



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MOÇAMBIQUE

Faculdade de Ciências Agronómicas

**Quantificação da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogénio (N₂)
em solos com culturas diversas para apoiar sistemas de agricultura sustentável.**

Por

Raúl Domingos Mussane

Cidade de Cuamba,

Novembro de 2023

Quantificação da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogénio (N₂) em solos com culturas diversas para apoiar sistemas de agricultura sustentável.

Raúl Domingos Mussane

Trabalho de monografia apresentado à
Universidade Católica de Moçambique –
Faculdade de Ciências Agronómicas como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Licenciatura em Agronomia.

Supervisores: Doutor José do Rosário Bofana (Ph.D), *Principal*
 Mestre Barreta C. V. Savanguane (MBA), *Co-supervisor*

Faculdade de Ciências Agronómicas
Novembro de 2023

**QUANTIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA FIXAÇÃO E
ABSORÇÃO DE NITROGÊNIO (N₂) EM SOLOS COM CULTURAS
DIVERSAS PARA APOIAR SISTEMAS DE AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL**

RAÚL DOMINGOS MUSSANE

O presente trabalho é submetido a Universidade Católica de Moçambique, Faculdade de Ciências Agronómicas, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Agronomia.

Aprovação do Júri:

O presente trabalho foi sujeito a avaliação do júri no dia 14 de Dezembro de 2023, tendo sido aprovado com a classificação final de 15 valores.

Júri Examinador:

Presidente: Sueco Albino Cipriano

Eng^o. Sueco Albino Cipriano, MSc (UCM-FCA)

Oponente: José Ubeliso Savanguane

Eng^o. José Savanguane, MSc (UCM-FCA)

Supervisor: José do Rosário Profana

Doutor José Bofana, Ph.D (UCM-FCA)

Cuamba, Janeiro de 2024

FINANCIAMENTO

Este trabalho foi realizado com o financiamento de:

- ☐ Projecto SAFE (Sasakawa Africa Fund for Extension Education), Sasakawa Africa Association (SSA): *Projecto de Desenvolvimento de Pesquisas de Agricultura Regenerativa*;
- ☐ Universidade Católica de Moçambique – Faculdade de Ciências Agronómicas, Cuamba;
- ☐ Sociedade Algodoeira do Niassa - Grupo João Ferreira dos Santos, Cuamba;

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Eu, **Raúl Domingos Mussane**, estudante matriculada com o nº de estudante 704190112, no curso de Licenciatura em Agronomia, autor do trabalho de monografia, submetido à Faculdade de Ciências Agronómicas da Universidade Católica de Moçambique, intitulado ***Quantificação da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogénio (N₂) em solos com culturas diversas para apoiar sistemas de agricultura sustentável***, orientado pelo Doutor José do Rosário Bofana e Mestre Barreta Carlos Velasco Savanguane, declaro que este é original, nunca foi antes submetido a outra instituição para efeitos de obtenção de grau. Declaro ainda que toda a informação apresentada no trabalho é resultado da investigação de campo e da revisão da literatura, cujas fontes utilizadas encontram-se devidamente citadas no texto e listadas nas referências bibliográficas.

Cidade de Cuamba, Novembro de 2023

Raúl Domingos Mussane

DEDICATÓRIA

*Dedico as palavras deste trabalho a minha mãe Lordina
Moisés Zitha, mulher de força incomparável cujas
palavras o Deus eterno chama-me para que as guarde
como tesouro e a revista sobre mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todas as pessoas especiais que fazem parte da minha jornada:

A Deus, agradeço por ser a luz que guia meus caminhos e me concede sabedoria, força e amor em todos os momentos da vida até mesmo quando o cansaço prevalecia.

À querida família Mussane e Zitha, minha gratidão é profunda por compartilharem suas vidas, amor e confiança para comigo. Em memória de Domingos Salomão Mussane, sua luz continua a brilhar em nossos corações. À Lordina Moisés Zitha, seu amor incondicional é um exemplo inspirador. Aos amados irmãos Gércia, Rolanda, Márcia, Imércia e Celso, nossa união é um tesouro valioso que fortalece nossa família.

À tia Ana Paula Moisés Zitha, sua presença amorosa e seus conselhos sábios são um bálsamo para minha alma. À família Antunes, nossa amizade e cumplicidade são tesouros que valorizo profundamente.

Aos amigos Armando Bartolomeu, Gerson Lipanga, Emília Hilario Abazura e Prescila Machacha, vocês são como raios de sol em minha vida, e sua lealdade e companheirismo são inestimáveis. Aos companheiros de campo Jardel, Cleiton e Yunet, compartilhamos experiências que enriqueceram nossos conhecimentos e fortaleceram nosso espírito de equipe.

Que Deus abençoe a todos nós, fortaleça nossos laços e nos conceda paz, amor e felicidade em cada passo que damos. Que estejamos unidos, não apenas nas alegrias, mas também nos momentos desafiadores. Que Ele continue nos guiando e inspirando a sermos melhores, espalhando bondade e compaixão em nosso caminho.

Agradeço também de forma extrema ao supervisor, José Bofana, por sua orientação e apoio ao longo desta jornada de pesquisa. Suas contribuições foram inestimáveis para o sucesso deste trabalho.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

A agricultura sustentável desempenha um papel crucial na preservação do ambiente e na melhoria da qualidade dos produtos agrícolas. O conhecimento preciso das quantidades de nutrientes no solo é fundamental para determinar a quantidade adequada de fertilizantes a serem aplicados. Com isso em mente, durante a campanha agrícola 2022/23, foi conduzido um experimento para compreender a distribuição espacial da fixação e absorção de nitrogênio (N₂) em solos cultivados com diferentes culturas. Para o experimento, foram estabelecidos três campos experimentais com culturas diversas: milho (variedade local), soja (variedade SAN-BEIB) e algodão (variedade ALBAR SZ9314). Cada campo tinha dimensões de 83,35 m x 30 m. Foi implementada uma grelha de amostragem com dimensões de 13,9 m x 10 m, sobre a qual foram coletadas 24 amostras de solo compostas, cada uma constituída por 5 subamostras, em 12 células, a uma profundidade de 20 cm para cada campo. Foram realizadas coletas antes do plantio e após a colheita, totalizando 12 amostras por período. A análise laboratorial das amostras para a determinação do nitrogênio foi realizada utilizando o método de Kjeldhal. Para mapear a distribuição do nitrogênio fixado e absorvido, foram utilizadas ferramentas como Excel e o método de IDW do ArcGIS. Essas análises revelaram padrões distintos de absorção e fixação. Verificou-se uma variação significativa na dinâmica nos diferentes períodos de análise (antes do plantio e após a colheita) nos campos. Nas culturas de milho e algodão, observou-se alta absorção e uma leve fixação, conforme evidenciado pela diferença nos resultados das amostras coletadas antes do plantio e após a colheita. Surpreendentemente, na soja, observou-se alta absorção e baixa fixação, contrariando as expectativas. Essa peculiaridade dificultou a determinação da periodicidade ideal para essa cultura. Os resultados quantificaram a eficiência específica de absorção em torno de 1.692,29 kg N/ha no algodão, 1.081,5 kg N/ha no milho e 459,215 kg N/ha fixados na soja. Apesar dessas diferenças, o estudo serve como base científica para pesquisas futuras. Com base nos resultados, recomenda-se a continuação da prática de rotação de culturas pelos agricultores para promover a saúde do solo e otimizar a utilização de nutrientes.

Palavras-chave: Solos, Nitrogênio, fixação, absorção, agricultura sustentável, meio-ambiente;

ABSTRACT

Sustainable agriculture plays a crucial role in preserving the environment and improving the quality of agricultural products. Precise knowledge of nutrient quantities in the soil is essential to determine the appropriate quantity of fertilizers to be applied. With this in mind, during the 2022/23 agricultural season, an experiment was conducted to understand the spatial distribution of nitrogen (N₂) credit and debit in soils cultivated with different crops. For the experiment, three experimental fields were established with diverse crops: maize (local variety), soybeans (SAN-BEIB variety), and cotton (ALBAR SZ9314 variety). Each field had dimensions of 83.35 m x 30 m. A sampling grid measuring 13.9 m x 10 m was implemented, from which 24 composite soil samples were collected, each composed of 5 sub-samples, in 12 cells, at a depth of 20 cm for each field. Samples were collected before planting and after harvesting, totalling 12 samples per period for each field. Laboratory analysis of the samples for nitrogen determination was conducted using the Kjeldahl method. To map the distribution of credited and debited nitrogen, tools such as Excel and the IDW method of ArcGIS were employed. These analyses revealed distinct patterns of crediting and debiting. There was a significant variation in dynamics during different analysis periods (before planting and after harvesting) in the fields. In maize and cotton crops, high debiting and slight crediting were observed, as evidenced by the difference in results from samples collected before planting and after harvesting. Surprisingly, in soybeans, high debiting and low crediting were observed, contrary to expectations. This peculiarity hindered the determination of the ideal periodicity crop rotation for this crop. The results quantified the specific debit efficiency around 1,692.29 kg N/ha in cotton, 1,081.5 kg N/ha in maize, and 459.215 kg N/ha credit in soybeans. Despite these differences, the study serves as a scientific basis for future research. Based on the results, it is recommended that farmers continue the practice of crop rotation to promote soil health and optimize nutrient use.

Keywords: Soils, Nitrogen, fixation, absorption, sustainable agriculture.

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
a.C	antes de Cristo
ASS	África Subsaariana
ATP	Adenosina Trifosfato
CG	Capacidade de Germinação
EG	Energia Germinativa
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FBN	Fixação Biológica de Nitrogénio
GPS	Global Positioning System
IDW	<i>Inverse Wheighted Distance</i> (Inverso da Distância Ponderada)
INE	Instituto Nacional de Estatística
MAE	Inverso da Distância Ponderada
N ₂	Nitrogénio
NDVI	<i>Normalized difference vegetation index</i> (Índice Normalizado de Diferença de Vegetação)
ONU	Organização das Nações Unidas
PF	Pureza Física
pH	Potencial Hidrogeniónico
SIG	Sistema de Informação Geografica
TIN	<i>Thiessen Polygon</i>
TMG	Tempo Medio de Germinação
TPP	Tamanho da População de Plantas
UN DESA	Department of Economic and Social Affairs (Departamento de Assuntos Económicos e Sociais das Nações Unidas)
UN SDG's	<i>Sustainable Development Goals</i> (Objectivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas)
VANT	Veículos Aéreos não Tripulados
VG	Velocidade de Germinacao

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Bactérias fixadoras de Nitrogénio por nitrogenase, fonte:(Baldani & Baldani, 2005)	
.....	25
Tabela 2. Teste de Vigor de Sementes	49
Tabela 3. População de plantas ao longo do ciclo das culturas	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de produção e rendimento Global do milho (2000 - 2021)	12
Figura 2. Área de produção e rendimento do milho em Africa (2000 - 2021).....	13
Figura 3. Área de produção e rendimento do milho em Moçambique (2000 - 2021).....	13
Figura 4. Gráfico 4 Área de produção e rendimento de Soja no mundo (2000 - 2021)	14
Figura 5. Area de produção e rendimento de Soja em Moçambique (2016 - 2021)	14
Figura 6. Área de produção e rendimento de Algodão no mundo (2000 – 2021).....	15
Figura 7. Área de produção e rendimento de Algodão em Africa (2000 – 2021).....	15
Figura 8. Área de produção e rendimento de Algodão em Moçambique (2000 - 2021).....	15
Figura 9. Ciclo do Nitrogénio.....	23
Figura 10. Localização geográfica da área de estudo	35
Figura 11. Precipitação ao longo do ciclo das culturas	36
Figura 12. Calendário das principais culturas na região de estudo	36
Figura 13. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	38
Figura 14. Representação do campo e procedimento de amostragem em grelha.....	42
Figura 15. Diferentes pragas e doenças observados no campo	46
Figura 16. Relação entre as variáveis do teste de vigor de sementes	51
Figura 17. Variação do nitrogénio no campo de cultivo de Algodão.....	55
Figura 18. Variação do nitrogénio no campo de cultivo de Milho.....	55
Figura 19. Variação do nitrogénio no campo de cultivo da Soja	56
Figura 20. Distribuição espacial do Nitrogénio total no campo de algodão.....	57
Figura 21. Distribuição espacial do Nitrogénio total no campo de milho	60
Figura 22. Distribuição espacial do Nitrogénio total no campo de Soja	62

ÍNDICE

Conteudos	Pág.
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Problematização.....	3
1.3. Justificativa.....	4
1.4. Objectivos.....	5
1.4.1. Objectivo geral	6
1.4.2. Objectivos específicos.....	6
1.5. Perguntas de investigação.....	6
1.6. Estrutura do trabalho	6
CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. Descrição geral das culturas em estudo	9
2.1.1. Milho	9
2.1.2. Soja.....	10
2.1.3. Algodão	10
2.2. Produção Global e local.....	12
2.2.1. Cultura do Milho	12
2.2.2. Cultura da Soja	13
2.2.3. Cultura Algodão	14
2.3. Principais Pragas das culturas.....	16
2.4. O crescimento populacional e gestão das áreas agrícolas	17
2.4.1. Contexto	17
2.4.2. Rotação de culturas com leguminosas	19
2.4.3. Importância do nitrogénio	21
2.4.4. Ciclo do nitrogénio.....	22
2.5. Distribuição espacial de nutrientes no solo	25
2.6. Mapeamento da distribuição espacial de nutrientes	27
2.6.1. Procedimento de amostragem	27
2.6.2. Tipos de amostragem	27
2.6.3. Processamento e análise de amostras	29
2.6.4. Interpoladores espaciais em SIG	31
2.7.1. IDW (Inverso da Distância Ponderada)	31
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	35

3.1. Condições da área de estudo.....	35
3.2. Materiais	37
3.3. Procedimentos metodológicos.....	37
3.3.1. Variáveis de observação ou medição	38
3.3.2. Mapeamento da distribuição espacial da fixação e absorção de N ₂ da absorção	41
3.4. Condução das actividades de campo	45
3.4.1. Delimitação do campo.....	45
3.4.2. Sementeira.....	45
3.4.3. Sacha	45
3.4.4. Pulverizações.....	45
3.5. Análise e processamento de dados	46
3.6. Constrangimentos	47
3.7. Considerações éticas.....	47
CAPÍTULO 4: RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	49
4.1. Teste de vigor de Sementes	49
4.2. População de plantas	52
4.3. Quantificação da fixação e absorção e mapeamento da distribuição espacial do N.....	54
4.3.1. Quantificação da fixação e absorção do N	54
4.3.2. Distribuição espacial do N	56
4.4. Relação entre a população final de plantas e a quantidade de absorção ou fixação de Nitrogénio.....	63
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E INOVAÇÕES.....	67
5.1. Conclusões.....	67
5.2. Recomendações	68
5.3. Inovações para a comunidade local	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICES	91

