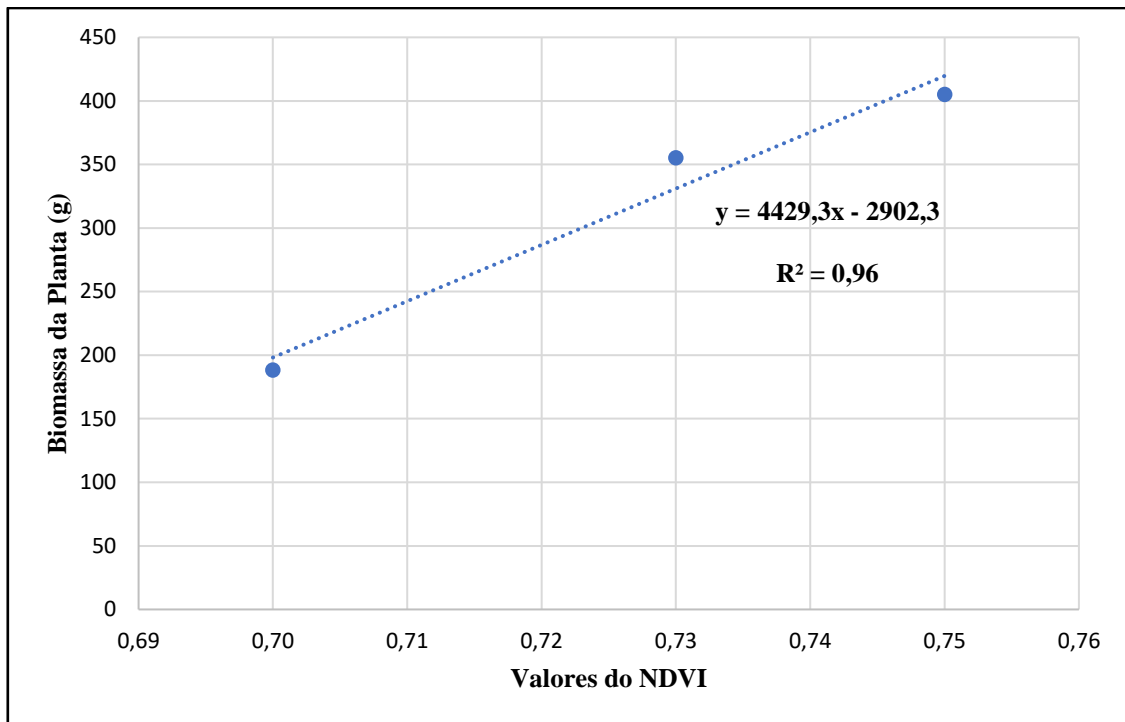


Figura 12- Relação entre a Biomassa e o NDVI

O gráfico de dispersão apresentado na Figura 12 representa a relação entre o NDVI e os valores da biomassa total das plantas. Ao analisar este gráfico, é evidente que os pontos formam uma linha reta positiva ascendente, o que sugere que, à medida que os valores do NDVI aumentam, a biomassa das plantas tende a seguir a mesma tendência de crescimento.

Além disso, percebe-se mediante a análise do gráfico anterior Figura 12, a equação polinomial, $y = 4429,3x - 2902,3$, reforça a tendência positiva observada no gráfico, indicando que à medida que o NDVI aumenta, espera-se um aumento na biomassa do milho. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9655$) destaca que aproximadamente 96,55% da variação na biomassa das plantas de milho pode ser explicada pela variação no NDVI. Isso reforça ainda mais a forte relação entre essas duas variáveis. As infestantes apresentam valores altos de NDVI, o que poderia comprometer a leitura desse índice. No entanto, na Zona 3, seus valores de NDVI não foram superiores aos da cultura. Isso sugere que a Zona 1 possui características no solo que dificultam tanto o crescimento do milho quanto das infestantes.

Feito a ANOVA, (Tabela 4) o valor de $Pr(>F)$ é de $0,03$, afirma-se que existem diferenças significativas entre as zonas.

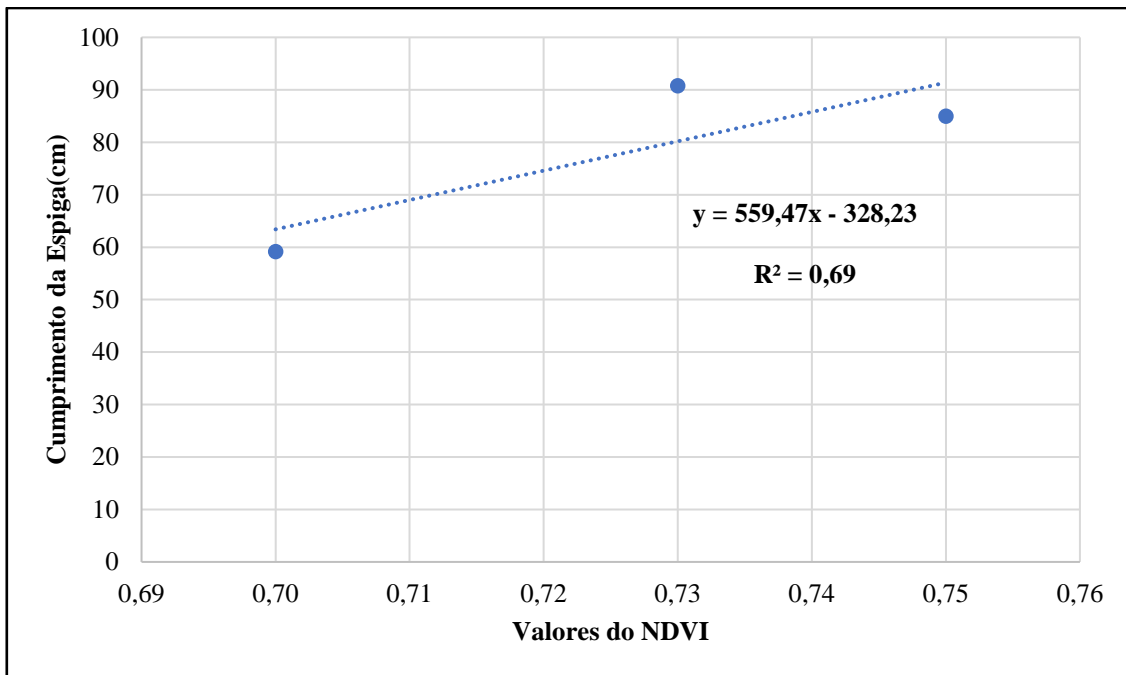


Figura 13- Relação entre Comprimento da Espiga e o NDVI

A Figura 13 apresenta um gráfico de dispersão que ilustra a relação entre o NDVI e o comprimento da espiga de milho. A partir da análise desse gráfico, observa-se uma tendência ascendente, indicando que à medida que os valores do NDVI aumentam, comprimento da espiga de milho também aumenta.

Como se observa o gráfico anterior Figura 13 a equação polinomial $y = 559,47x - 328,23$, reforça a ideia de uma correlação positiva entre essas duas variáveis. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) é de 0,6982, o que significa que aproximadamente 69,82% da variação na altura da espiga pode ser atribuída à variação do NDVI. Isso sublinha a influência significativa do NDVI na determinação da altura da espiga de milho.

No que diz respeito à análise estatística, (Tabela 4) o valor de $Pr(>F)$ é de 0,00294. Mesmo sendo um valor baixo, é inferior ao nível de significância pré-definido de 0,05. Portanto, afirma-se que existem diferenças significativas no comprimento das espigas entre as diferentes zonas. A Zona 2, em particular, chama a atenção devido ao tamanho superior das suas espigas quando comparadas com outras zonas.

No entanto, ao comparar especificamente as Zonas 2 e 3 através da análise de variância ANOVA, (Tabela 4) o valor de $Pr(>F)$ é de 0,517. Esse resultado aceita a hipótese de que não existem diferenças estatisticamente significativas na altura das espigas entre essas

duas zonas. Assim, pode-se concluir que as espigas da Zona 2 e 3 são estatisticamente semelhantes no seu tamanho.