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Em países em desenvolvimento, como os da África Subsaariana, cerca de 90% da produção de alimentos básicos baseia-se em sistemas de agricultura de sequeiro (Rosegrant & Cline, 2003), nos quais a variação dos padrões climáticos conduzirá a reduções significativas na produção das culturas (Matyas & Silva, 2013; Rosegrant & Cline, 2003). A diminuição da produção alimentar afetará a segurança alimentar nesses países, colocando a população em crescimento em uma situação de elevada vulnerabilidade em termos de segurança alimentar (Zeng et al., 2019).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a população mundial deverá atingir aproximadamente 9,7 mil milhões de pessoas até 2050 (FAO, 2009), com 63,04 milhões dessas pessoas localizadas apenas em Moçambique (Departamento de Assuntos Económicos e Sociais das Nações Unidas, 2006; (Departamento de Assuntos Económicos e Sociais das Nações Unidas (UN DESA), 2022). Para enfrentar o desafio de alimentar essa crescente população e contribuir para a realização dos "Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (UN SDG's)", que têm como objetivo eliminar a fome, garantir a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover uma agricultura sustentável até 2030 (Cunningan & Qin, 2018), é imperativo aumentar a produção total de alimentos (FAO, 2009) sem comprometer outros ecossistemas, intensificando o uso das terras disponíveis (Estel, Kuemmerle, Levers, Baumann, & Hostert, 2016). Portanto, para produzir de maneira intensiva e sustentável, muitos cientistas recomendam a adoção de práticas de agricultura sustentável. Essas práticas incluem estratégias de agricultura de conservação, como a redução das atividades de aração durante o preparo do solo e a implementação de rotações de culturas que incluam leguminosas forrageiras e/ou pequenos grãos (Lehman et al., 2015).

A rotação de culturas com leguminosas (Barros et al., 2020; Neely et al., 2018; Rani et al., 2019) é de particular interesse devido à capacidade dessas plantas, juntamente com seus microrganismos associados, de fixar o nitrogénio atmosférico no solo. O nitrogénio é um fator chave que frequentemente limita a produtividade das culturas (Muratore, Espen, & Prinsi, 2021) por ativar enzimas responsáveis pelo metabolismo primário, como a síntese de proteínas, absorção de íons, fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular (Okumura, Mariano, & Zaccheo, 2012).

O nitrogénio está disponível nas formas inorgânicas de amônia (NH₃), amônio (NH₄⁺), nitrito (NO₂⁻) e nitrato (NO₃⁻), bem como em forma de matéria orgânica viva (biota do solo e restos vegetais e animais frescos) e matéria orgânica não viva, incluindo compostos humificados e não humificados, ou mesmo por fixação biológica (Binotto Fagan, P Medeiros, Manfron, & Casaroli, 2007; Soumare et al., 2020). As plantas assimilam o nitrogénio na forma de amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻) (Robbins, 1937). A fixação de nitrogénio ocorre por meio do processo conhecido como nitrogenase, no qual bactérias do género *Rhizobium* associadas às raízes do hospedeiro são fornecidas com fontes de carbono pelas leguminosas e, em troca, as leguminosas recebem amônia fornecida pelos rizóbios (Goyal, Mattoo, & Schmidt, 2021; Graham & Vance, 2003; Lindström & Mousavi, 2020; Ramírez, 2022). Quando essas leguminosas morrem, são degradadas por bactérias em decomposição, liberando nitrogénio de suas moléculas orgânicas no solo na forma de amônia (Ledgard & Steele, 1992).

A necessidade de nutrientes para as plantas de milho e algodão é determinada pela quantidade de nutrientes que elas extraem do solo durante o ciclo de crescimento (Cipriano & Silva, 2017). No entanto, a distribuição espacial das taxas de absorção de nitrogénio (N) varia de acordo com a localização e a estação agrícola, devido a mudanças imprevistas nos padrões ambientais ou nas práticas agrícolas (Dhital & Raun, 2016). As propriedades químicas e físicas do solo têm sido extensivamente mapeadas com base em técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Um exemplo disso é o estudo realizado por (Bofana & Costa, 2017), que mapeou a variabilidade espacial das propriedades químicas do solo no distrito de Cuamba, Moçambique, permitindo recomendações específicas para tipos de culturas.

Em outro estudo, Lamsal et al. (2009) realizaram o mapeamento da distribuição de NO₃-N (nitrato) no solo em um sistema de uso misto da terra, visando orientar a aplicação de taxa de nitrogénio e avaliar o risco ambiental de lixiviação de NO₃-N para as águas subterrâneas. Embora a rotação entre leguminosas e cereais seja recomendada devido à capacidade das leguminosas de associar-se a bactérias que fixam nitrogénio no solo (Lehman et al., 2015; Rani et al., 2019; Yigezu et al., 2019), ainda há muito a ser explorado em relação à quantidade exata de fixação de nitrogénio da soja e à absorção de nitrogénio em campos de milho e algodão sob diferentes condições de cultivo, especialmente em Moçambique. Com estes pressupostos, a atual pesquisa visa mapear a distribuição espacial da absorção ou fixação de nitrogénio pelos solos em campos de milho, soja e algodão, com o objetivo de fornecer recomendações para sistemas de rotação de culturas mais eficazes.

1.2. Problematização

A rotação de culturas refere-se à alternância regular e planeada de diferentes espécies vegetais na mesma área de produção ao longo do tempo (Duarte Júnior & Cunha Coelho, 2010). Neste processo, várias culturas são utilizadas, e é importante destacar que as leguminosas recebem frequentemente recomendações para fazer parte dessa alternância, especialmente quando são as primeiras a serem cultivadas (Barros et al., 2020). A escolha de incluir culturas da família das leguminosas na rotação, em combinação com outras culturas, como as da família das Poáceas, deve-se à capacidade das leguminosas de realizar a fixação biológica do nitrogénio atmosférico (N_2) no solo (Rodriguez et al., 2020; Stomph et al., 2020; Xiao et al., 2018).

O crescimento populacional rápido tem implicações significativas nos setores de produção e imobiliário (Beckers, Poelmans, Van Rompaey, & Dendoncker, 2020), à medida que áreas habitacionais aumentam, reduzindo as áreas agricultáveis disponíveis. Isso afeta não apenas a produção agrícola, mas também o meio ambiente, resultando na perda de biodiversidade (Putri et al., 2019). A demanda por áreas de produção está em constante crescimento devido ao aumento populacional, levando a uma busca por técnicas alternativas de cultivo, como a hidroponia, na qual as plantas são cultivadas sem solo, recebendo nutrientes minerais essenciais por meio de uma solução nutritiva (Neto & Paes, 2011). No entanto, a hidroponia é dispendiosa, o que leva à intensificação da utilização das áreas já disponíveis em condições em que essa técnica não é viável.

O uso intensivo do solo para fins de produção agrícola tem um impacto negativo, alterando continuamente sua estrutura durante o processo de cultivo, resultando em falta de sistemas de raízes profundas e diversidade funcional de culturas, além de uma dependência excessiva de nutrientes no solo (Mosier, Córdova, & Robertson, 2021). Isso pode esgotar os recursos do solo e torná-lo dependente de fertilizantes sintéticos, como o N_2 , que é essencial para a síntese de proteínas e fotossíntese nas plantas (Reetz, 2016). Para evitar a exaustão dos recursos do solo e a dependência de fertilizantes sintéticos, a rotação de culturas com leguminosas, também conhecida como adubação verde, é amplamente recomendada como um sistema de produção sustentável (Z. Shah, Shah, Peoples, Schwenke, & Herridge, 2003). Isso ocorre devido à capacidade das leguminosas de fixar nitrogénio no solo e aumentar o teor de matéria orgânica. Essa prática melhora o solo e permite a produção contínua sem prejudicar os recursos.

No entanto, a falta de informações precisas sobre a quantidade exata de nitrogénio que as leguminosas podem fixar e o quanto outras culturas, como as Poáceas, consomem durante um ciclo de produção, torna desafiador determinar a frequência ideal para a rotação de culturas,

principalmente para agricultores de subsistência. Com base nesses pressupostos, este estudo propõe responder à seguinte pergunta: ***Qual é a periodicidade ideal para a rotação de culturas entre leguminosas (soja) e póáceas ou oleaginosas (milho e algodão) com base na distribuição espacial do nitrogénio creditado ou debitado em campos cultivados com essas culturas?***

1.3. Justificativa

A determinação da periodicidade ideal para a rotação entre milho, algodão e soja é de extrema importância devido aos benefícios que proporciona. Ao obtermos informações que definam o momento e a maneira mais sustentável de realizar essa prática agrícola, podemos garantir que a produção intensiva não prejudique a qualidade do solo para as gerações futuras. Isso resulta na redução dos impactos ambientais, à medida que diminuimos nossa dependência de insumos sintéticos poluentes e conservamos a biodiversidade ao evitar a expansão descontrolada da produção, o que poderia causar desequilíbrios nos ecossistemas.

Os benefícios não se limitam apenas ao ambiente, pois essa prática também é economicamente vantajosa. A redução dos custos com fertilizantes sintéticos, que são insumos comuns, é um fator importante. Além disso, a cultura da soja tem se destacado como uma fonte de renda para pequenos produtores, o que contribui para a renda familiar após a comercialização do grão. Com o manejo adequado e em condições favoráveis, os rendimentos podem ser significativos, o que beneficia o produtor e o engaja na produção sustentável, equilibrando considerações ambientais com seu próprio bem-estar. Essa abordagem também ajuda a reduzir preocupações relacionadas ao esgotamento de recursos e à poluição ambiental causada pela agricultura. Além disso, contribui para a utilização sustentável dos recursos naturais, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e protegendo a vida existente ao manter o equilíbrio nos ecossistemas. A importância deste estudo pode ser vista sob três ângulos diferentes, incluindo o científico, acadêmico e socioeconômico.

Do ponto de vista científico, este estudo representa uma valiosa contribuição para o corpo de conhecimento existente. Ele fornece uma oportunidade para a pesquisa acadêmica avançar, explorando o delicado equilíbrio entre práticas agrícolas intensivas e a conservação ambiental. Além disso, ao determinar a periodicidade ideal para a rotação de culturas, estar-se-á preenchendo uma lacuna no entendimento científico que pode ser usada como base para futuras pesquisas, refutações ou reafirmações de teorias. No contexto acadêmico, esta pesquisa representa uma oportunidade de iniciação à vida científica, proporcionando aos pesquisadores

em formação a chance de buscar respostas lógicas e racionais para um problema complexo e relevante. Além disso, os resultados obtidos podem servir como um ponto de partida para investigações posteriores, enriquecendo o debate acadêmico e aprofundando a compreensão das questões agrícolas e ambientais.

Do ponto de vista socioeconômico, os benefícios são substanciais. A determinação da periodicidade ideal para a rotação de culturas pode resultar em práticas agrícolas mais sustentáveis, que não apenas preservam a qualidade do solo para as futuras gerações, mas também reduzem os custos associados à aplicação de fertilizantes sintéticos, um insumo oneroso comumente utilizado. Além disso, a promoção da cultura da soja como fonte de renda para pequenos produtores é uma oportunidade para melhorar as condições econômicas das famílias rurais. Em termos de impacto socioeconômico mais amplo, essa pesquisa contribui para a segurança alimentar, ao garantir que as práticas agrícolas sustentáveis possam atender à crescente demanda por alimentos de uma população mundial em crescimento. Também ajuda a mitigar os impactos ambientais negativos da agricultura intensiva, protegendo a biodiversidade e os recursos naturais.

Portanto, esta investigação transcende os limites da agricultura, destacando-se como uma investigação que promove o progresso científico, acadêmico e socioeconômico. Ela representa um compromisso com a sustentabilidade e a prosperidade das gerações atuais e futuras, ao mesmo tempo em que respeita a biodiversidade e o equilíbrio dos ecossistemas.

1.4. Objectivos

O Nitrogénio N_2 desempenha um papel significativo no desenvolvimento das culturas. Assim, a sua adição em quantidades exactas e em locais precisos, permitirá que as culturas o utilizem de acordo com as suas necessidades. A finalidade deste estudo é *conceber recomendações para sistemas de rotação de culturas (ou seja, milho, algodão e soja)*, bem como criar bases para a geração de mapas de prescrição das taxas de N_2 necessárias para o crescimento do milho e algodão, com base na sua distribuição espacial. No final, este estudo utilizará os resultados para ajudar os agricultores na gestão dos campos tanto em termos de utilização de fertilizantes orgânicos (N_2 de leguminosas). Assim, para este estudo serão abordados os seguintes objectivos:

1.4.1. Objectivo geral

Para este estudo tem-se como objectivo geral , o seguinte:

- Quantificar da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogénio (N₂) em solos com culturas diversas para apoiar sistemas de agricultura sustentável.

1.4.2. Objectivos específicos

Para alcançar o objectivo geral, este estudo forçar-se nos seguintes objectivos específicos:

- 1) Determinar o vigor das diferentes sementes para a sementeira;
- 2) Determinar e comparar o tamanho da população de plantas (por hectare) após 15 dias e 45 dias depois da sementeira e 15 dias antes da colheita;
- 3) Mapear a distribuição de N₂ durante o período de pré-sementeira e pós-colheita em todos os campos;
- 4) Quantificar o total de N₂ fixado (cultura de soja) ou absorvido (cultura de milho e algodão), com base na diferença entre a 1ª e 2ª análise;
- 5) Relacionar a população final de plantas com a quantidade de absorção ou fixação de N₂.

1.5. Perguntas de investigação

- 1) Qual é a percentagem de plantas que sobrevivem até ao final em um hectare de área cultivada por diferentes culturas?
- 2) Como é que a distribuição do N₂ se apresenta durante o período de pré-sementeira e pós-colheita em todos os campos?
- 3) Será que a quantidade de Nitrogénio fixada pela cultura de soja (leguminosa) em uma época é suficiente para suprir as necessidades tanto de milho ou de algodão?
- 4) Que impacto o tamanho da população de plantas tem na quantidade final de N creditado ou debitado no solo pelas diferentes culturas?

1.6. Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto de cinco capítulos listados a seguir:

Capítulo 1: Introdução - Este capítulo destaca o problema central da pesquisa, justificando a relevância do estudo e apresenta os objetivos a serem alcançados. Além disso, formula as perguntas de partida que guiam toda a investigação, fornecendo assim uma base sólida para o desenvolvimento deste trabalho

Capítulo 2: Revisão de Literatura - O segundo capítulo contextualiza a pesquisa, relacionando-a com teorias existentes e apresentando uma visão abrangente das investigações anteriores no campo de interesse. Estabelecemos a base teórica e conceitual para o estudo, fundamentando nossas análises e discussões nos conhecimentos já disponíveis.

Capítulo 3: Metodologia - No terceiro capítulo, descrevemos detalhadamente os materiais e métodos utilizados na coleta de dados. Explicamos a abordagem metodológica adotada e demonstramos como os dados foram obtidos para atingir os objetivos da pesquisa. Este capítulo oferece uma visão clara do processo de pesquisa e coleta de informações.

Capítulo 4: Resultados, Análise e Discussão - O quarto capítulo apresenta os resultados da pesquisa de forma clara e concisa. Realizamos uma análise dos dados obtidos, identificando tendências, relações e implicações. Promovemos uma discussão aprofundada dos resultados à luz das pesquisas anteriores, relacionando-os com o problema central da pesquisa.

Capítulo 5: Conclusões, Inovação e Recomendações - No último capítulo, resumimos as principais conclusões do estudo em relação ao problema de pesquisa. Apresentamos recomendações para ações futuras com base nos resultados e conclusões, destacando elementos de inovação que surgiram durante a investigação, se aplicável. Este capítulo encerra o trabalho fornecendo uma visão geral das descobertas e suas implicações práticas e acadêmicas.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Descrição geral das culturas em estudo

2.1.1. Milho

O milho é um cereal essencial que fornece alimentos para seres humanos e gado, além de servir como fonte de combustível e produtos industriais (García-Lara & Serna-Saldivar, 2018; Jabran & Farooq, 2007). Sua história remonta há milhares de anos, tendo sido domesticado na Mesoamérica (Galinat, 1988; García-Lara & Serna-Saldivar, 2018). Com o tempo, o milho se espalhou por várias regiões das Américas e posteriormente para outras partes do mundo, tornando-se uma cultura popular em muitos países. As primeiras provas conhecidas do cultivo de milho remontam a cerca de 9.000 anos atrás, no que é hoje o México (Raaflaub, 2014), a domesticação do milho envolveu a seleção e cultivo de plantas com espigas maiores e mais grãos, e acabou por levar ao desenvolvimento de numerosas variedades com diferentes cores, tamanhos e formas (Galinat, 1988; García-Lara & Serna-Saldivar, 2018; Raaflaub, 2014).

Atualmente, é cultivado globalmente e desempenha um papel vital na segurança alimentar global, sendo utilizado em diversos produtos, desde alimentos até biocombustíveis e materiais industriais. Actualmente, o milho é cultivado em praticamente todos os países do mundo, sendo os maiores produtores de milho são os Estados Unidos, China, Brasil e México (Ranum, Peña-Rosas, & Garcia-Casal, 2014; Soare, Chiurciu, Bălan, & David, 2018). O milho é uma planta pertencente à família das gramíneas, com morfologia e fisiologia típicas desse grupo (García-Lara & Serna-Saldivar, 2018) Sua parte aérea é composta por caule, folhas, espigas e flores, enquanto suas raízes se ramificam a partir da raiz principal (Australian Government, 2008).

O milho é uma planta C4, o que lhe confere maior eficiência fotossintética em ambientes quentes e secos (Borba et al., 2023; Gao et al., 2023). Seu ciclo de vida é anual, dividido em fases vegetativa e reprodutiva, com a floração influenciada por fatores ambientais. O milho requer nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, além de água e luz solar adequadas para um bom desenvolvimento (Massimi, 2023). Suas condições de cultivo variam de acordo com a região, preferindo solos profundos e bem drenados, e temperaturas ideais entre 20 e 30°C (García-Lara & Serna-Saldivar, 2018; Massimi, 2023).

Como qualquer outra cultura, o milho é suscetível a uma ampla gama de pragas tais como: Lagarta do funil (*Spodoptera frugiperda*); Broca do colmo (*Diatraea saccharalis*); Lagarta da espiga (*Helicoverpa zea*); Pulgões; Tripes; Besouros do milho; etc.

2.1.2. Soja

A soja é originária da Ásia Oriental e tem sido cultivada na China há mais de 5.000 anos (Anderson et al., 2019; T. E. Carter, Nelson, & Sneller, 2004; Kim, Van, Kang, Kim, & Lee, 2011; Norberg & Deutsch, 2023). Ela era inicialmente utilizada como alimento para os animais, mas ao longo do tempo, tornou-se um alimento importante para os seres humanos (Anderson et al., 2019). Foi introduzida na América do Norte na década de 1700, onde foi inicialmente cultivada como planta ornamental (Anderson et al., 2019; Norberg & Deutsch, 2023), mas só se tornou uma cultura importante na região central dos Estados Unidos na década de 1930 (Anderson et al., 2019; Norberg & Deutsch, 2023). Desde então, a soja se tornou um dos cultivos mais importantes em todo o mundo, sendo utilizada em alimentos, rações, biocombustíveis e outros produtos (Anderson et al., 2019; Norberg & Deutsch, 2023).

A soja é uma planta anual com um ciclo de vida de 90 a 120 dias, sua estrutura inclui raízes profundas e bem desenvolvidas, caule ereto e ramificado, folhas compostas e trifoliadas, flores brancas ou roxas em inflorescências racemosas e frutos em vagens verdes e achatadas contendo de 2 a 4 sementes cada (França et al., 2021; K. Liu, 1997). A fisiologia da soja envolve fotossíntese C₃, fixação de nitrogénio através de bactérias simbióticas, crescimento determinado com estágios vegetativos e reprodutivos distintos, e capacidade de responder a vários estresses ambientais, como seca, alta temperatura e pragas (K. Liu, 1997). A fixação de nitrogénio é essencial para sua nutrição e sustentabilidade agrícola (França et al., 2021; K. Liu, 1997).

A soja é uma cultura adaptável a diferentes condições de cultivo, mas algumas condições são mais favoráveis para seu desenvolvimento ideal (Department of Agriculture at Illinois State University, 2012). As principais condições incluem um clima tropical e subtropical, com temperaturas entre 20°C e 30°C e um período mínimo de 100 a 120 dias sem temperaturas abaixo de 10°C (Department of Agriculture at Illinois State University, 2012). O solo adequado deve ser bem drenado, profundo e rico em nutrientes, com pH entre 6 e 6,5 (Cox, Gerard, Wardlaw, & Abshire, 2003; Department of Agriculture at Illinois State University, 2012; Uguru, Benedict, Oyiga, & Jandong, 2011). O plantio deve ocorrer no período apropriado de acordo com a região e o clima local.

2.1.3. Algodão

O algodão é uma cultura antiga que tem sido utilizada para a produção de tecidos há mais de 7.000 anos (Fisher, 1981). Acredita-se que o algodão tenha se originado na Índia e sido

domesticado por volta de 3000 a.C (Lee & Fang, 2015; Santhanam & Sundaram, 2015). Desde então, a cultura se espalhou pelo mundo, chegando à África, América do Sul e América Central. Durante a Idade Média, o algodão tornou-se uma comodidade valiosa no comércio mundial, sendo exportado da Índia e Egito para a Europa (Boucharlat, 2018). Com a colonização da América pelos europeus, a produção de algodão se expandiu rapidamente na América do Norte, principalmente nos Estados Unidos (McMichael, 1991). Com a Revolução Industrial no século XVIII, a demanda por algodão cresceu significativamente, impulsionando a produção em larga escala. A invenção da máquina de fiar em 1764 e da máquina de tecer em 1785 permitiu que o algodão fosse processado com mais eficiência e a preços mais acessíveis (Drucker, 2000). Atualmente, os maiores produtores de algodão são a China, Índia, Estados Unidos, Brasil e Paquistão (M. A. Khan et al., 2020).

O algodão é um arbusto com sistema radicular profundo e tronco ereto, alcançando até 1,5 a 2,5 metros de altura, suas grandes folhas palmadas têm três a cinco lobos, e suas flores são grandes, brancas ou amareladas, com cinco pétalas e um centro amarelo, fruto é uma cápsula espinhosa contendo sementes de algodão, cada uma envolvida por fibras macias e brancas, que são colhidas e processadas (Lee, 2016; Wendel & Grover, 2015).

O algodão realiza fotossíntese para converter energia solar em açúcares e promover seu crescimento. Como planta anual, passa por fases: germinação, quando a raiz emerge e absorve nutrientes do solo; emergência, com crescimento de folhas e caules; fase vegetativa, com aumento de tamanho e desenvolvimento radicular; floração, em que flores se formam e se transformam em cápsulas; e maturação, quando as cápsulas de algodão amadurecem e as fibras estão prontas para colheita (Lee, 2016; Wendel & Grover, 2015).

O algodão é cultivado em diversas regiões globais, adaptando-se a diferentes condições de clima, solo e localidade. Condições ideais para seu cultivo incluem: climas quentes e úmidos, com temperaturas médias diurnas de 25-30°C e noturnas de cerca de 20°C; requer uma estação de crescimento de 150-180 dias; prospera em solos profundos, bem drenados e ricos em nutrientes, com pH entre 6 e 7 e boa capacidade de retenção de água; necessita de 600-800 mm de água durante o crescimento, variando conforme clima e região; requer nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes para desenvolvimento apropriado; e vulnerável a pragas como lagartas e pulgões, e doenças fúngicas, demandando medidas de controle adequadas (Boucharlat, 2018; Lee, 2016; Wendel & Grover, 2015).

2.2. Produção Global e local

2.2.1. Cultura do Milho

O milho é uma cultura globalmente essencial, desempenhando papéis cruciais na nutrição, segurança alimentar e economia (García-Lara & Serna-Saldivar, 2018; Narayan, Kumar, & Narayan Jhariya, 2013). Como fonte vital de nutrição, oferece carboidratos, vitaminas, minerais e fibras para a saúde humana (Loy & Lundy, 2018; Narayan et al., 2013). Sua versatilidade permite seu cultivo em diversos climas, sustentando comunidades como alimento básico e contribuindo para a produção de carne e laticínios na alimentação animal. Economicamente, o milho é uma das culturas mais cultivadas e comercializadas, sendo matéria-prima para alimentos, bioplásticos e biocombustíveis, impulsionando economias globais e criando empregos (Loy & Lundy, 2018; Tanklevska, Petrenko, Karnaushenko, & Melnykova, 2020). Além disso, possui importância cultural, desempenhando um papel central na culinária tradicional e celebrações culturais, conectando as pessoas às suas raízes e tradições (Borah & Kumar, 2012).

De acordo com dados da FAO (2023), a área cultivada global de milho estava em torno de 158 milhões de hectares, com uma produção de cerca de 700 milhões de toneladas. Ao longo das duas primeiras décadas do século XXI, esses números aumentaram significativamente. Em 2021, a área cultivada de milho global ultrapassou 195 milhões de hectares, com uma produção mundial de aproximadamente 1,2 bilhão de toneladas (**figura 1**). Na África, a área cultivada de milho também cresceu, atingindo cerca de 38 milhões de hectares em 2021, com uma produção de aproximadamente 90 milhões de toneladas (**figura 2**). Moçambique, como parte da África, contribuiu com uma parte desse aumento, com uma área cultivada de cerca de 2,5 milhões de hectares e uma produção de cerca de 3 milhões de toneladas em 2021 (**figura 3**).

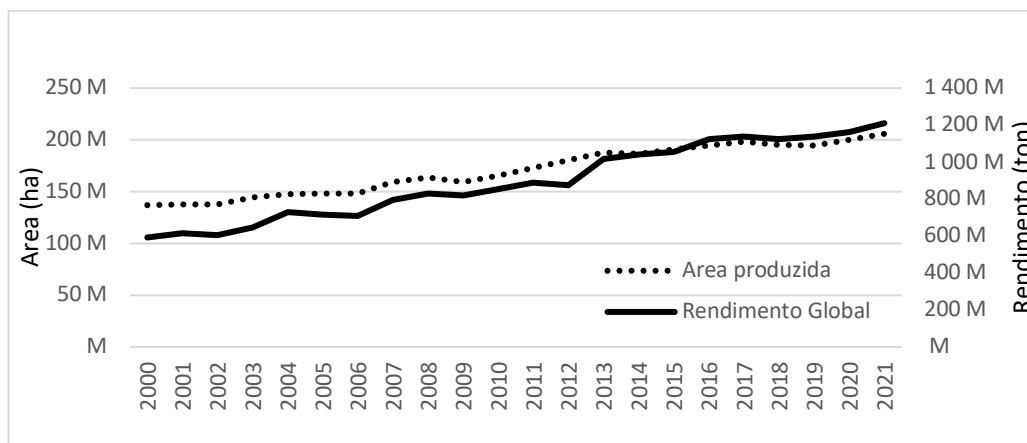


Figura 1. Área de produção e rendimento Global do milho (2000 - 2021)

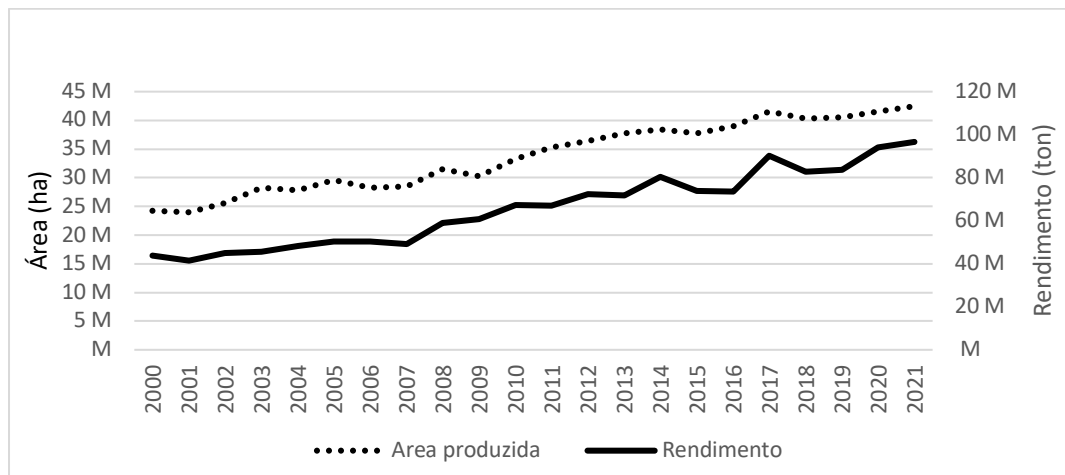


Figura 2. Área de produção e rendimento do milho em África (2000 - 2021)