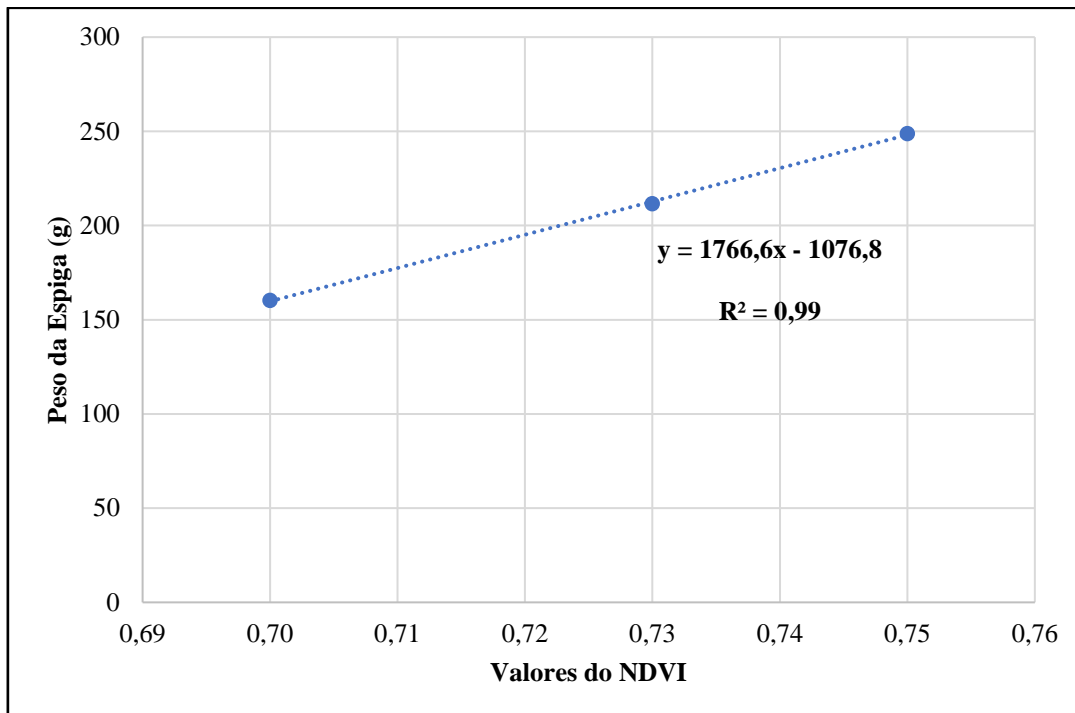


Figura 14- Relação entre o Peso da Espiga e o NDVI

A Figura 14 apresenta um gráfico de dispersão que descreve a relação entre o NDVI e o peso da espiga de milho, medido em gramas. Nele, os valores do NDVI oscilam entre 0,69 e 0,76, enquanto os pesos da espiga vão de 50 a 300 gramas.

Ao observar o gráfico, destaca-se uma tendência marcada por uma correlação positiva robusta, evidenciada pelos pontos que formam uma linha reta ascendente. Isso indica que à medida que os valores do NDVI crescem, há também um aumento no peso da espiga de milho.

Esta observação é corroborada pela equação polinomial $y = 1766,6x - 1076,8$. A proximidade dos pontos à linha de regressão denota uma relação extremamente consistente entre as duas variáveis. Mais impressionante é o coeficiente de determinação (R^2) que atinge um valor de 0,9995. Isso sugere que o NDVI é capaz de explicar

praticamente toda a variação no peso das espigas de milho, tornando-se um indicador altamente confiável para este propósito.

Complementando a análise, o resultado do teste ANOVA (Tabela 4) revelaram um valor de $Pr(>F)$ de 0,0194. Isso sugere que existem diferenças estatisticamente significativas entre as zonas.

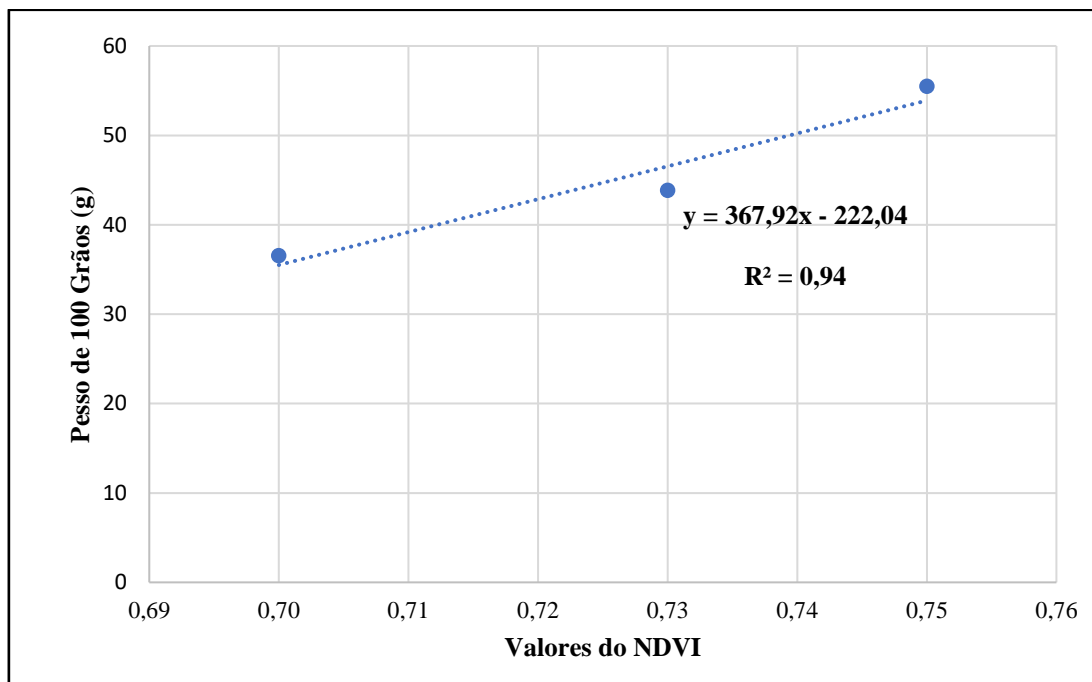


Figura 15- Relação entre o Peso de 100 Grãos e o NDVI

O gráfico de dispersão na Figura 15 representa a relação entre o NDVI e o peso de 100 grãos. Ao analisarmos o gráfico, é claramente visível uma forte tendência positiva, na qual os pontos formam uma linha reta ascendente. Isso sugere que à medida que os valores do NDVI aumentam, o peso dos grãos também tende a aumentar.

Além disso, observa-se no gráfico anterior Figura 15 a equação polinomial $y = 367,92x - 222,04$, e o valor de $R^2 = 0,9406$, são notavelmente elevados. Esses números indicam que aproximadamente 94,06% da variação no peso dos grãos pode ser explicada pela variação no NDVI. Isso reforça a tendência positiva observada no gráfico, sugerindo que o NDVI é um preditor confiável para o peso dos grãos.

No que diz respeito à análise estatística ANOVA, (Tabela 4) o valor de $Pr(>F)$ é de $7,7e-05$, um valor muito baixo. Isso nos leva a rejeitar a hipótese nula de que não existem diferenças significativas entre as zonas. Portanto, a relação entre o NDVI e o peso dos

grãos é estatisticamente significativa, o que indica que o NDVI tem um impacto estatisticamente significativo no peso dos grãos e que essa relação varia entre diferentes zonas.

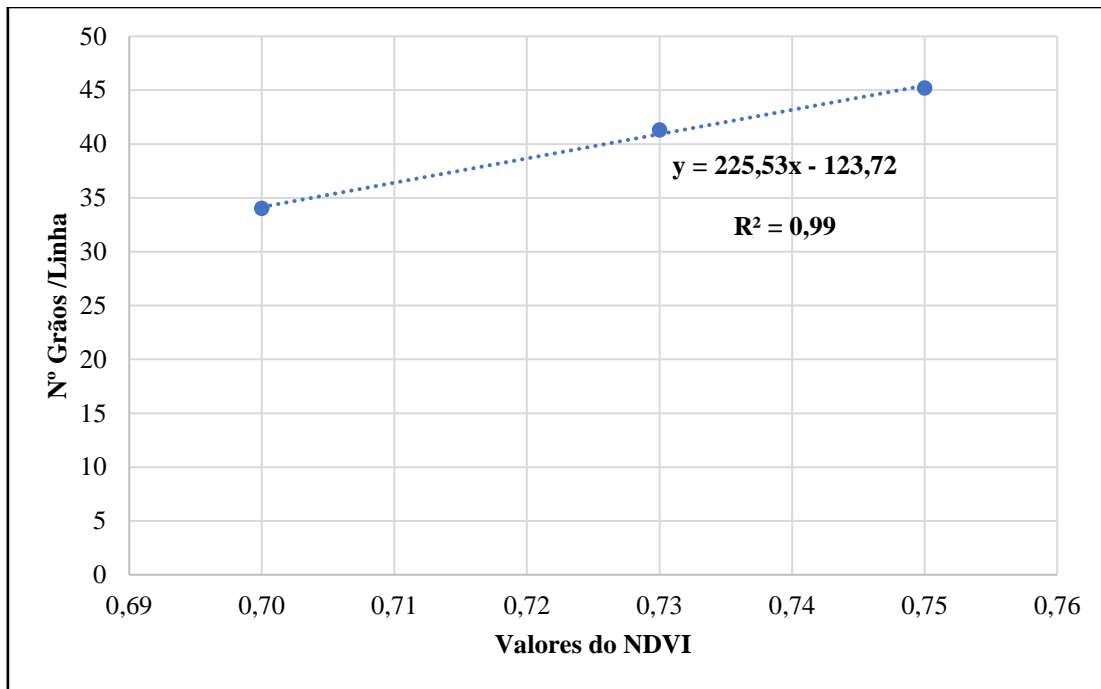


Figura 16- Relação entre o Nº de Grão/Linha e o NDVI

A Figura 16 mostra um gráfico de dispersão que ilustra a relação entre o NDVI e o número de grãos por linhas. No gráfico, observa-se que os valores do NDVI oscilam entre 0,69 e 0,76, enquanto o número de fileiras de grãos varia de 0 a 50.