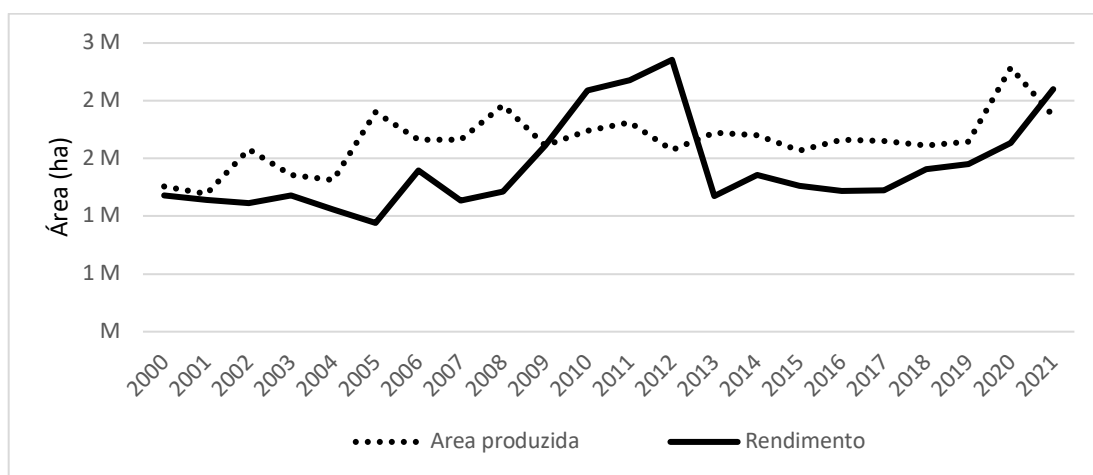


Figura 3. Área de produção e rendimento do milho em Moçambique (2000 - 2021)

2.2.2. Cultura da Soja

A soja é globalmente essencial, desempenhando um papel fundamental na alimentação, economia e sustentabilidade (Pagano & Miransari, 2016). Como fonte rica de proteínas e óleos vegetais, ela é um pilar da segurança alimentar (Lokuruka, 2010; Medic, Atkinson, & Hurburgh, 2014), alimentando bilhões de pessoas e sendo um ingrediente-chave em muitos produtos alimentares. Além disso, a soja é vital para a produção de rações animais, impulsionando a indústria pecuária em todo o mundo (Messina, 2022; Rakita, Banjac, Djuragic, Cheli, & Pinotti, 2021). Economicamente, a soja é uma das culturas mais cultivadas e comercializadas, alimentando indústrias como a de biocombustíveis e bioplásticos (Boerema et al., 2016).

A área cultivada com soja no mundo cresceu significativamente desde os anos 2000 até 2021. Em 2000, a área global era de cerca de 74 milhões de hectares, aumentando para aproximadamente 129 milhões de hectares em 2021 (**figura 4**). A produção mundial de soja acompanhou esse crescimento, passando de cerca de 21 milhões de toneladas em 2000 para aproximadamente 29 milhões de toneladas em 2021. Em relação à África e Moçambique, a

produção de soja aumentou gradualmente, mas permaneceu relativamente modesta em comparação com as principais regiões produtoras. Moçambique teve uma área cultivada estimada de 55 mil hectares em 2021 (**figura 5**), com uma produção de aproximadamente 20 mil toneladas.

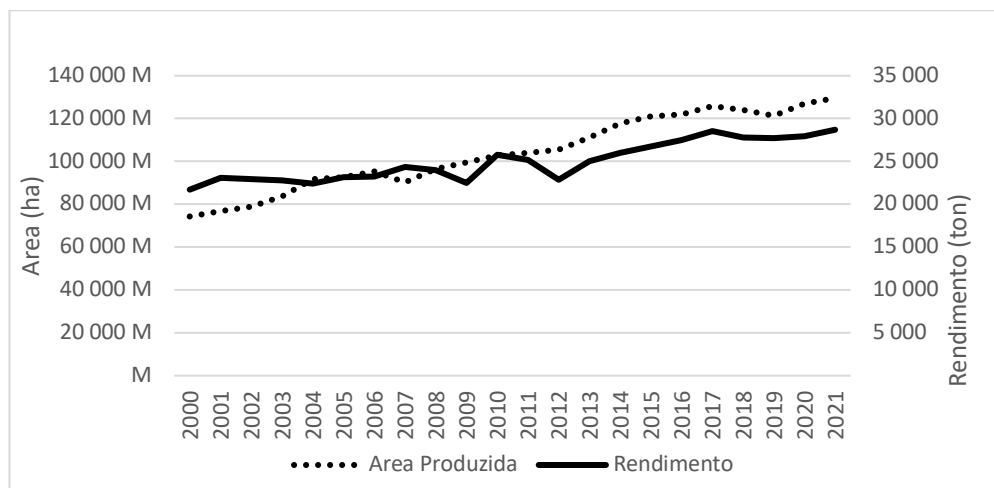


Figura 4. Gráfico 4 Área de produção e rendimento de Soja no mundo (2000 - 2021)

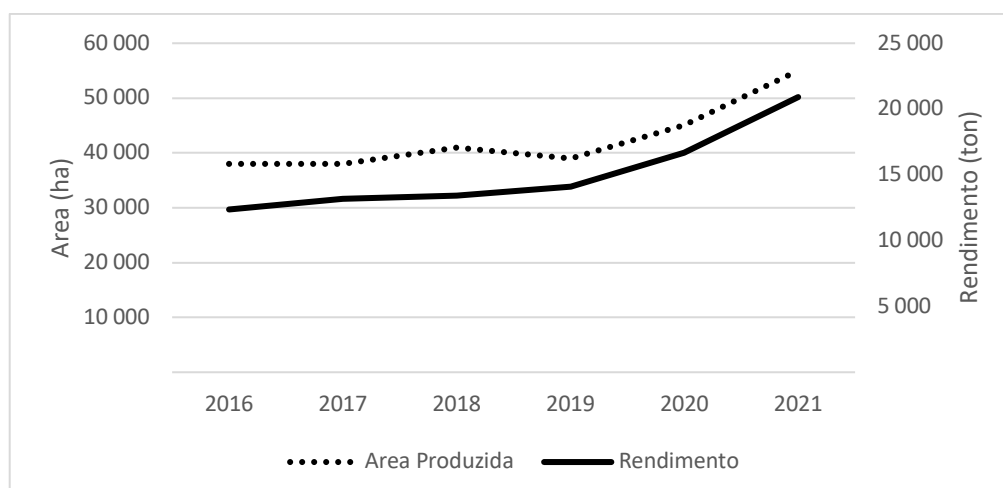


Figura 5. Área de produção e rendimento de Soja em Moçambique (2016 - 2021)

2.2.3. Cultura Algodão

O algodão é uma cultura versátil e globalmente essencial que desempenha um papel vital em nossa vida cotidiana, na economia global e na subsistência de muitas comunidades ao redor do mundo. É uma matéria-prima valiosa com aplicações em diversos setores, tornando-o um recurso indispensável em nossa sociedade moderna. Na última década, a produção global de algodão aumentou significativamente. Em 2021, a área cultivada atingiu aproximadamente 32 milhões de hectares, com uma produção de cerca de 26,5 milhões de toneladas de algodão em caroço (**figura 6**). A África, incluindo Moçambique, desempenhou um papel crescente nesse cenário. A produção de algodão na África aumentou de 9 milhões de toneladas em 2000 para

cerca de 10 milhões de toneladas em 2021, com uma área cultivada de aproximadamente 4,9 milhões de hectares (**Figura 7**). Moçambique contribuiu com uma parcela modesta, com uma produção anual em torno de 10.000 toneladas (**Figura 8**).

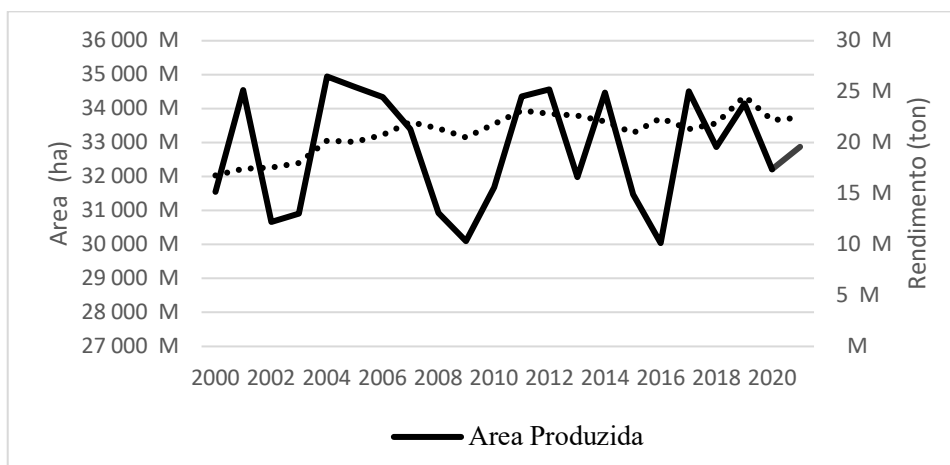


Figura 6. Área de produção e rendimento de Algodão no mundo (2000 – 2021)

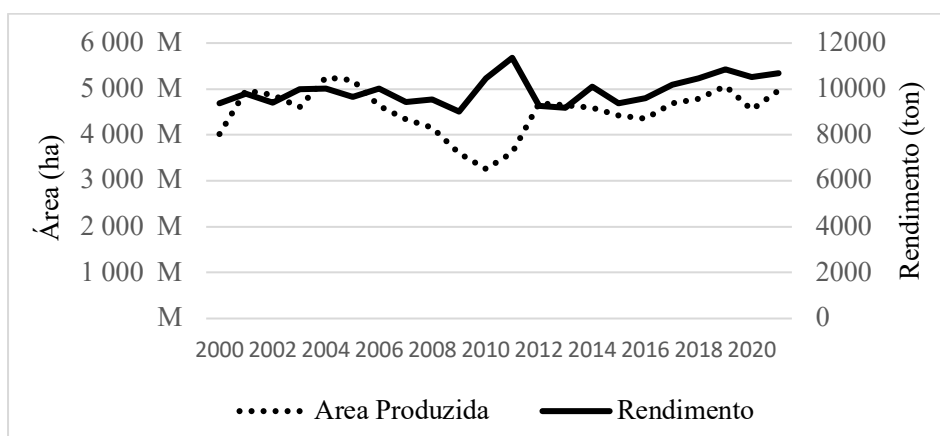


Figura 7. Área de produção e rendimento de Algodão em Africa (2000 – 2021)

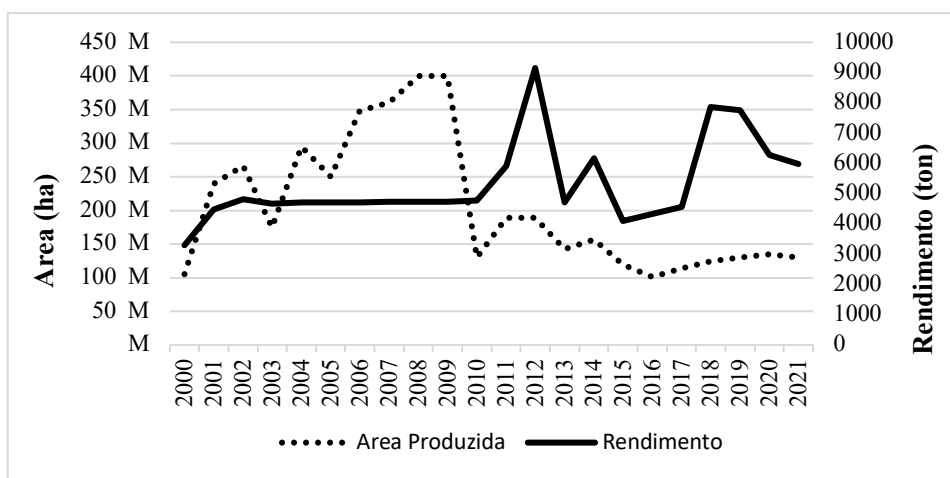


Figura 8. Área de produção e rendimento de Algodão em Moçambique (2000 - 2021)

2.3. Principais Pragas das culturas

O controle de pragas é um desafio constante na agricultura, e as culturas de milho, soja e algodão não são exceção. A prevalência das pragas pode variar significativamente de acordo com a região e as condições locais de cultivo, mas algumas delas são frequentemente encontradas nas plantações dessas culturas. No cultivo de milho, algumas das pragas mais comuns incluem a lagarta do funil (*Spodoptera frugiperda*), que devora as folhas e pode causar danos significativos (Cruz, Figueiredo, Oliveira, & Vasconcelos, 1999; Kumar et al., 2022), e o pulgão (*Rhopalosiphum maidis*), um inseto sugador que prejudica o desenvolvimento da planta (Maia et al., 2005; Mello, Negri, & Souza, 2015; Moraes, Goussain, Carvalho, & Costa, 2005).

Na soja, a lagarta da soja (*Anticarsia gemmatilis*) é uma das pragas mais notórias, pois se alimenta das folhas da planta, reduzindo a capacidade de fotossíntese e, conseqüentemente, o rendimento (Fugi, Lourenção, & Parra, 2005; Ongaratto et al., 2021). A lagarta falsa-medideira (*Chrysodeixis includens*) e a mosca branca (*Bemisia tabaci*) também podem causar danos significativos às plantações (Fugi et al., 2005; Marabi, Das, Bhowmick, Pachori, & Sharma, 2017; Rodrigues et al., 2021; Schlick-Souza, Baldin, Morando, & Lourenção, 2018). O percevejo-marrom (*Euschistus heros*) é outra praga que afeta a soja, sugando a seiva das plantas (Silva, da Silva, Depieri, & Panizzi, 2012; Tessmer et al., 2022; Victor et al., 2022).