O gráfico revela uma forte relação positiva entre o NDVI e o número de grãos por linha. Esta relação é expressa pela equação polinomial $y = 225,53x - 123,72$. A proximidade dos pontos à linha de regressão demonstra que a relação entre essas duas variáveis é consistente e previsível, fazendo do NDVI um indicador confiável para prever a produtividade de grãos nas espigas de milho.

Apesar da aparente correlação visual, foi feita a ANOVA, (Tabela 4) que revelou um valor de $Pr(>F)$ de 0,232. Considerando que o valor de referência foi de 0,05, esse resultado sugere que aceitar a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas na relação observada.

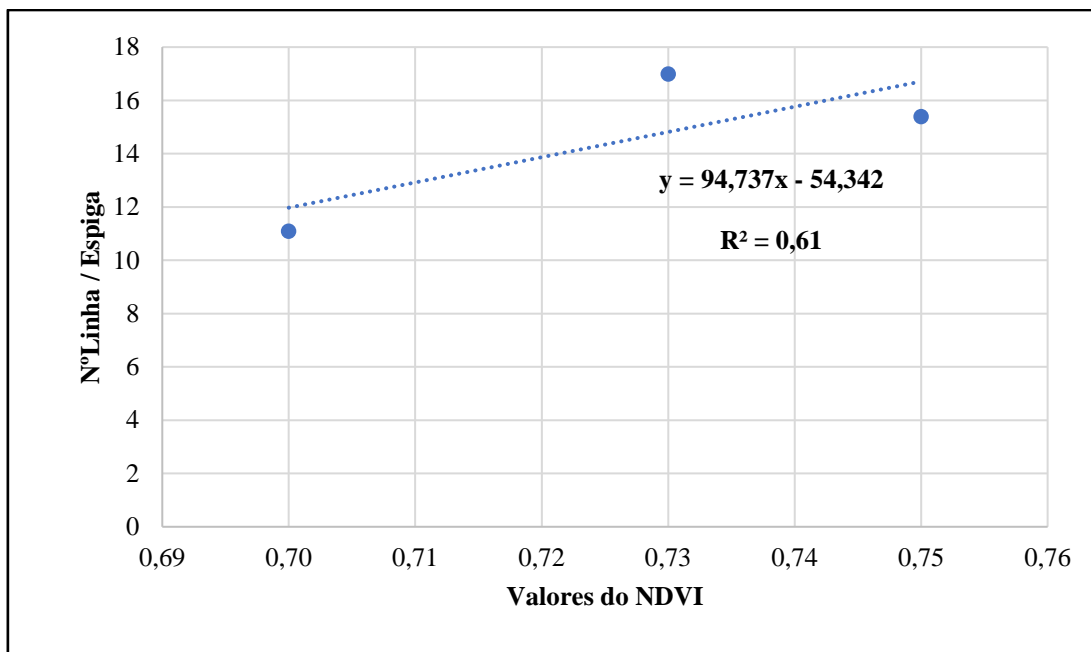


Figura 17- Nº Linha/Espiga

O gráfico de dispersão apresentado na Figura 17 representa a relação entre o NDVI e o número de linhas de grãos por espiga. Os valores do NDVI variam de 0,69 a 0,76, enquanto o número de linhas por espiga varia de 2 a 18. Ao analisar o gráfico, é possível observar uma tendência positiva, na qual os pontos formam uma linha reta ascendente. Isso sugere que, à medida que os valores do NDVI aumentam, o número de fileiras de grãos de milho também tende a aumentar.

Além disso a equação polinomial $y = 94,737x - 54,342$, na Figura 17 demonstra que a dispersão dos pontos ao longo da linha de regressão é moderada, indicando alguma variação nos dados. O coeficiente de correlação linear (R^2) de 0,6105 indica que o NDVI explica aproximadamente 61,05% da variação no número de linha por espiga. Embora esse valor não seja tão alto quanto em gráficos anteriores, ainda sugere uma correlação moderada entre o NDVI e o número de linha por espiga.

Entretanto, feita ANOVA, (Tabela 4) os resultados sugerem que o valor de $Pr(>F)$ é 0,0121 afirmando que existem diferenças estatisticamente significativas entre as zonas. Porém, para esta variável, verificou-se que as espigas da Zona 2 apresentam uma quantidade maior de número de linhas por espigas. Apesar dos dados e os gráficos apresentarem alguma discrepância, achou-se conveniente fazer ANOVA (Tabela 7) entre a Zona 2 e 3 e os resultados mostram que o $Pr(>F)$ de 0,129 está acima do valor de

referência de 0,05. Isso significa que apesar de notarmos diferenças numéricas, as mesmas não impactam suficientemente nas espigas que nos leva a afirmar que não há diferenças estatisticamente significativas entre as duas zonas.

4.3. Análise da Variância (ANOVA)

O principal objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade da cultura do milho nas diferentes zonas. A produtividade do milho, especialmente quando focada no grão, é uma métrica vital para avaliar a viabilidade e eficácia das práticas agrícolas em diferentes ambientes.

Para garantir uma avaliação precisa, tornou-se indispensável analisar a variância dos dados recolhidos, processo conhecido como ANOVA. A mesma permitiu uma comparação sistemática da produtividade do milho nas três zonas, fornecendo maior perspectivas sobre possíveis diferenças e semelhanças em termos de produção.

No entanto, antes de avançar com a ANOVA, é crucial assegurar que os dados sejam cumpram os pressupostos exigidos. Um dos pressupostos centrais da ANOVA é a normalidade dos dados. Por isso, os testes de normalidade foram realizados para determinar se os dados de produtividade nas diferentes zonas se conformavam a uma distribuição normal.

Utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, uma ferramenta estatística amplamente reconhecida na avaliação da normalidade dos dados. A premissa central deste teste é avaliar a hipótese nula de que uma amostra de dados provém de uma distribuição normal. Se a hipótese nula é rejeitada, isso indica uma violação da normalidade dos dados.

Em termos práticos, um valor-p resultante do teste inferior a 0,05 sugere que os dados não são normalmente distribuídos. Os detalhes e resultados deste teste podem ser encontrados no anexo.

Tabela 4- Anova para as diferentes variáveis

| Variáveis | DF | F | Pr(>F) | Significância |
|------------------|----|----|----------|---------------|
| Produtividade | 2 | 16 | 2,54E-05 | ds |
| Altura da Espiga | 2 | 7 | 0,00294 | ds |
| Altura Planta | 2 | 2 | 0,0828 | nds |
| Biomassa Total | 2 | 4 | 0,03 | ds |
| Peso da Espiga | 2 | 4 | 0,0194 | ds |
| Peso 100 Grãos | 2 | 13 | 7,70E-05 | ds |
| Nº Grãos/Linha | 2 | 1 | 0,232 | nds |
| Nº Linha/Espiga | 2 | 5 | 0,0121 | ds |

ds-diferenças estatisticamente significativas; não existem diferenças estatisticamente significativas

Ao avaliar os dados apresentados na Tabela 4, surge um entendimento mais profundo das interações entre diferentes variáveis nas três zonas. A análise estatística ANOVA demonstrou que para variáveis como "Produtividade", "Altura da Espiga", "Biomassa Total", "Peso da Espiga", "Peso 100 Grão" e "n.º Linha/Espiga", existem diferenças estatisticamente significativas entre as zonas.

Na Zona 1, a produção foi mais baixa, facto que se pode atribuir em grande parte à densidade reduzida de plantas. Este valor estava aquém do ideal, e consequentemente, teve um impacto negativo na produtividade. Adicionalmente, o prevaecimento de infestantes nesta zona influenciou negativamente em quase todas as outras variáveis.

Por outro lado, na Zona 2, embora tenha enfrentado desafios com a germinação, conseguiu manter um número estável de linhas por espiga. Nota-se que, mesmo com uma produção menor quando comparada à Zona 3, existe uma densidade aproximada de 20000 plantas/ha nesta zona e pareceu ser benéfica para a formação de mais linhas nas espigas.

Contudo, nem todas as variáveis apresentaram diferenças significativas entre as zonas. Como "Altura da Planta" e "n.º Grão/Linha", a análise sugere uma consistência entre as zonas, evidenciando de que não há diferenças significativas (Tabela 4).

Para aprofundar o nosso estudo, foi imprescindível realizar uma análise comparativa mais detalhada, estabelecendo comparações bipartidas - entre a Zona 1 e 2, Zona 1 e 3, e por fim, Zona 2 e 3. Essa abordagem permitiu-nos ter uma visão mais granular das especificidades de cada zona e das potenciais recomendações para otimizar a produção.

Tabela 5- Anova para a Zona 1 e Zona 2

| Variáveis | DF | F | Pr(>F) | Significância |
|------------------|----|-------|----------|---------------|
| Produtividade | 1 | 9 | 7,44E-03 | ds |
| Altura da Espiga | 1 | 2,144 | 0,16 | nds |
| Altura Planta | 1 | 3 | 0,0798 | nds |
| Biomassa Total | 1 | 4 | 0,0668 | nds |
| Peso da Espiga | 1 | 2 | 0,16 | nds |
| Peso 100 Grãos | 1 | 9 | 6,73E-03 | ds |
| Nº Grãos/Linha | 1 | 3 | 0,124 | nds |
| Nº Linha/Espiga | 1 | 8 | 0,00974 | ds |

ds-diferenças estatisticamente significativas; dns-diferenças não existem estatisticamente significativas

As análises estatísticas realizadas da Tabela 5 demonstraram que existem diferenças significativas entre as Zonas 1 e 2 no que se refere às variáveis "Produtividade", "Peso dos Grãos" e "Número de Linhas por Espiga". Com a rejeição das hipóteses nulas para essas variáveis, fica claro que as zonas influenciam de maneira significativa a produtividade, o peso dos grãos e o número de linhas por espiga.

Contrariamente, para as variáveis "Altura da Espiga", "Altura da Planta", "Biomassa Total", "Peso da Espiga" e "Número de Grãos por Linha", as hipóteses nulas foram mantidas, indicando que não há diferenças significativas entre as Zonas 1 e 2 com relação a estas métricas.

A explicação para essa discrepância reside principalmente nas características distintas dos solos em cada uma das zonas. A Zona 1 é caracterizada por ter um solo mais arenoso, que apresenta deficiências notáveis de fósforo e zinco, elementos cruciais para o crescimento saudável das plantas e para a produção de grãos. Essa zona também apresenta baixos níveis de nutrientes secundários, como manganês e cobre, e uma alta concentração de infestantes que competem pelos nutrientes e recursos disponíveis, influenciando adversamente as variáveis em estudo.

Por sua vez, na Zona 2, as análises do solo revelaram um pH baixo, classificado como ácido, e altos níveis de potássio, que podem afetar a solubilidade dos nutrientes essenciais, alterando assim as condições ideais para o crescimento das plantas.

Ao entender estas nuances, é possível perceber que as condições do solo em cada zona têm um papel determinante nas diferenças observadas e nas variáveis analisadas.

Tabela 6- Anova para Zona 1 e Zona 3

| Variáveis | DF | F | Pr(>F) | Significância |
|--------------------|----|------|----------|---------------|
| Produtividade | 1 | 34 | 1,74E-05 | ds |
| Altura da Espiga | 1 | 8,37 | 0,00965 | ds |
| Altura Planta | 1 | 4 | 0,0655 | nds |
| Biomassa da Planta | 1 | 9 | 0,00845 | ds |
| Peso Espiga | 1 | 10 | 0,00528 | ds |
| Peso 100 Grãos | 1 | 23 | 1,46E-04 | ds |
| Nº Grão/Linha | 1 | 2,84 | 0,109 | nds |
| Nº Linha/Espiga | 1 | 5 | 0,0364 | ds |

ds-diferenças estatisticamente significativas; não existem diferenças estatisticamente significativas

A Tabela 6 detalha os resultados estatísticos de diversas variáveis relacionadas a cultura do milho nas Zonas 1 e 3. Nas análises, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre estas zonas para as variáveis "Produtividade", "Altura da Espiga", "Biomassa da Planta", "Peso da Espiga", "Peso de 100 Grãos" e "Número de Linhas por Espiga". De facto, para estas variáveis, as hipóteses nulas foram rejeitadas, o que significa que existem diferenças estatisticamente significativas.

Por outro lado, no que se refere às variáveis "Altura da Planta" e "Número de Grãos por Linha", as hipóteses nulas foram aceites. Isso indica que entre as Zonas 1 e 3, para essas duas variáveis específicas não existem diferenças significativas, enquanto as outras indicam diferenças evidentes.

Ao analisar mais a fundo as características de cada zona, algumas particularidades merecem destaque:

- A Zona 3 possui características topográficas que lhe conferem uma leve inclinação, favorecendo a retenção de água no solo. Esta retenção pode estar diretamente relacionada com a maior disponibilidade de nutrientes, ainda que tenha sido identificada uma deficiência de fósforo nesta região.
- Em comparação com a Zona 1, a Zona 3 apresenta uma maior densidade de plantas. Contudo, a presença de plantas invasoras é mais acentuada na Zona 1.

- Elementos como a topografia, as especificidades do solo arenoso, a densidade de plantas e o desafio com as infestantes são fatores determinantes nas discrepâncias observadas entre as duas zonas.

Tabela 7- Anova para Zona 2 e Zona 3

| Variáveis | DF | F | Pr(>F) | Significância |
|--------------------|-----------|----------|------------------|----------------------|
| Produtividade | 1 | 7,132 | 0,0156 | ds |
| Altura da Espiga | 1 | 0,437 | 0,517 | ds |
| Altura Planta | 1 | 0,008 | 0,93 | nds |
| Biomassa da Planta | 1 | 0,606 | 0,447 | nds |
| Peso Espiga | 1 | 2 | 0,152 | nds |
| Peso 100 Grãos | 1 | 7,02 | 0,0163 | ds |
| Nº Grão/Linha | 1 | 0,011 | 0,918 | nds |
| Nº Linha/Espiga | 1 | 2,537 | 0,129 | nds |

ds-diferenças estatisticamente significativas; nds-não existem diferenças estatisticamente significativas

Conforme detalhado na Tabela 7, os resultados da ANOVA mostram diferenças estatísticas significativas entre as Zonas 2 e 3 para determinadas variáveis. Especificamente, as variáveis "Produtividade", "Peso de 100 Grãos" e "Biomassa da Planta" as hipóteses nulas para estas variáveis foram rejeitadas o que quer dizer que existem diferenças significativas.

Em contraste, não foram observadas diferenças significativas para as variáveis "Altura da Planta", "Altura da Espiga", "Peso da Espiga", "Número de Grãos por Linha" e "Número de Linhas por Espiga". Para essas variáveis, as hipóteses nulas foram aceites, indicando que, estatisticamente falando, as Zonas 2 e 3 são semelhantes quando se trata dessas variáveis.

As diferenças observadas entre as Zonas 2 e 3 estão fortemente associadas às condições do solo de cada uma delas. Na Zona 2, o solo é caracterizado por ter um pH ácido e na Zona 3, existe uma deficiência marcante de fósforo. Curiosamente, estas variações no solo não parecem influenciar diretamente a produtividade das plantas em nossa análise.

Apesar de se observar um número elevado de linhas por espiga na Zona 2, é essencial destacar que a Zona 3 possui uma densidade de plantas significativamente maior. Esta

densidade mais elevada pode ser um fator determinante nas diferenças de produtividade entre as duas zonas.

4.4. Propostas para Otimização da Produtividade do Milho

Para se aprimorar a produtividade na cultura do milho exige uma abordagem inovadora na gestão das parcelas. Contudo, esta não se deve cingir apenas à avaliação biométrica das áreas em foco. Muitos estudos apontam para a eficácia de estratégias que englobam o uso de imagens de satélite, especialmente considerando os valores do NDVI.

Ao cruzar os indicadores do NDVI com os dados recolhidos in loco e ao aplicar análises estatísticas adequadas, evidencia-se a pertinência de gerir de forma distinta a cultura do milho, assente nas tecnologias de agricultura de precisão. Esta metodologia promove uma afetação mais direcionadas dos recursos, culminando numa melhoria da produtividade do milho.

Na Figura 9, a área destacada a amarelo, ou seja, Zona 2, com base nos valores do NDVI e nos dados biométricos, indica uma produtividade média de milho de 3,6t/h, um valor que classificamos como baixo. Tudo aponta para que esta seja uma área de menor fertilidade, dado que tanto as características do solo como as biométricas das plantas sugerem isso. Assim, faz todo o sentido que esta zona seja gerida de forma distinta das áreas assinaladas a verde.