No caso do algodão, o bicudo-do-algodoeiro (*Anthonomus grandis*) é uma praga altamente destrutiva, perfurando as cápsulas do algodão e prejudicando a qualidade das fibras (Howard, 2013; S. M. de Moura et al., 2022). Além disso, a lagarta rosada (*Pectinophora gossypiella*), a lagarta da maçã (*Heliothis virescens*), pulgões, tripses, mosca branca (*Bemisia tabaci*) e ácaros também são ameaças comuns para as plantações de algodão (Javaid, 1995; V. Shah, Pande, Verma, Gokte-Narkhedkar, & Prasad, 2022). O controle de pragas em milho, soja e algodão é essencial para garantir a produtividade e a qualidade dos cultivos. Os agricultores empregam várias estratégias, incluindo o uso responsável de defensivos agrícolas, o controle biológico com o uso de inimigos naturais das pragas, práticas culturais como rotação de culturas e manejo integrado de pragas. Essa abordagem integrada visa reduzir o impacto ambiental e minimizar o desenvolvimento de resistência das pragas aos pesticidas.

2.4. O crescimento populacional e gestão das áreas agrícolas

2.4.1. Contexto

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que a população mundial alcance cerca de 9,7 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UN DESA), 2022). Essa projeção indica um aumento significativo na demanda por alimentos e recursos naturais para sustentar essa crescente população global (Linnér, 2023; Maja & Ayano, 2021), assim sendo, a agricultura precisará aumentar sua produção em cerca de 25%–75% para atender à demanda alimentar da população mundial projetada até 2050 (Hunter, Smith, Schipanski, Atwood, & Mortensen, 2017).

Essa previsão coloca desafios significativos para a agricultura e a segurança alimentar, pois será necessário produzir mais alimentos de forma sustentável para atender às necessidades de bilhões de pessoas. O aumento da população também implica uma maior pressão sobre os recursos naturais, como terra, água e energia. Para enfrentar esses desafios, serão necessárias abordagens inovadoras na agricultura, como o desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, o uso de tecnologias avançadas, a promoção da agricultura de conservação e a adoção de sistemas alimentares mais equitativos e inclusivos (Akanmu, Akol, Ndolo, Kutu, & Babalola, 2023; Musa, Basir, & Luah, 2021; Oborn, Phillips WorldFish, & Thomas, 2017). É verdade que o desenvolvimento das atividades agrícolas é fundamental para impulsionar a produção e o abastecimento da crescente população mundial. A agricultura desempenha um papel crucial na alimentação das pessoas, fornecendo matérias-primas para a indústria alimentícia e contribuindo para a economia dos países.

No entanto, a expansão da atividade agrícola enfrenta desafios significativos, especialmente quando se trata da disponibilidade de terras. Com o crescimento populacional contínuo e a urbanização do meio rural, as áreas disponíveis para a agricultura estão diminuindo, o que torna a terra um recurso limitado e escasso para o setor agrícola como evidenciam os autores (Kalfas, Kalogiannidis, Chatzitheodoridis, & Toska, 2023; Manjarrez-Domínguez et al., 2023; Nchanji et al., 2023; Xie et al., 2023). Assim sendo, quando as áreas disponíveis para a agricultura são limitadas e escassas acaba que apenas resta fazer uso intensivo, embora que o uso intensivo da terra apresente um bom resultado a curto prazo, ele também apresenta alguns desafios e preocupações.

A prática da agricultura existe há centenas de anos e tornou-se uma forma básica de vida para a maioria do mundo. Gradualmente, ao longo dos anos, os processos agrícolas floresceram e

transformaram-se mais eficientes e um dos métodos agrícolas que se tem verificado é a prática de uma agricultura intensiva, que é dada como um sistema agrícola caracterizado pelo uso intensivo de recursos, como terra, água, fertilizantes, pesticidas e mão de obra, com o objetivo de maximizar a produção agrícola (Iván Bedolla-Rivera et al., 2023; Reyes-Palomino, Micaela, & Ccoa, 2022). No entanto por mais que esta técnica traga bons resultados em seu princípio, destacam-se aqui alguns problemas posteriores advindos do seu uso: o uso intenso de fertilizantes e pesticidas pode levar à degradação do solo, esgotando seus nutrientes e prejudicando sua fertilidade a longo prazo; O uso excessivo de insumos químicos pode levar à poluição da água e do solo, afetando negativamente o meio ambiente e a saúde humana; A concentração em monoculturas pode levar à perda de diversidade de culturas e de espécies na paisagem agrícola; e A exploração intensiva de recursos, como água, pode levar ao esgotamento de recursos naturais não renováveis (Iván Bedolla-Rivera et al., 2023; Reyes-Palomino et al., 2022; Scotti, Bonanomi, Scelza, Zoina, & Rao, 2015).

Dado as consequências negativas associadas ao uso intensivo das áreas agrícolas, é fundamental que a agricultura intensiva esteja aliada a práticas de agricultura sustentável e de conservação (X. Liu, 2023; Ojadi, 2023; Scotti et al., 2015). Essas práticas buscam garantir que a produção agrícola seja realizada de forma mais equilibrada, preservando a saúde do solo e os recursos naturais para as gerações futuras. Algumas das práticas de agricultura sustentável e de conservação incluem:

- 1) **Agricultura Orgânica:** A agricultura orgânica utiliza técnicas que evitam danificar o ambiente, enfocando no uso de adubos naturais, rotação de culturas e controle biológico de pragas, mantendo a saúde do solo e a biodiversidade (Basnet et al., 2023; Çakmakçı, Salık, & Çakmakçı, 2023; Gamage et al., 2023).
- 2) **Agricultura de Conservação:** Essa abordagem visa minimizar a perturbação do solo e dos ecossistemas agrícolas, promovendo práticas como o cultivo mínimo ou direto, que evita a revirada excessiva do solo, o que reduz a erosão e a perda de nutrientes (Basnet et al., 2023; Dev et al., 2023; Francaviglia, Almagro, & Vicente-Vicente, 2023).
- 3) **Rotação de Culturas:** Alternar diferentes culturas na mesma área ao longo do tempo ajuda a melhorar a fertilidade do solo, evita o esgotamento de nutrientes e reduz a incidência de pragas e doenças (Feiziene et al., 2016; Liang et al., 2023a; van Zanten et al., 2023).

A adoção dessas práticas promove a resiliência dos ecossistemas agrícolas, protege a saúde do solo, reduz a poluição e os impactos ambientais negativos, e aumenta a sustentabilidade geral

do sistema de produção. Isso é essencial para garantir a segurança alimentar e o equilíbrio entre as necessidades atuais e futuras da população global.

2.4.2. Rotação de culturas com leguminosas

A produção intensiva de alimentos é uma questão crítica em todo o mundo, à medida que a população global continua a crescer, demandando uma oferta crescente de alimentos (Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UN DESA), 2022; Hunter et al., 2017; Linnér, 2023). No entanto, esse aumento na produção de alimentos frequentemente vem com desafios ambientais, como o esgotamento do solo, a degradação ambiental, a contaminação por pesticidas e herbicidas, e a utilização insustentável de recursos naturais (Iván Bedolla-Rivera et al., 2023; Reyes-Palomino et al., 2022). Enfrentar esse dilema exige a adoção de práticas agrícolas sustentáveis que possam atender às necessidades alimentares da humanidade sem comprometer o meio ambiente.

A rotação de culturas é uma prática agrícola tradicional e eficaz que envolve o cultivo alternado de diferentes espécies de plantas em uma mesma área ao longo do tempo, com o objetivo de aumentar a produtividade e a saúde do solo (Feiziene et al., 2016; Iheshiulo et al., 2023; Liang et al., 2023a). Em vez de cultivar a mesma cultura repetidamente em uma parcela de terra, a rotação de culturas permite que diferentes culturas sejam plantadas em sucessão. Cada cultura subsequente é escolhida com base em suas características complementares e benefícios para o solo (Liang et al., 2023b).

Essa técnica tem se mostrado altamente eficaz em abordar vários desafios enfrentados pela agricultura intensiva e na resposta às demandas globais por alimentos. Vamos explorar as vantagens e os impactos positivos da rotação de culturas, com foco especial na rotação com leguminosas fixadoras de nitrogênio atmosférico, uma prática que está se tornando cada vez mais relevante em todo o mundo. A rotação de culturas com leguminosas fixadoras de nitrogênio atmosférico é uma prática agrícola fundamental que desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade agrícola, na melhoria da fertilidade do solo e na redução da dependência de fertilizantes químicos (Costa et al., 2021; Ghosh et al., 2019a; Lengwati, Mathews, & Dakora, 2020; Liang et al., 2023a). Essa técnica, amplamente adotada em todo o mundo, é especialmente relevante em um momento em que a agricultura enfrenta desafios crescentes para atender à demanda global por alimentos de forma ambientalmente responsável.

A rotação de culturas com leguminosas fixadoras de nitrogênio é um processo eficiente que envolve a alternância de culturas de leguminosas com culturas não leguminosas em uma determinada área ao longo de um ciclo de cultivo (Costa et al., 2021; Ghosh et al., 2019a). Esse

ciclo pode variar em duração, mas geralmente é de dois a quatro anos. A prática segue uma sequência lógica, onde as culturas de leguminosas são seguidas por culturas que se beneficiam do nitrogênio deixado pelas leguminosas (Costa et al., 2021; Ghosh et al., 2019a; Knudsen, Meyer-Aurich, Olesen, Chirinda, & Hermansen, 2014; Nemecek et al., 2015). A rotação de culturas com leguminosas fixadoras de nitrogênio segue um ciclo crucial, composto por várias etapas interligadas (Geng, Tan, Li, Miao, & Wang, 2023; Reckling et al., 2016):

- Durante a primeira fase do ciclo, as leguminosas fixadoras de nitrogênio, como soja, feijão e trevo, são cuidadosamente plantadas (Mesfin, Gebresamuel, Haile, & Zenebe, 2023). À medida que essas plantas crescem, as bactérias rizóbias estabelecem uma simbiose com as raízes das leguminosas, iniciando assim a fixação do nitrogênio atmosférico no solo (Gollner, Starz, & Friedel, 2019; Ipata & Pesi, 2015; Mathesius, 2022).
- As bactérias fixadoras de nitrogênio desempenham um papel vital durante a fase de fixação de nitrogênio. Elas capturam o nitrogênio atmosférico e o convertem em formas utilizáveis, como amônia e nitratos, que são então liberados no solo (Gollner et al., 2019; Ipata & Pesi, 2015). Esse processo é fundamental para o fornecimento de nutrientes essenciais às plantas hospedeiras e para enriquecer o solo com nitrogênio disponível (Y. Liu, Evans, Friesen, & Tiemann, 2022).
- Após o período de crescimento das leguminosas, é o momento da colheita. Durante essa fase, as leguminosas são cuidadosamente colhidas, deixando para trás o nitrogênio fixado no solo, pronto para ser utilizado pelas safras seguintes.
- Na fase seguinte do ciclo, as culturas não leguminosas, como milho, trigo, arroz ou vegetais, são plantadas no solo que foi enriquecido com nitrogênio pelas leguminosas anteriores. Essas culturas aproveitam o nitrogênio disponível no solo, o que reduz significativamente a necessidade de adubação nitrogenada adicional (Mesfin et al., 2023).
- Além de fornecer nitrogênio para as culturas subsequentes, a rotação com leguminosas traz diversos benefícios para o solo. Ela contribui para melhorar a estrutura do solo, aumentar sua capacidade de retenção de água e reduzir a erosão, resultando em uma saúde do solo aprimorada a longo prazo (Costa et al., 2021; Ojiem, Franke, Vanlauwe, de Ridder, & Giller, 2014).
- Por fim, esse ciclo de rotação de culturas com leguminosas é repetido ano após ano, mantendo a fertilidade do solo e garantindo a sustentabilidade contínua da produção agrícola.

A rotação de culturas com leguminosas fixadoras de nitrogênio atmosférico apresenta uma série de benefícios significativos tanto para os agricultores como para o meio ambiente: Uma das vantagens mais notáveis é a fertilização natural do solo. As leguminosas fixadoras de nitrogênio desempenham um papel crucial ao fornecer uma fonte natural de nitrogênio para as culturas subsequentes (Costa et al., 2021; Ghosh et al., 2019b; Nemecek et al., 2008). Isso elimina ou reduz consideravelmente a necessidade de adubação nitrogenada, resultando em economia de custos de produção e na diminuição da dependência de fertilizantes químicos (Costa et al., 2021; Nemecek et al., 2008).

As raízes profundas das leguminosas desempenham um papel crucial na melhoria da estrutura do solo, resultando em maior capacidade de retenção de água e redução da erosão (Amir, 1996; Auerswald, Kainz, & Fiener, 2004; Koomson, 2021). Essa contribuição é fundamental para a conservação do solo em longo prazo, protegendo-o contra a perda de nutrientes e a compactação prejudicial. A rotação de culturas com leguminosas também pode ser eficaz na supressão de pragas e doenças agrícolas (Busch, Douglas, Malcolm, Karsten, & Tooker, 2020; Mohamed, 2023). Uma vez que as culturas subsequentes não compartilham as mesmas pragas e patógenos que afetaram as leguminosas, essa prática ajuda a controlar a proliferação desses organismos prejudiciais (Sampaio, De Sousa Araújo, Rubiales, & Patto, 2020).

Além dos benefícios para o solo, a produção de leguminosas, como soja e feijão, oferece oportunidades significativas de diversificação de renda para os agricultores (John et al., 2021; Kebede, 2020; Makate, Wang, Makate, & Mango, 2016). Essas culturas possuem alto valor no mercado global de alimentos, o que pode gerar lucros substanciais e proporcionar uma fonte adicional de receita para as famílias rurais. Uma das vantagens mais notáveis da rotação de culturas é a redução significativa do uso de pesticidas e herbicidas (Nemecek et al., 2008). Quando culturas diferentes são plantadas em sucessão, ocorre uma quebra no ciclo de pragas e doenças que afetam uma única cultura. Isso reduz a necessidade de produtos químicos para o controle de pragas e doenças.