Ao analisar os valores referentes ao solo, verifica-se que o pH desta área é particularmente baixo. Um detalhe crucial é que quanto mais baixo o pH, maior tende a ser a concentração de manganês no solo. Esta relação direta entre a acidez do solo e a presença elevada de manganês pode tornar o solo potencialmente fitotóxico.

Portanto, propomos uma intervenção direcionada para corrigir essa acidez, visando aumentar o pH e, assim, equilibrar a disponibilidade de nutrientes no solo. Notou-se também valores elevados do potássio e quando isso acontece a capacidade de troca catiónica (CTC) é muitas vezes dominada por íons de hidrogénio (H^+) e alumínio (Al^{3+}). Um excesso de potássio pode competir com outros catiões benéficos, como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), fundamentais para corrigir a acidez do solo. Se o potássio deslocar esses catiões, será um grande desafio para corrigir o pH do solo.

Dada esta complexidade, é imperativo adotar uma estratégia de gestão do solo que vise corrigir a acidez e equilibrar a presença de nutrientes. A proposta de aplicar uma dose de 8t/ha de calcário é uma medida acertada neste sentido. O calcário não só irá aumentar o pH, reduzindo a acidez, como também fornecer o cálcio e magnésio, que poderão ajudar a equilibrar a CTC.

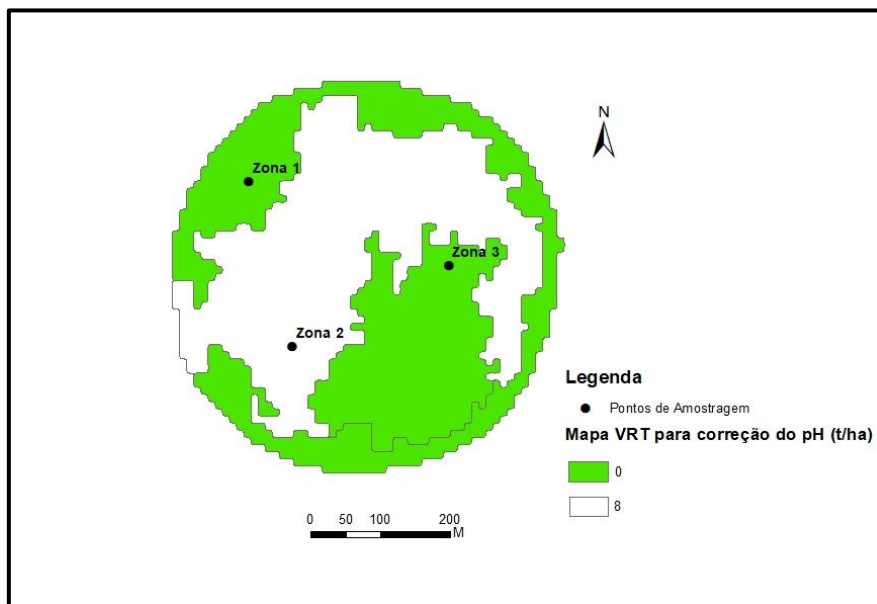


Figura 18- Mapa VRT Aplicação de Calcário

Propõe-se aplicação de calcário nesta parcela (Figura 18) e ajustar adequadamente os altos níveis de potássio, conseguir-se-á não só otimizar a fertilidade do solo, mas como também maximizar o rendimento da cultura do milho.

Esta intervenção reduz os níveis de toxicidade dos elementos como o alumínio e potencia a eficiência de outros fertilizantes. Além disso, a correção do solo poderá contribuir para uma estrutura mais equilibrada e saudável, favorecendo uma melhor permeabilidade, essencial para um crescimento robusto da cultura.

Porem, apesar das diferenças significativas do ponto de vista da produtividade entre as Zonas 1 e 2, os resultados da análise do solo (Tabela 2) e os dados biométricos revelaram diferenças significativas em quase todos os parâmetros avaliados. Mas mesmo assim é necessário gerir elas de forma diferentes. Feita análise do solo, o que nos chamou à atenção foram os valores baixos do teor de fósforo encontrados.

Apesar do fósforo não constituir um fator limitante nesse contexto, propomos uma intervenção direcionada para aumentar a fertilidade do solo.

Propõe-se também (Figura 19) elevar os níveis de fósforo para 75Kg/ha nas duas zonas Zona 1 e 3 com a quantidade adequada de fósforo, o milho amadurece de forma mais uniforme, potencializa os seus rendimentos e fortalece a sua resistência contra doenças.

Embora a Zona 1 indique uma de elevada fertilidade, comprovada pelas características biométricas, quando se trata das características do solo, ambas as Zonas 1 e 3 devem ser geridas de forma similar.

Os valores entre ambas não apresentam grandes diferenças numéricas. Em suma, não existe variabilidade suficiente entre as duas para justificar um tratamento diferenciado.

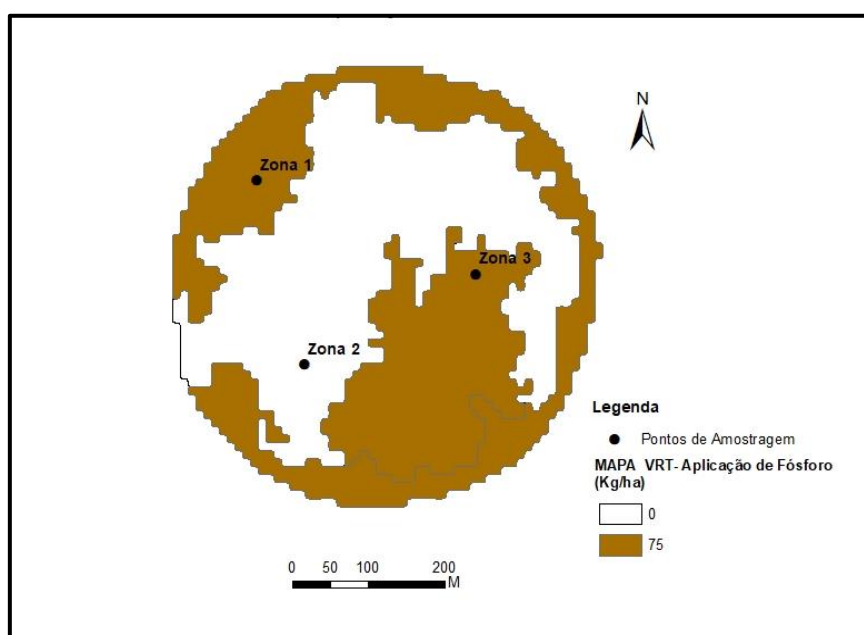


Figura 19- Mapa VRT Aplicação de Fósforo

Analisando as características do solo apresentadas na Tabela 2, verifica-se que não existem grandes diferenças entre as Zonas 1 e 3. Contudo, ao nível da produtividade, as disparidades são notórias.

Face a esta divergência, propõe-se uma estratégia de sementeira diferenciada para cada Zona (Figura 20). Mais concretamente, aconselha-se que, na Zona 1, se utilize uma densidade de 50kg/ha, enquanto na Zona 2 a densidade recomendada é de 30kg/ha de sementes de milho, com o intuito de minimizar potenciais perdas.

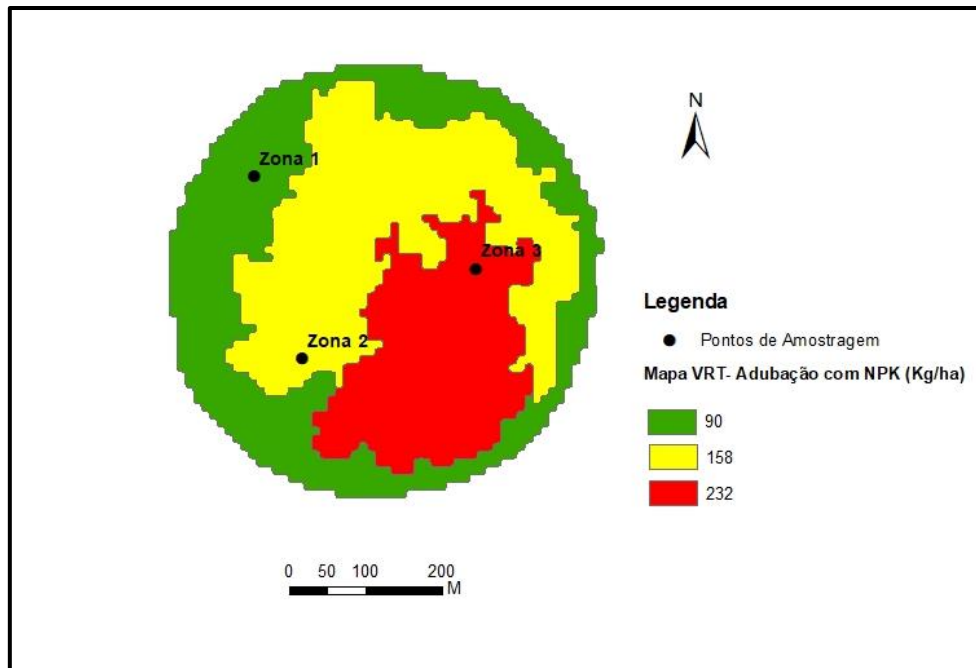


Figura 20- Mapa VRT- Aplicação de Sementes

Sendo o milho, reconhecida como uma cultura que esgota os solos, necessita de uma nutrição equilibrada para garantir a sustentabilidade. O composto NPK (Azoto, Fósforo e Potássio) representam os três macro elementos primários de que a planta mais precisa. Nesse sentido, é vital repor aquilo que é extraído e determinar as quantidades corretas de NPK para garantir a sustentabilidade da cultura.

Assim, sugere-se (Figura 21) que a compensação pela extração dos nutrientes seja feita tendo em conta a produtividade de cada zona. Para a Zona 1, que registou uma produção de 2t/ha, propõe-se uma reposição de 90kg/ha do adubo ternário NPK. Já para a Zona 2, com uma produção de 3,6t/ha, sugere-se 158kg/ha. Por fim, para a Zona 3 que produziu 5,2t/ha, a proposta é de 235kg/ha. Esta diferenciação justifica-se, pois, cada zona apresenta níveis de produtividade distintos e, como tal, merece um tratamento diferenciado.

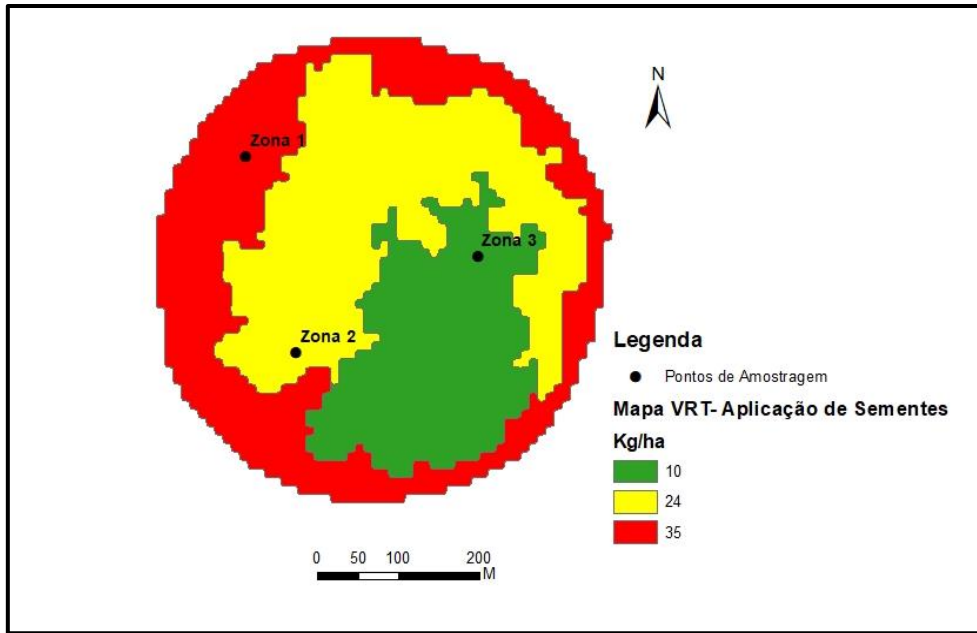


Figura 21- Mapa VRT -Adubação com NPK

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Destacando a importância da Detecção Remota, de acordo com a revisão bibliográfica realizada nesta dissertação, verificou-se que se trata de uma área com bastantes aplicações ligadas aos fatores de produção e em função do tipo de cultura e dos meios de produção. Este tipo de dados permite fazer a monitorização das culturas e contribuir para o aumento da eficiência de aplicação dos fatores de produção na otimização económica e gestão sustentável.

Como foi referido na introdução desta dissertação, o objetivo deste estudo foi utilizar os dados de deteção remota para avaliar e monitorizar a cultura do milho, e identificar quais as variáveis mais influenciadoras da produtividade do milho. E com base nos resultados propor medidas que visem precisamente aumentar essa produtividade.

A monitorização e avaliação da cultura do milho permitiu a recolha de dados ao longo do desenvolvimento da cultura, o que permitiu avaliar de forma mais precisa a produção do milho e também perceber quais as variáveis que mais influenciam significativamente os fatores de produção.

As variáveis controladoras da produtividade neste estudo foram:

1. A incidência de infestantes na Zona 1 - promovendo a competição com o milho.
2. A densidade de sementes por germinação deficiente ou morte de plantas germinadas reduzindo o potencial produtivo.
3. A fertilidade do solo - a parcela em estudo apresentou altos níveis de ácidos e deficiências em fósforo, influenciando dessa forma a produção.

Uma vez identificadas as variáveis, levou-nos a propor um tratamento adequado para cada uma das zonas produtivas.

- ❖ Para Zona 1 - aumento da densidade de sementes e aplicação diferenciada de fósforo.
- ❖ Para Zona 2 - correção da acidez do solo.
- ❖ Para Zona 3 - aplicação diferenciada de fósforo.

Os dados obtidos por meio de detecção remota mostraram ter uma relevante importância no estudo, permitindo a obtenção de dados sobre a cultura do milho em diferentes zonas ao longo do seu ciclo produtivo. Através do índice de vegetação NDVI, foi possível identificar variáveis que influenciam na eficiência dos fatores de produção, como as técnicas agrícolas, densidade de sementes, acidez do solo e a carência de fósforo. Também permitem validar modelos entre os dados de satélite e dados recolhidos no campo e identificar e elaborar propostas técnicas para aumentar a produtividade das culturas, promovendo a sustentabilidade económica e ambiental.

A metodologia desenvolvida neste estudo revelou-se um bom indicador de produtividade, permitindo identificar as variáveis mais relevantes a um custo reduzido, que pode ser utilizado pelos agricultores. A aplicação desta metodologia de tratamento diferenciado destaca-se por demonstrar um potencial significativo do aumento do ganho para os agricultores, quando comparada com a metodologia convencional atualmente utilizada.

Os resultados obtidos neste estudo abrem boas perspectivas relativamente ao uso de tecnologias de agricultura de precisão para a monitorização da cultura do milho em Angola, bem como, para outras culturas de interesse económico no país.

6. Referências Bibliográficas

- Abreu Júnior, C.A.M.D. (2022). Estimativa de produtividade da cultura do milho a partir de imagens multiespectrais. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.264>.
- Adhikari, K., Smith, D.R., Collins, H., Haney, R.L., & Wolfe, J.E. (2021). Corn response to selected soil health indicators in a Texas drought. *Ecological Indicators*, 125, 107482.
- Ahmad, I., Saeed, U., Fahad, M., Ullah, A., Habib ur Rahman, M., Ahmad, A. & Judge, J. (2018). Previsão de rendimento de milho de primavera usando sensoriamento remoto e modelagem de colheita em Faisalabad-Punjab, Paquistão. *Jornal da Sociedade Indiana de Sensoriamento Remoto*, 46, 1701-1711. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0825-8>.
- Avozani, A. (2023). Suprimento hídrico e índices de vegetação para estimativa de produtividade de milho com machine learning. Dissertação de Mestrado em Agricultura de Precisão universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/29498>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., & Raes, D. (1998). Smith. M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper n 56. FAO. Roma.
- Almeida, M.L.D., Merotto Junior, A., Sangoi, L., Ender, M., & Guidolin, A.F. (2000). Incremento na densidade de plantas: uma alternativa para aumentar o rendimento de grãos de milho em regiões de curta estação estival de crescimento. *Ciência Rural*, 30 (1): 23-29.
- Amaral, L.R.D., & Molin, J.P. (2011). Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1633-1642.
- Anderson, M.C., Kustas, W.P., & Norman, J.M. (2007). Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing. *Agronomy Journal*, 99(1), 240-254.
- Barker, D.W. & Sawyer, J.E. (2012). Usando sensoriamento ativo do dossel para ajustar a taxa de aplicação de nitrogênio no milho. *Agronomy Journal*, 104 (4), 926-933.
- Bausch, W. C. (1995). Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*, 27(1), 55-68.