2.4.3. Importância do nitrogênio

De todos os elementos dos quais se fala de sustentar a vida humana, o nitrogênio se enquadra perfeitamente na categoria de elemento crucial para a manutenção da vida, por isso por alguns é dito que sem ele não teríamos com que nos alimentar e por consequência definhariamos (B. Chen, Liu, Tian, Yan, & Zhang, 2014). Tal é dito, por conta da grande relevância que apresenta este simples, porém delicado elemento.

O nitrogénio é um dos nutrientes mais essenciais para as plantas e desempenha um papel fundamental em seu crescimento e desenvolvimento saudável (B. Chen et al., 2014; Ye, Tian, & Jin, 2022). É considerado um nutriente primário, juntamente com o fósforo e o potássio, devido à quantidade significativa necessária pelas plantas para seu bom desenvolvimento (Ye et al., 2022). Tanta estima é dada ao nitrogénio pelo facto de que sem ele não há desenvolvimento de plantas, como mencionado no período anterior, mas o que verdadeiramente limita o crescimento e desenvolvimento das plantas é a forma como o nitrogénio participa na planta. Das conhecidas formas em que o nitrogénio participa activamente nas plantas, destacam (B. Chen et al., 2014; Fathi, 2022; Okumura et al., 2012; Ye et al., 2022) as seguintes:

- 1) Componente de proteínas: O nitrogénio é um elemento-chave na composição de aminoácidos, que são os blocos de construção das proteínas. As proteínas desempenham uma série de funções vitais nas plantas, incluindo a regulação de enzimas e a estrutura celular.
- 2) Fotossíntese: O nitrogénio é um componente essencial das clorofilas, os pigmentos responsáveis pela fotossíntese, o processo pelo qual as plantas convertem luz solar em energia química para o crescimento.
- 3) Crescimento celular: O nitrogénio é necessário para o crescimento e divisão celular. É essencial para a formação de novas células em raízes, caules e folhas.
- 4) Produção de energia: O nitrogénio desempenha um papel importante na produção de energia nas plantas. Ele participa do metabolismo celular e é necessário para a síntese de ATP (adenosina trifosfato), a molécula que transporta energia nas células.
- 5) Formação de compostos orgânicos: O nitrogénio está presente em muitos compostos orgânicos, como hormônios de crescimento e vitaminas, que desempenham um papel crucial no desenvolvimento e saúde das plantas.

2.4.4. Ciclo do nitrogénio

O ciclo do nitrogénio (**figura 9**) é um processo fundamental para a manutenção da vida na Terra. O nitrogénio é um elemento químico essencial para a formação de proteínas, ácidos nucleicos e outros componentes vitais para os organismos (B. Chen et al., 2014; Fathi, 2022; Okumura et al., 2012; Ye et al., 2022). Esse ciclo é um exemplo de um sistema biogeoquímico que envolve processos biológicos, químicos e físicos que interagem para reciclar o nitrogénio em diferentes formas, tornando-o disponível para plantas, animais e outros organismos.

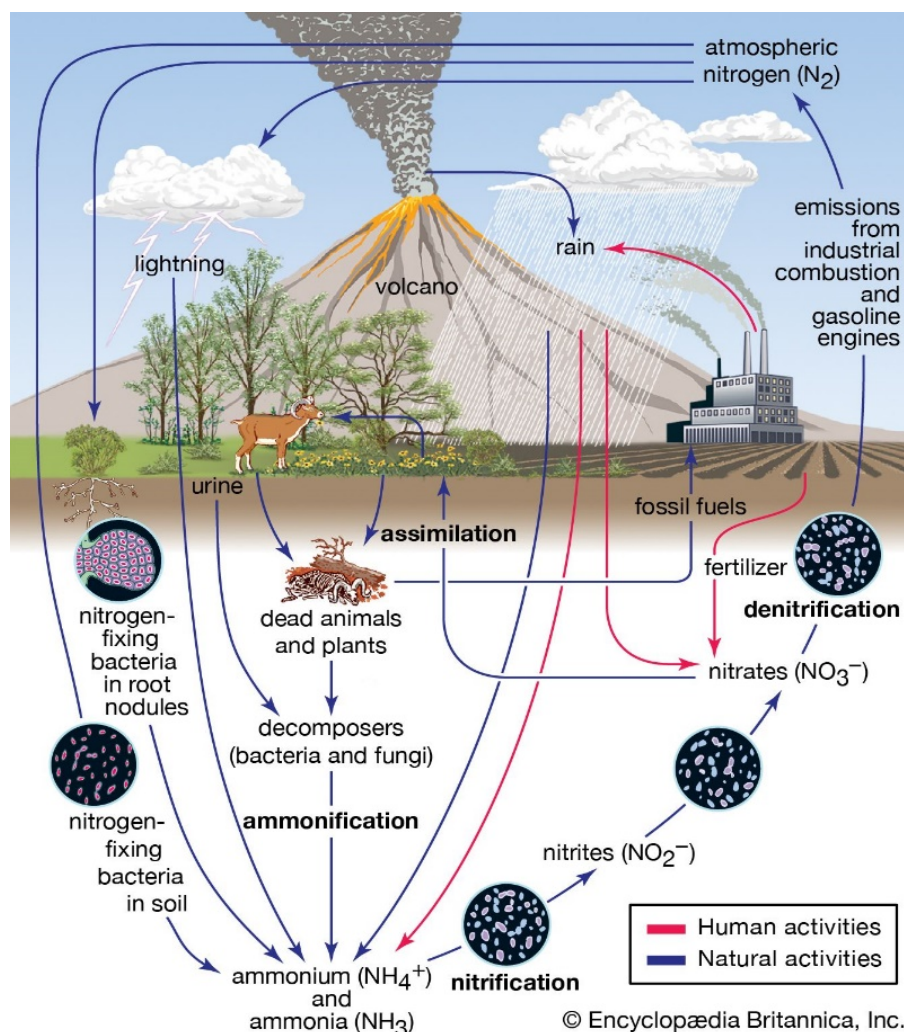


Figura 9. Ciclo do Nitrogênio
Adaptado de (Encyclopaedia Britannica, 2023)

O nitrogênio está disponível em várias formas no solo, incluindo amônia (NH_3), amônio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), além de estar presente na matéria orgânica viva (biota do solo e restos vegetais e animais frescos) e matéria orgânica não viva, incluindo compostos humificados e não humificados, e pode também ser obtido por meio da fixação biológica (Binotto Fagan et al., 2007; Soumare et al., 2020). Em maior parte o nitrogênio pelas plantas é acessível na forma de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+).

O ciclo do nitrogênio começa com a fixação do nitrogênio atmosférico (N_2), que compõe a maior parte da atmosfera da Terra (cerca de 78%) (Stein & Klotz, 2016). A maioria dos organismos não pode utilizar o nitrogênio atmosférico diretamente, pois os átomos de nitrogênio são mantidos firmemente juntos em moléculas de N_2 (Bernhard, 2010; Stein & Klotz, 2016). No entanto, algumas bactérias, conhecidas como bactérias fixadoras de nitrogênio, têm a capacidade de converter o N_2 em amônia (NH_3) ou íons amônio (NH_4^+) (Bernhard, 2010;

Encyclopaedia Britannica, 2023; Stein & Klotz, 2016). Esse processo é chamado de fixação do nitrogênio e ocorre principalmente em duas formas:

- **Fixação biológica do nitrogênio (FBN):** Neste processo, bactérias simbióticas, como rizóbios associados a leguminosas, ou bactérias de vida livre no solo, transformam o nitrogênio atmosférico em amônia (Bernhard, 2010; Encyclopaedia Britannica, 2023; Soumare et al., 2020; Stein & Klotz, 2016). As plantas leguminosas, como feijão, lentilhas e trevo, formam nódulos nas raízes onde ocorre essa simbiose (Ciampitti & Salvagiotti, 2018; Ledgard & Steele, 1992; Sichone & Mweetwa, 2018). As bactérias rizóbias dentro dos nódulos fornecem nitrogênio às plantas hospedeiras em troca de carboidratos e outros nutrientes (Goyal et al., 2021; Lindström & Mousavi, 2020). O gás N₂ é um composto muito estável devido à força da ligação tripla entre os átomos de nitrogênio, e requer uma grande quantidade de energia para quebrar essa ligação, o processo como um todo requer oito elétrons e pelo menos dezesseis moléculas de ATP, sendo dado pela fórmula descrita na seguinte equação química: $\text{N}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{H}_2$ (Bernhard, 2010).
- **Fixação abiótica:** Além da fixação biológica, o nitrogênio pode ser fixado através de processos físicos ou químicos. Isso ocorre durante relâmpagos, quando a energia elétrica produzida pela descarga quebra as ligações das moléculas de N₂ na atmosfera, permitindo que o nitrogênio se combina com o hidrogênio da água para formar compostos nitrogenados, que então são depositados no solo (Bernhard, 2010; Stein & Klotz, 2016). Após a fixação do nitrogênio, a amônia resultante pode passar por um processo chamado nitrificação (Bernhard, 2010; Encyclopaedia Britannica, 2023; Stein & Klotz, 2016). A nitrificação é um processo importante no ciclo do nitrogênio, onde a amônia se transforma em nitrito e depois em nitrato por meio da oxidação (Bernhard, 2010; Koch, van Kessel, & Lüscher, 2019; Ward, 2019).
- **Oxidação de amônio a nitrito (NO₂⁻):** Este é o primeiro passo da nitrificação. Aqui, as bactérias nitrosificantes ou oxidantes de amônia desempenham um papel fundamental. Elas convertem amônia (NH₃) ou amônio (NH₄⁺) em nitrito (NO₂⁻). Isso é feito por meio de um processo que envolve a oxidação da amônia, resultando na formação de nitrito como produto, como descreve a seguinte equação: $2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$ (Baldani & Baldani, 2005; Bernhard, 2010).
- **Oxidação de nitrito (NO₂⁻) a nitrato (NO₃⁻):** A segunda etapa da nitrificação envolve bactérias conhecidas como oxidantes de nitrito. Essas bactérias convertem o nitrito

(NO₂⁻) gerado na primeira etapa em nitrato (NO₃⁻) (Koch et al., 2019; Ward, 2019).

Isso também é um processo de oxidação, onde o nitrito é transformado em nitrato: 2



O ciclo do nitrogênio também inclui a decomposição e mineralização de resíduos orgânicos, incluindo proteínas e ácidos nucleicos, quando plantas e animais morrem. Durante a decomposição, bactérias e fungos desempenham um papel fundamental na quebra desses materiais orgânicos em seus componentes básicos (Bernhard, 2010). Esse processo libera nitrogênio de volta ao solo na forma de amônia e outros compostos nitrogenados, tornando-o novamente disponível para as plantas.

Em algumas situações específicas, o nitrogênio é fixado por meio de um processo denominado nitrogenase, realizado por certas bactérias, como aquelas associadas às raízes de plantas leguminosas (Bloch, Ryu, Ozaydin, & Broglie, 2020). Essas bactérias, como os rizóbios, recebem carbono das plantas hospedeiras e, em troca, fornecem amônia às plantas (Bloch, Clark, Gottlieb, Kent Wood, et al., 2020; Idris, Memon, & Vinther, 1981). A amônia fornecida pelos rizóbios é uma fonte de nitrogênio altamente utilizável para as leguminosas. Quando as leguminosas morrem, seus restos são degradados por bactérias em decomposição, liberando nitrogênio de suas moléculas orgânicas no solo sob forma de amônia.

Tabela 1. Bactérias fixadoras de Nitrogênio por nitrogenase, fonte:(Baldani & Baldani, 2005)

Gênero da Bactéria	Nome Científico	Associação Hospedeira	Tipo de Fixação
Rhizobium	Rhizobium sp.	Simbiose com leguminosas	Simbiótica
Bradyrhizobium	Bradyrhizobium sp.	Simbiose com leguminosas	Simbiótica
Azotobacter	Azotobacter sp.	Livre no solo	Assexual
Clostridium	Clostridium sp.	Livre no solo	Assexual
Frankia	Frankia sp.	Simbiose com plantas não leguminosas	Simbiótica

2.5. Distribuição espacial de nutrientes no solo

África Subsaariana (ASS) possui mais de 50% das terras potenciais para cultivo em todo o mundo, no entanto, apenas uma pequena parcela dessa terra apresenta condições adequadas para a produção agrícola por meio do cultivo (Jayne, Mather, & Mghenyi, 2010). As colheitas atuais na África Subsaariana têm baixo rendimento, muitas vezes ficando muito aquém do potencial de rendimento limitado pela disponibilidade de água. Essa baixa produtividade é atribuída a diversos fatores, tais como deficiências de nutrientes no solo, restrições físicas do solo, incidência de pragas e doenças e manejo subótimo (Hengl et al., 2017; Jayne et al., 2010). Assim sendo, os nutrientes no solo podem ser distribuídos de forma homogênea ou heterogênea,

dependendo de vários fatores, como a textura do solo, a história de uso da terra, a topografia e as práticas de manejo (H. J. Wang et al., 2009).

As características acima indicadas, destacam que existe uma espécie de distribuição espacial de nutrientes no solo, o que é um fator importante que influencia o crescimento e a produção das culturas (Tamburi, Shetty, & Shrihari, 2020). O crescimento e desenvolvimento das plantas no campo são fortemente influenciados pela quantidade de nutrientes que a planta absorve para atender às suas necessidades essenciais. No entanto, essa assimilação de nutrientes é limitada pela variabilidade espacial do nutriente presente no solo. Em outras palavras: O crescimento e desenvolvimento das plantas no campo são amplamente determinados pela quantidade de nutrientes que as plantas conseguem absorver para atender suas necessidades essenciais. No entanto, essa absorção é prejudicada pela variabilidade espacial dos nutrientes presentes no solo.

A distribuição homogênea de nutrientes no solo significa que os nutrientes estão presentes em concentrações relativamente uniformes em todo o perfil do solo (Bogunovic, Mesic, Zgorelec, Jurisic, & Bilandzija, 2014; Leo, 1963). Isso pode ser alcançado por meio de práticas de fertilização uniforme, que aplicam a mesma quantidade de nutrientes em toda a área cultivada. No entanto, em solos com textura irregular, como argilosos ou arenosos, os nutrientes podem ser redistribuídos por processos de erosão ou lixiviação, o que pode levar a uma distribuição heterogênea (Ozinga, Van Andel, & McDonnell-Alexander, 1997; Turner & Chapin, 2005). A distribuição heterogênea de nutrientes no solo significa que os nutrientes estão presentes em concentrações variadas em diferentes partes do perfil do solo. Isso pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo variações na fertilidade natural do solo, práticas de manejo desigual, como a aplicação de fertilizantes ou irrigação, e variações na topografia do terreno (Turner & Chapin, 2005). A distribuição heterogênea de nutrientes pode levar a variações no crescimento e na produção das culturas, pois algumas partes do campo podem ter deficiências de nutrientes, enquanto outras podem estar excessivamente supridas (Blair, 2001; Hutchings, John, & Wijesinghe, 2003).

Para otimizar a distribuição de nutrientes no solo, os agricultores podem usar técnicas de amostragem de solo para avaliar a fertilidade do solo em diferentes partes do campo e ajustar as práticas de manejo, como a aplicação de fertilizantes, para fornecer a quantidade adequada de nutrientes em cada área. Tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto e a agricultura de precisão, também podem ser usadas para mapear a distribuição espacial de nutrientes e otimizar a aplicação de fertilizantes e outros insumos agrícolas como ilustram:

(GAO et al., 2019; Hengl et al., 2017; Q. Li et al., 2011; Long et al., 2022; Peter-Jerome, Adewopo, Kamara, Aliyu, & Dawaki, 2022; H. J. Wang et al., 2009) .

2.6. Mapeamento da distribuição espacial de nutrientes

2.6.1. Procedimento de amostragem

A amostragem de solo é uma ferramenta crucial para avaliar o estado dos nutrientes no solo, fornecendo dados específicos de cada parcela agrícola sobre a fertilidade do solo (Ackerson, 2018; Sabbe & Marx, 1987). Estes dados formam a base para tomar decisões informadas sobre a aplicação de fertilizantes de base e cal, como também a rotação de culturas, otimizando assim as práticas agrícolas e os rendimentos das culturas (Sabbe & Marx, 1987). O processo de amostragem de solo envolve a recolha de amostras representativas de solo em diferentes pontos de um campo (Sabbe & Marx, 1987; Yu & Flury, 2021) Estas amostras são posteriormente analisadas num laboratório para determinar o seu teor de nutrientes, níveis de pH, teor de matéria orgânica e outras propriedades relevantes do solo (Ackerson, 2018; M. R. Carter & Gregorich, 2006; K. H. Tan, 1995). Os dados resultantes oferecem uma visão detalhada das condições atuais do solo numa parcela específica (Ferguson & Hergert, 2009; Wulfsohn, 2010)

2.6.2. Tipos de amostragem

A realização de uma amostragem eficaz do solo requer a elaboração de um plano meticulosamente estruturado e planeado, pois é quase impossível carregar-se todo o solo para o laboratório de análises (K. H. Tan, 1995). Este plano desempenha um papel essencial, uma vez que estabelece a abordagem a ser adotada para a recolha de amostras de solo de maneira representativa e precisa (Ackerson, 2018; Dinkins & Jones, 2008), de modo que as amostras captem adequadamente a variabilidade do solo numa determinada área. Ao desenvolver um plano de amostragem de solo, há que considerar a variabilidade do campo. Assim sendo, neste processo, os valores do solo podem ser obtidos através de amostragem aleatória ou amostragem em zonas (Dawson & Knowles, 2018; Peigné, Vian, Cannavacciuolo, Bottollier, & Chaussod, 2009; Sabbe & Marx, 1987) Dentro destas zonas e grelhas, os solos podem ser colhidos de forma simples ou composta (Catani, Gallo, Gargantini, & Conagin, 1955; A. Guarçoni, Soares de Souza, & de Sá Paye, 2019).

2.6.2.1. Amostragem Aleatória

A amostragem aleatória de solos é um método de seleção de pontos de coleta que se baseia na aleatoriedade e independência na escolha das unidades de solo a serem amostradas (Carnicer, Romero, & Rojas, 2022; Dick, Thomas, & Halvorson, 1996). Nesse enfoque, busca-se garantir

que qualquer combinação possível de "n" unidades de solo tenha a mesma probabilidade de ser selecionada (Lassaga, 2011; Santi, Sebem, Giotto, & Amado, 2016; Zúñiga, Cram Heydrich, & Cervantes, 2010). Isso assegura que o processo de amostragem seja imparcial e não enviesado para nenhuma área ou tipo de solo específico (Dick et al., 1996).

Esse tipo de amostragem aleatória é particularmente útil quando se está trabalhando com populações homogêneas de solos (Wollenhaupt, Mulla, & Crawford, 1997), ou seja, quando se assume que não há diferenças significativas entre as áreas ou estratos do terreno em termos das características que se deseja estudar (Dick et al., 1996; Zúñiga et al., 2010).

2.6.2.2. Amostragem em grelha

A amostragem do solo em grelha é uma técnica utilizada na coleta de amostras de solo que envolve a divisão da área em uma grade regular, na qual as amostras são coletadas em pontos estrategicamente espaçados (Dinkins & Jones, 2008; Wollenhaupt & Wolkowski, 1994). Essa abordagem é frequentemente empregue para avaliar a variabilidade do solo em uma área específica e é particularmente útil em contextos agrícolas, florestais, de pesquisa geológica e ambiental. A amostragem em grelha é realizada com o propósito de avaliar a variabilidade espacial do solo em uma determinada área (Dawson & Knowles, 2018). Essa prática se tornou mais precisa e viável com o advento do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Harris, Farley, Russell, Butler, & Selinger, 2013). A amostragem em grelha faz uso da tecnologia SIG e GPS para identificar com precisão os locais de coleta de amostras de solo. Esses pontos de dados amostrados são usados para criar mapas de prescrição que indicam as variações de fertilidade do solo em todo o campo (Dawson & Knowles, 2018; Wolkowski & Wollenhaupt, 1994). Existem dois métodos principais de amostragem em grelha: amostragem de células e amostragem de pontos (Carretero, Marasas, Souza, & Rocha, 2016; Dawson & Knowles, 2018; Roberts. L. & Henry, 2000).

2.6.2.3. Amostragem de Células

Na amostragem de células, o campo é dividido em células ou subunidades. Dentro de cada célula, núcleos de solo são coletados aleatoriamente em várias localizações e misturados para criar uma amostra composta para aquela célula. As taxas resultantes de aplicação de cal e fertilizante são aplicadas uniformemente a toda a célula, criando um padrão de tabuleiro de xadrez de diferentes taxas de recomendação em todo o campo.

2.6.2.3. Tipos de amostras

A coleta de amostras de solo é um procedimento fundamental em estudos agrícolas, geológicos, ambientais e de engenharia, e a quantidade de solo coletada desempenha um papel crucial na precisão das análises e na compreensão das características do solo em uma determinada área. No momento, o método predominante para coletar amostras de solo de maneira organizada é o uso de uma grelha, e dentro deste método são considerados dois tipos de amostras que são: amostras pontuais e amostras em compostas (Coelho & Agr, 2003; A. M. Guarçoni et al., 2006; Valente, Brasco, De, Iari, & Rios Do Amaral, 2018). Amostras pontuais, pequenas quantidades de solo são coletadas em pontos específicos do terreno. Essas amostras representam locais individuais e são ideais para estudos detalhados em áreas específicas (Brasil, Cravo, & Veloso, 2020; Schoeneberger, Wysocki, Benham, & Broderson, 1998; Tito, 2020).

Outra abordagem é a coleta de amostras compostas, que envolve a coleta de pequenas quantidades de solo em vários pontos diferentes e a subsequente mistura para criar uma única amostra representativa (Ackerson, 2018; Brasil et al., 2020; Tito, 2020). Essa técnica é valiosa quando se deseja obter uma visão geral de uma área sem a necessidade de analisar cada ponto individualmente (Carnicer, Romero, & Rojas, 2022). Amostras compostas são especialmente úteis em situações em que a uniformidade do solo é esperada em uma determinada região, como na agricultura de larga escala, em que as condições do solo podem ser consideradas relativamente homogêneas em toda a área de cultivo (Brasil et al., 2020; Carnicer et al., 2022). O número de subamostras está relacionado à precisão e exatidão. Para obter uma amostra representativa do campo, recomenda-se um mínimo de 20 subamostras, mas deve-se lembrar que a exatidão aumenta com o número de subamostras (Roberts. L. & Henry, 2000).

2.6.3. Processamento e análise de amostras

A análise de nitrogênio em amostras de solo é um procedimento importante para avaliar a fertilidade do solo e determinar a quantidade de nitrogênio disponível para as plantas. O nitrogênio é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento das plantas e é frequentemente adicionado ao solo na forma de fertilizantes. A análise de nitrogênio em amostras de solo pode ser realizada usando vários métodos, os principais sendo: o método de Kjeldahl, o método de Dumas e espectro (Chaudhary, 2022; Vickery, 1946).

Independentemente do método escolhido, o processamento das amostras é um passo crítico na análise do nitrogênio em amostras de solo. Este processamento das amostras envolve várias etapas, incluindo secagem, moagem e peneiramento (Hoskins & Ross, 1996; Sáez-Plaza, Navas, Wybraniec, Michałowski, & Asuero, 2013; Sandström et al., 2005; Thomas, Schütze, Heinze,

& Steinmetz, 2020). A secagem das amostras é geralmente realizada em estufas ou fornos a uma temperatura entre 60°C e 105°C. A secagem remove a umidade das amostras e evita que as bactérias continuem a decompor os nutrientes presentes no solo. Após a secagem, as amostras são moídas em um moinho até que atinjam uma consistência uniforme. A moagem ajuda a garantir que as partículas da amostra sejam pequenas o suficiente para serem analisadas com precisão. Após a moagem, as amostras são peneiradas para remover partículas grandes que possam interferir na análise. As partículas grandes também podem afetar a precisão dos resultados da análise. As peneiras usadas para peneirar as amostras devem ter aberturas uniformes e serem limpas antes do uso. Depois que as amostras são processadas, elas estão prontas para serem analisadas usando um dos métodos descritos abaixo. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha do método depende da finalidade da análise e das características do solo. Um dos métodos mais usados para a análise de amostras de solo para extração do conteúdo de nitrogénio é o método Kjeldahl.

O método de Kjeldahl é um procedimento de química analítica que é amplamente utilizado para determinar a quantidade de nitrogênio em alimentos, fertilizantes e outras substâncias (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2021). O método foi desenvolvido pelo químico dinamarquês Johan Gustav Christoffer Thorsager Kjeldahl em 1883 (Vickery, 1946). O método de Kjeldahl é baseado na conversão do nitrogênio presente em uma amostra em sulfato de amônio por meio da digestão com ácido sulfúrico concentrado (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2021; Sáez-Plaza et al., 2013), a amônia resultante é então destilada e titulada com uma solução padrão de ácido clorídrico para determinar a quantidade de nitrogênio presente na amostra.

O método de Kjeldahl consiste em três etapas principais: digestão, destilação e titulação (Alves, Baêta, & Alves, 1999; Bremner, 2016; Vickery, 1946). Na primeira etapa, a amostra é digerida com ácido sulfúrico concentrado e um catalisador, geralmente sulfato de cobre ou selênio, para converter todo o nitrogênio presente na amostra em sulfato de amônio; na segunda etapa, a amônia resultante da digestão é destilada e capturada em uma solução ácida; na terceira etapa, a solução ácida contendo a amônia destilada é titulada com uma solução padrão de ácido clorídrico para determinar a quantidade de nitrogênio presente na amostra (Alves et al., 1999; Bremner, 2016; Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2021; Vickery, 1946). Para Verulkar (2022) método de Kjeldahl apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação a outros métodos de análise de nitrogênio, que são as seguintes:

- **Vantagens:** O método é relativamente simples e requer apenas equipamentos básicos de laboratório; além disso, o método é altamente preciso e pode ser usado para determinar a quantidade total de nitrogênio presente em uma amostra.
- **Desvantagens:** O método pode ser demorado e requer várias etapas para ser concluído; além disso, o método pode ser afetado por interferências químicas que podem afetar a precisão dos resultados.

2.6.4. Interpoladores espaciais em SIG

Um interpolador espacial é uma técnica usada para estimar valores em locais desconhecidos com base em valores conhecidos em locais conhecidos. Em outras palavras, os interpoladores espaciais são algoritmos matemáticos que estimam valores em locais não amostrados com base em dados conhecidos (Mitas & Mitasova, 1999; Naoum & Tsanis, 2004). Dentre estes diversos métodos de interpolação espacial, pode-se classificar em interpoladores globais e interpoladores locais (Q. Tan & Xu, 2014). Os interpoladores globais usam todos os dados de pontos de amostragem na área de estudo para ajustar as características da região, enquanto os interpoladores locais simplesmente usam os dados vizinhos para estimar o valor de um ponto desconhecido.

Existem vários métodos de interpolação espacial, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. Alguns dos métodos mais comuns incluem: IDW (Inverso da Distância Ponderada), Krigagem, TIN, etc (Polígonos de Thiessen) (Bhunia, Shit, & Maiti, 2018; Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011; Naoum & Tsanis, 2004). Todos os métodos de interpolação foram desenvolvidos com base na teoria de que pontos mais próximos uns dos outros têm mais correlações e similaridades do que aqueles mais distantes (Setianto & Triandini, 2013).

2.7.1. IDW (Inverso da Distância Ponderada)

A interpolação com o Inverso da Distância Ponderada (IDW) é uma técnica de interpolação determinística local exata.(Setianto & Triandini, 2013; Q. Tan & Xu, 2014) O IDW parte do pressuposto de que o valor em um local não amostrado é a média ponderada pelas distâncias dos valores nos pontos amostrados dentro de uma vizinhança definida ao redor do ponto não amostrado (Bhunia et al., 2018; Eldrandaly & Abu-Zaid, 2011; Setianto & Triandini, 2013; Q. Tan & Xu, 2014). Nesse sentido, o IDW considera que os pontos mais próximos do local de previsão terão mais influência sobre o valor previsto do que os pontos localizados mais distantes (Naoum & Tsanis, 2004; Q. Tan & Xu, 2014). O IDW utiliza a equação 1 para a interpolação.

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^N z_i * d_i^{-n}}{d_i^{-n}}, \quad (1)$$

Onde: Z_0 é o valor previsto na localização não amostrada, Z_i é o valor observado, d_i é a distância entre a localização de previsão e a localização medida, N é o coeficiente que determina o peso com base na distância e n é o número total de previsões para cada caso de validação.