- Bergamaschi, H., Radin, B., Rosa, L.M.G., Bergonci, J.I., Aragonés, R., Santos, A.O., & Langensiepen, M. (2001). Estimating maize water requirements using agrometeorological data. *Revista argentina de agrometeorología*, 1(1), 23-7.
- Bredemeier, C., Variani, C., Almeida, D., & Rosa, A.T. (2013). Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. *Ciência Rural*, 43, 1147-1154.
- Borgogno-Mondino, E., Novello, V., Lessio, A. & Palma, L. (2018). Describing the spatio-temporal variability of vines and soil by satellite-based spectral indices: A case study in Apulia (South Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 42-50.
- Cardoso, C.H., Tomazeli, V.D.S. & Gomes, M.F. (2021). Correlação entre índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) e produtividade na cultura do Milho Segunda safra.
- Cibula, W., Zetka, E. & Rickman, D. (1992). Response of thematic bands to plant water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 13:1869-1880.
- Silva, J.A., Bredemeier, C., Vian, A.L., Fochesatto, E., Turra, M.A. & Drum, M.A. (2016). Análise da densidade populacional de milho no comportamento espectral do NDVI e sua relação com o rendimento de grãos. XXXI Congresso Nacional do Milho e Sorgo.
- Silva, P.R.F., Rizzardi, M.A., Trezzi, M.M., & Almeida, M.L. (1995). Densidade e arranjo de plantas em girassol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 30(6), 797-810.
- Costa, R.D.J.T. (2017). Avaliação e Caracterização da Variabilidade Espacial da Fertilidade do Solo Numa Parcela de Milho. Elaboração das Cartas de Prescrição (Doctoral dissertation, Universidade de Lisboa (Portugal)).
- Damian, J.M., Pias, O.H.D.C., Cherubin, M.R., Fonseca, A.Z.D., Fornari, E.Z., & Santi, A.L. (2019). Applying the NDVI from satellite images in delimiting management zones for annual crops. *Scientia Agricola*, 77.
- Dinis, A.C. (2006). Características mesológicas de Angola. Nova Lisboa. Disponível em: <https://worldcat.org/title/caracteristicas-mesologicas-de-angola>.
- Droogers, P., Immerzeel, W.W., & Lorite, I.J. (2010). Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1351-1359.

- Farg, E., Arafat, S., Abd El-Wahed, M. & El-Gindy, A. (2017). Evaluation of water distribution under pivot irrigation systems using remote sensing imagery in eastern Nile delta. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20: S13–S19.
- Fernandes, P. (2016). Estimativa da produtividade de milho (*Zea Mays L.*) através de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/4842>.
- Fensholt, R. & Sandholt, I. (2013). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87: 111–121.
- Fontoura, S.M.V., & Bayer, C. (2009). Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro-sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1721-1732.
- Freie Universität Berlin. (2022). Sentinel 2. <https://blogs.fu-berlin.de/reseda/sentinel-2/>.
- Fontoura, S.M.V. (2005). Adubação nitrogenada na cultura do milho em Entre Rios, Guarapuava, Paraná. Guarapuava, Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, p.95.
- Gao, B. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257–266
- González-Dugo, M. P., & Mateos, L. (2008). Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural water management*, 95(1), 48-58.
- GROHS, D.S. (2009). Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., & Dextraze, L. (2002). Índices integrados de vegetação de banda estreita para previsão do conteúdo de clorofila em culturas para aplicação na agricultura de precisão. *Sensoriamento remoto do ambiente*, 81 (2-3), 416-426.
- Hauagge, T. S. & Madalóz, J. C. (2020). Como estimar a produtividade do milho. Disponível em: <<https://www.pioneersementes.com.br/blog/26/como-estimar-aprodutividade-do-milho>>. Acesso dia 31 de maio de 2023.
- Huete, A., Justice, C., & Van Leeuwen, W. (1999). Índice de vegetação MODIS (MOD13). Documento de base teórica do algoritmo, 3 (213), 295-309.

- Hunsaker, D.J., Pinter, P.J., Barnes, E.M., & Kimball, B.A. (2003). Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation science*, 22, 95-104.
- Inman, D., Khosla, R., Reich, R.M., & Westfall, D.G. (2007). Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. *Precision Agriculture*, 8, 241-252.
- Johnson, L.F., & Trout, T.J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing*, 4(2), 439-455.
- Kaufman, Y.J., & Tanre, D. (1992). Índice de vegetação resistente à atmosfera (ARVI) para EOS-MODIS. *IEEE transações em Geociência e Sensoriamento Remoto*, 30 (2), 261-270.
- Li, G., Han, W., Dong, Y., Zhai, X., Huang, S., Ma, W., & Wang, Y. (2023). Multi-Year Crop Type Mapping Using Sentinel-2 Imagery and Deep Semantic Segmentation Algorithm in the Hetao Irrigation District in China. *Remote Sensing*, 15(4), 875.
- Lofton, J., Tubana, B.S., Kanke, Y., Teboh, J., Viator, H., & Dalen, M. (2012). Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors*, v.12, n.6, p.7529–7547.
- Madonsela, S., Cho, M.A., Naidoo, L., Main, R., & Majozi, N. (2022). Exploring the utility of Sentinel-2 for estimating maize chlorophyll content and leaf area index across different growth stages. *Journal of Spatial Science*, 1-13.
- Marchão, R.L., Brasil, E.M., Guimarães, C.M., & Gomes, J.A. (2005). Densidade de plantas e características agrônômicas de híbridos de milho sob espaçamento reduzido entre linhas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 35(2), 93-101.
- Martin, K.L., Girma, K., Freeman, K.W., Teal, R.K., Tubaña, B., Arnall, D.B., & Raun, W.R. (2007). Expressão da variabilidade no milho influenciada pelo estágio de crescimento utilizando medidas de sensores ópticos. *Jornal de Agronomia*, 99(2), 384-389.
- Expression of spatial variability in corn (*Zea mays* L.) as influence by growth stage using optical sensor measurements. *Agronomy Journal*, v.54, n.2, p.384-389.
- Martin, K.L.; Raun, W. & Solie, J. (2012). By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. *Journal of Plant Nutrition*, v.35, n.9, p.1429-1439.
- Matias, J.F.G., Streck, L., & Aguilar, D.D. (2015). Geração de mapas de produtividade de milho (*Zea mays*) com índice de vegetação NDVI de imagens Landsat 8. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Direções futuras da agricultura de precisão. *Agricultura de precisão*, 6, 7-23.
- Meirelles, L.F.D. (2022). Predição da produtividade de milho (zea mays l) por meio da interpretação temporal de índices de vegetação. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Agrônômica UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15993>.
- Merotto Júnior, A., Almeida, M.L. & Fuchs, O. (1997^a). Aumento no rendimento de grãos de milho através do aumento da população de plantas. *Ciência Rural*, 27 (4): 549-554.
- Miura, T., Huete, A.R., Yoshioka, H., & Holben, B.N. (2001). Uma análise de erro e sensibilidade dos índices de vegetação resistente à atmosfera derivados da correção atmosférica baseada em alvos escuros. *Sensoriamento remoto do ambiente*, 78 (3), 284-298.
- Molin, J.P., Frasson, F. R., Amaral, L.R., Povh, F.P., & Salvi, J.V. (2010). Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 1345-1349.
- Moreira, R.D.C. (2000). Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação. São José dos Campos. 181p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) -INPE.
- Mundstock, C.M. (1977). Densidade de semeadura de milho para o Rio Grande do Sul. UFRGS: ASCAR.
- Naka, J.T. (2019). Correlação do índice de vegetação por diferença normalizada com parâmetros químicos do solo para aplicações em agricultura de precisão (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Nunes, M.R., van Es, H.M., Schindelbeck, R., Ristow, A.J., & Ryan, M. (2018). O plantio direto e a diversificação do sistema de cultivo melhoram a saúde do solo e o rendimento das culturas. *Geoderma*, 328, 30-43.
- Parmar, S.H., Patel, G.R. & Tiwari, M.K. (2023). Avaliação da exigência hídrica da cultura do milho usando sensoriamento remoto e SIG. *Tecnologia Agrícola Inteligente*, 4, 100186.
- Ponzoni, F.J., & Shimabukuro, Y.E. (2010). Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos. SP: Parêntese.
- Prado, L.A.Z.D. (2021). Produtividade da cultura do milho sob diferentes doses de nitrogênio em sistemas e não irrigados (Bachelor's thesis, Agronomia).

- Ribeiro, G., Castro Silva, J.N., & Silva, J.B. (2016). Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS): estado da arte e suas potencialidades. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(06), 2054-2074.
- Rissini, A.L.L., Kawakami, J. & Genú, A.M. (2015). Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1703-1713.
- Saavedra, N.J.C. (2020). Avaliação do potencial das imagens dos Satélites Sentinel 2 na monitorização do cumprimento de alguns dos requisitos da PAC (Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora).
- Serrano, L.; Filella, I. & Peñuelas, J. (2000) Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, v.40, n.1, p.723-731.
- Shanmugapriya, P., S. Rathika, T. Ramesh & Janaki, P. (2019). Applications of Remote Sensing in Agriculture - A Review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 8(01): 2270-2283. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.238>.
- Shanahan, J.F., Schepers, J.S., Francis, D.D., Varvel, G.E., Wilhelm, W.W., Tringe, J.M., & Major, D.J. (2001). Uso de imagens de sensoristamento remoto para estimar a produtividade de grãos de milho. *Agronomy Journal*, 93 (3), 583-589.
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R., Schepers, J. & Gitelson, A. (2008). Medições de refletância do sensor ativo do status de nitrogênio do milho e potencial de rendimento. *Agronomy Journal*, 100 (3), 571-579.
- Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N. & Mochizuki, K.I. (2018). Classificação de culturas a partir de índices de vegetação derivados do Sentinel-2 usando aprendizado conjunto. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12 (2), 026019-026019.
- Soratto, R.P., Pereira, M., Costa, T.A.M.D. & Lampert, V.D.N. (2010). Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. *Revista Ciência Agronômica*, 41, 511-518.
- Sousa, A.M.O. & Marques da Silva, J.R. (2017). Fundamentos Teóricos de Detecção Remota. Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora, 57.
- Steffen, C.A. & Solar, R. (2011). Introdução ao sensoriamento remoto. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE, São José dos Campos São—

SP. Available online: <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm> (accessed on 16 August 2023).

- Toureiro, C., Serralheiro, R., Shahidian, S., & Sousa, A.M.O. (2017). Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Management*, 184, 211-220.
- Uebel, J.D. (2015). Avaliação de fungicidas no controle de doenças foliares, grãos ardidos e efeito no ndvi (índice de vegetação por diferença normalizada) em híbridos de milho. Dissertação (Mestrado em Agronomia) —Universidade de Brasília, Brasília <http://dx.doi.org/10.26512/2015.05.D.19019>.
- Van Es, H.M. & Karlen, D.L. (2019). A reanálise valida a sensibilidade do indicador de saúde do solo e a correlação com rendimentos de culturas de longo prazo. *Soil Science Society of America Journal*, 83 (3), 721-732.
- Venancio, L.P., Filgueiras, R., da Cunha, F.F., dos Santos Silva, F.C., dos Santos, R.A., & Mantovani, E.C. (2020). Mapping of corn phenological stages using NDVI from OLI and MODIS sensors Mapeamento dos estádios fenológicos da cultura do milho utilizando o NDVI derivado dos sensores OLI e MODIS. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, 41(5), 1517-1534.
- Wahab, I., Hall, O., & Jirström, M. (2018). Sensoriamento remoto de rendimentos: Aplicação do ndvi derivado de imagens de UAV para estimar o vigor do milho e os rendimentos em sistemas agrícolas complexos na África subsaariana. *Drones*, 2 (3), 28. <https://doi.org/10.3390/drones2030028>.
- Wójtowicz, M., Wójtowicz, A., & Piekarczyk, J. (2005). Aplicação de métodos de sensoriamento remoto na agricultura. *Communications in biometry and crop science*, 11 (1), 31-50.
- Xue, J. & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, v. 2017, 17pp.
- Zhang, Y., & Wegehenkel, M. (2006). Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. *Remote sensing of Environment*, 104(4), 393-408.

ANOVA

ANOVA results for: Al_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|------------|
| Zonas | 2 | 5862 | 2931 | 7.292 | 0.00294 ** |
| Residuals | 27 | 10853 | 402 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Al_P

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 2 | 9087 | 4544 | 2.736 | 0.0828 . |
| Residuals | 27 | 44836 | 1661 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Bio_M

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 2 | 142446 | 71223 | 4.005 | 0.03 * |
| Residuals | 27 | 480099 | 17781 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Pes_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 2 | 50813 | 25407 | 4.578 | 0.0194 * |
| Residuals | 27 | 149843 | 5550 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: N_lin_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 2 | 176.1 | 88.03 | 5.219 | 0.0121 * |
| Residuals | 27 | 455.4 | 16.87 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: N_G_L

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 2 | 387 | 193.4 | 1.544 | 0.232 |
| Residuals | 27 | 3383 | 125.3 | | |

ANOVA results for: Pe_100

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|-------------|
| Zonas | 2 | 3956 | 1978.1 | 13.73 | 7.7e-05 *** |
| Residuals | 27 | 3890 | 144.1 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Prod

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|----------|----------|---------|--------------|
| Zonas | 2 | 44560181 | 22280091 | 16.06 | 2.54e-05 *** |
| Residuals | 27 | 37464443 | 1387572 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ZONA 1 e 2

ANOVA results for: A1_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|---------|----|
| Zonas | 1 | 5008 | 5008 | 9.369 | 0.00673 | ** |
| Residuals | 18 | 9621 | 534 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: A1_P

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|---|
| Zonas | 1 | 6552 | 6552 | 3.448 | 0.0798 | . |
| Residuals | 18 | 34203 | 1900 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Bio_M

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|---|
| Zonas | 1 | 65769 | 65769 | 3.805 | 0.0668 | . |
| Residuals | 18 | 311138 | 17285 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Pes_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|--|
| Zonas | 1 | 11343 | 11343 | 2.144 | 0.16 | |
| Residuals | 18 | 95230 | 5291 | | | |

ANOVA results for: N_lin_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|---------|----|
| Zonas | 1 | 174.0 | 174.05 | 8.357 | 0.00974 | ** |
| Residuals | 18 | 374.9 | 20.83 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: N_G_L

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|--|
| Zonas | 1 | 266.4 | 266.4 | 2.606 | 0.124 | |
| Residuals | 18 | 1840.1 | 102.2 | | | |

ANOVA results for: Pe_100

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|--------|---------|---------|---------|----|
| Zonas | 1 | 698.6 | 698.6 | 9.37 | 0.00673 | ** |
| Residuals | 18 | 1341.9 | 74.5 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Prod

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | |
|-----------|----|----------|---------|---------|---------|----|
| Zonas | 1 | 9826618 | 9826618 | 9.091 | 0.00744 | ** |
| Residuals | 18 | 19456566 | 1080920 | | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Anova Zona 2 e 3

ANOVA results for: A1_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 101 | 101.2 | 0.437 | 0.517 |
| Residuals | 18 | 4170 | 231.7 | | |

ANOVA results for: A1_P

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 10 | 9.8 | 0.008 | 0.93 |
| Residuals | 18 | 22389 | 1243.8 | | |

ANOVA results for: Bio_M

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 12450 | 12450 | 0.606 | 0.447 |
| Residuals | 18 | 370081 | 20560 | | |

ANOVA results for: Pes_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 14114 | 14114 | 2.236 | 0.152 |
| Residuals | 18 | 113607 | 6312 | | |

ANOVA results for: N_lin_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 61.3 | 61.25 | 2.537 | 0.129 |
| Residuals | 18 | 434.5 | 24.14 | | |

ANOVA results for: N_G_L

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 1.8 | 1.8 | 0.011 | 0.918 |
| Residuals | 18 | 2953.0 | 164.1 | | |

ANOVA results for: Pe_100

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 1 | 1311 | 1311.4 | 7.02 | 0.0163 * |
| Residuals | 18 | 3363 | 186.8 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Prod

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|----------|----------|---------|----------|
| Zonas | 1 | 12507293 | 12507293 | 7.132 | 0.0156 * |
| Residuals | 18 | 31567272 | 1753737 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ZONA 1 e3

ANOVA results for: A1_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|------------|
| Zonas | 1 | 3685 | 3685 | 8.379 | 0.00965 ** |
| Residuals | 18 | 7915 | 440 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: A1_P

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 1 | 7069 | 7069 | 3.846 | 0.0655 . |
| Residuals | 18 | 33079 | 1838 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Bio_M

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|------------|
| Zonas | 1 | 135449 | 135449 | 8.739 | 0.00845 ** |
| Residuals | 18 | 278979 | 15499 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Pes_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|------------|
| Zonas | 1 | 50763 | 50763 | 10.06 | 0.00528 ** |
| Residuals | 18 | 90849 | 5047 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: N_lin_E

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|----------|
| Zonas | 1 | 28.8 | 28.800 | 5.112 | 0.0364 * |
| Residuals | 18 | 101.4 | 5.633 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: N_G_L

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------|
| Zonas | 1 | 312.1 | 312.1 | 2.847 | 0.109 |
| Residuals | 18 | 1972.9 | 109.6 | | |

ANOVA results for: Pe_100

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|--------|---------|---------|--------------|
| Zonas | 1 | 3924 | 3924 | 22.97 | 0.000146 *** |
| Residuals | 18 | 3075 | 171 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANOVA results for: Prod

| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|-----------|----|----------|----------|---------|--------------|
| Zonas | 1 | 44506361 | 44506361 | 33.51 | 1.74e-05 *** |
| Residuals | 18 | 23905047 | 1328058 | | |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1