O Inverso da Distância Ponderada (IDW) encontrou amplas aplicações em diversos campos, graças à sua simplicidade e eficiência na interpolação de valores no espaço. Nos tempos modernos, o IDW continua desempenhando um papel significativo em diversas indústrias, como ciências ambientais, agricultura, geologia e sistemas de informação geográfica (SIG) (Abdel Rahman, Zakarya, Metwaly, & Koubouris, 2021; Cabalar, Karabas, Mahmutluoglu, & Yildiz, 2021; Li, 2021; Pereira, Valente, de Queiroz, Santos, & Fernandes-Filho, 2022; Verma, Yadav, & Singh, 2020).

Na ciência ambiental, o IDW é frequentemente utilizado em tarefas como avaliação da qualidade do ar, mapeamento de poluição e análise de impacto ambiental (J. Tan et al., 2021; Yi et al., 2020). Ao estimar valores em locais não amostrados com base na influência de pontos amostrados próximos, o IDW auxilia na identificação de pontos críticos de poluição e áreas de preocupação, permitindo que cientistas e formuladores de políticas elaborem estratégias eficazes de mitigação (Ciupală, Deaconu, & Spridon, 2021; Qiao et al., 2018).

Na agricultura, o IDW é uma ferramenta valiosa para a agricultura de precisão e o manejo de culturas. Ao prever variáveis como níveis de nutrientes do solo, pH e teor de umidade em campos, os agricultores podem tomar decisões informadas sobre a aplicação de fertilizantes, programação de irrigação e práticas de cultivo, o que, em última instância, resulta em rendimentos otimizados e práticas agrícolas sustentáveis (Cheng, Shi, & Zhu, 2007; Liu, Du, Zhao, & Zhang, 2016; Robinson & Metternicht, 2006).

Além disso, na geologia, o IDW é fundamental em tarefas como estimativa de recursos minerais, mapeamento subterrâneo e análise geoestatística. Ao alavancar a autocorrelação espacial de pontos de dados, o IDW auxilia os geólogos na previsão da distribuição de minerais, identificação de locais potenciais de mineração e compreensão das características geológicas de uma área, facilitando assim a exploração e extração eficientes de recursos (Jain, Pathak, Bhatawdekar, Kainthola, & Srivastav, 2022; Paraguassú, Leite, Moreira, Mendonça, & Eskinazi-Sant'Anna, 2019; Puspita, Ninasafitri, & Ente, 2022).

No âmbito dos SIG, o IDW é um componente essencial para a criação de mapas interpolados, visualização de dados espaciais e geração de modelos de superfície. Sua capacidade de estimar valores em locais não amostrados com base em pontos de dados vizinhos torna-o valioso para a produção de mapas detalhados e informativos, auxiliando no planejamento urbano, gestão de recursos naturais e avaliação de riscos de desastres (Biswas, Islam, Mia, & Islam, 2020; Blanco et al., 2019). (Kamarudin et al., 2021; Patra, Sahoo, Mishra, & Mahapatra, 2018; Yan, Wang, & Zhang, 2021).

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Condições da área de estudo

O estudo foi realizado durante a campanha agrícola 2022/23 na secção de práticas agrícolas e interações florestais nos campos experimentais da Universidade Católica de Moçambique, Faculdade de Ciências Agronómicas, no Distrito de Cuamba, Província de Niassa, norte de Moçambique (**Figura 10**). Com uma área estimada em 5.363 km² (INE, 2012), o distrito de Cuamba faz fronteira com os distritos de Metarica a norte, Mandimba a noroeste, Mecanhelas a oeste, Mutuali a leste e Gùrué a sul (INE, 2012). A região é classificada com base nos solos, clima e sistemas de cultivo como Zona Agroecológica 7, que corresponde às áreas de altitude média da Zambézia, Nampula, Tete, Niassa e Cabo Delgado (FEWS NET MOÇAMBIQUE, 2014).

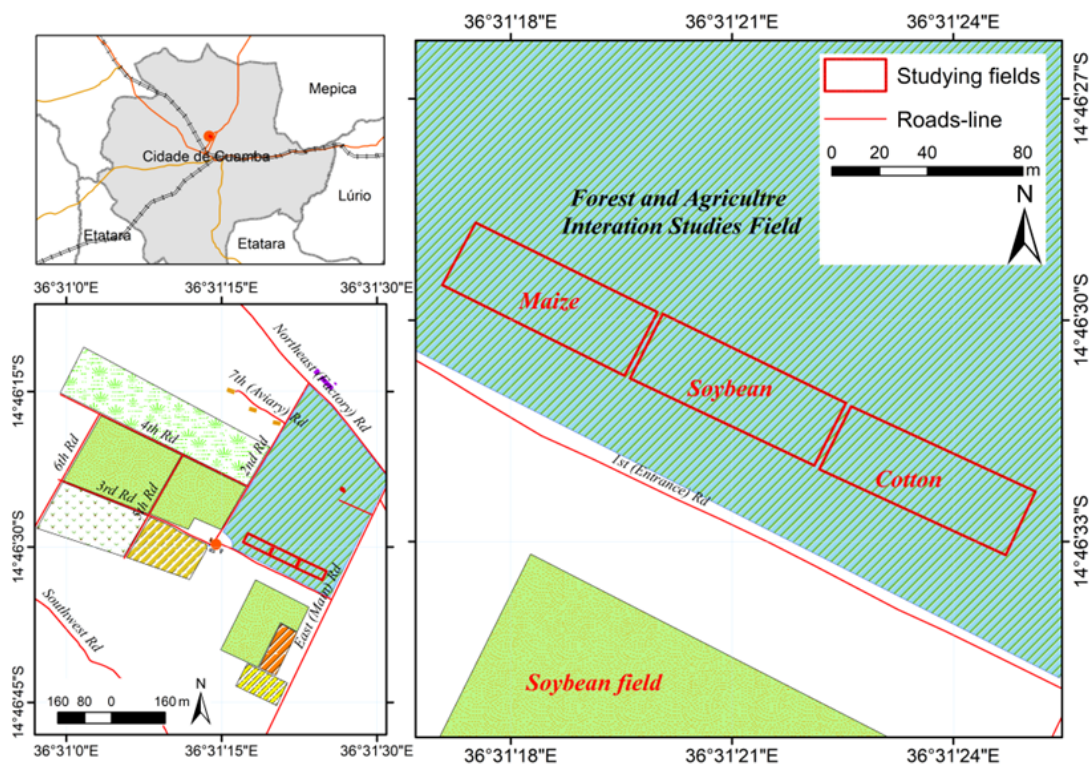


Figura 10. Localização geográfica da área de estudo

Nesta região (R7), a altitude varia de 200m na bacia do baixo rio Zambeze a 1000m acima do nível médio do mar, juntamente com as áreas de colinas altas de Tsangano e Angónia. A precipitação anual para esta região varia de 1000-1400mm com uma temperatura média anual que atinge 26°C (Bofana & Costa, 2017; INE, 2012; MAE, 2005) (**Figura 11**). No distrito de Cuamba em particular, as altitudes variam de 200m a 500m acima do nível médio do mar e tem um relevo ondulado que é por vezes interrompido pela formação rochosa (INE, 2012). Esta

região é caracterizada fisiograficamente por uma zona de planalto baixo que passa gradualmente para um relevo mais dissecado com declives mais acentuados, partindo da zona de transição do sub-planalto para a zona lateral.

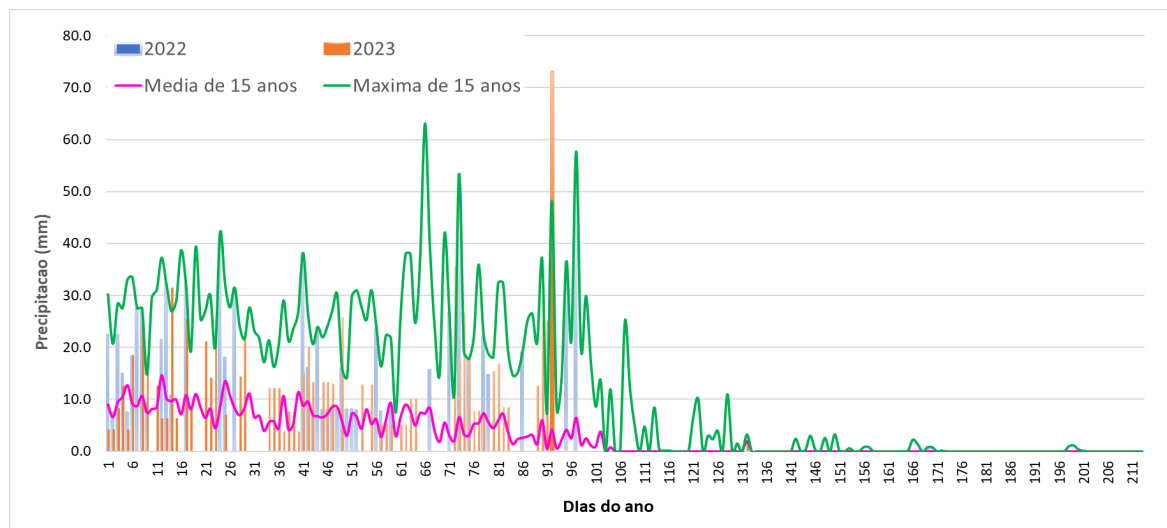


Figura 11. Precipitação ao longo do ciclo das culturas

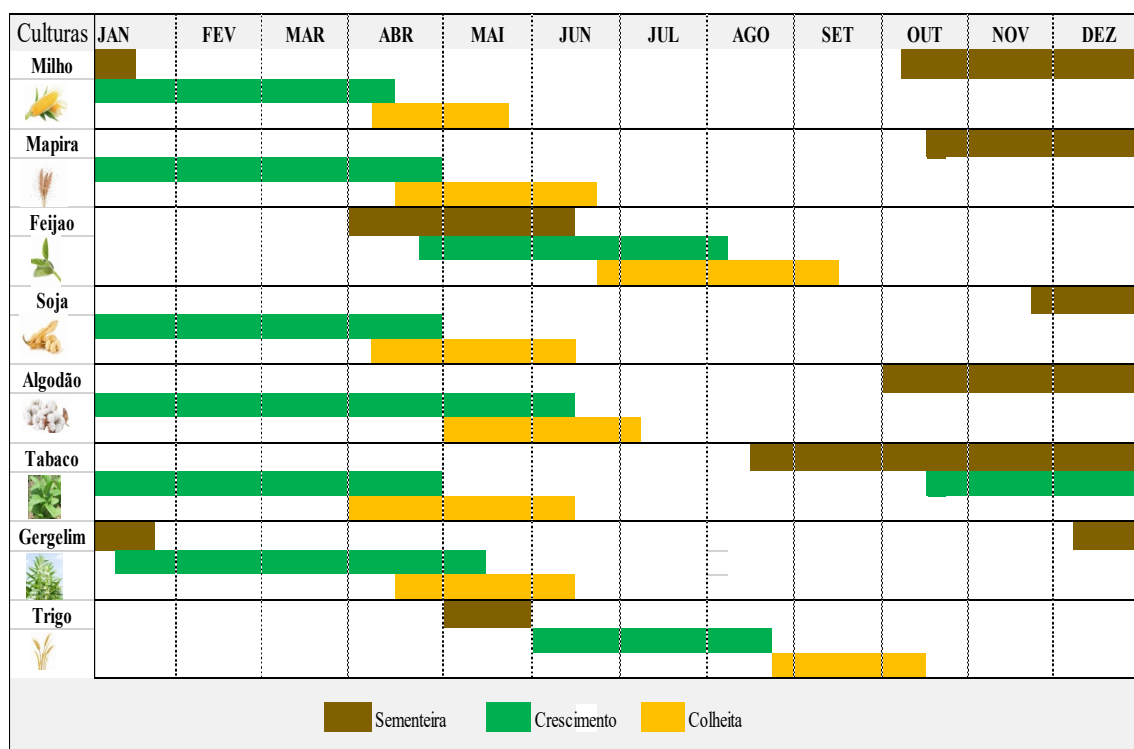


Figura 12. Calendário das principais culturas na região de estudo

Estas condições, somadas ao tipo de solos disponíveis na região, que são classificados como Leptossolos éutricos, Lexissolos Férricos e Arenossolos Câmbicos, contribuem para o desenvolvimento de diferentes culturas. O sistema de cultivo é maioritariamente de sequeiro, sendo as principais culturas o milho, mapira, o painço, o feijão-frade, a soja, o sésamo e o

amendoim. Para além disso, são também produzidas culturas de rendimento como o algodão e o tabaco, como mostra o calendário das principais culturas na região (**Figura 12**).

3.2. Materiais

Para esta investigação, foram estudadas três culturas diferentes (ou seja, soja, algodão e milho). As sementes utilizadas foram fornecidas por agências locais de sementes e produtores de grãos. O algodão (variedade ALBAR SZ 9314), um lote de milho (variedade local) e um lote de sementes de soja (variedade local) foram fornecidos pelo Grupo João Ferreira dos Santos, Sociedade Algodoeira do Niassa (JFS SAN), uma empresa que promove o cultivo de algodão e soja; um segundo lote de soja (variedade San-Beib) foi fornecido pela Universidade Católica de Moçambique, Faculdade de Ciências Agronómicas (UCM FCA); dois lotes de sementes de milho da variedade ZM521 (certificada e não certificada) foram adquiridos juntos a Klein Karoo Seed Company.

Além dos materiais acima referenciados, foram necessários, para este estudo, dois grupos de materiais foram usados, os do laboratório e os de campo. Os primeiros incluíram uma balança de precisão para medir o peso das amostras de sementes, placas de Petri para testes, algodão como substrato inerte, um formulário para registar o número de sementes germinadas e um crivo de 2 mm para preparar as amostras de solo. Quanto ao segundo grupo, este incluiu fitas métricas, estacas, um aparelho GPS para coordenadas geográficas, sonda e enxada para recolha de amostras de solo, cordas para demarcação das linhas de sementeira, um compasso para garantir o espaçamento adequado entre as plantas, sacos plásticos para armazenamento das amostras recolhidas, sacos apropriados para a recolha de extratos de plantas repelentes e pesticidas naturais, bem como um pulverizador de dorso para a aplicação eficaz dos pesticidas orgânicos.

3.3. Procedimentos metodológicos

Este estudo foi conduzido seguindo uma observância de certos eventos (**Figura 13**) que inclui três aspetos: operações de campo, operações laboratoriais e análises SIG.

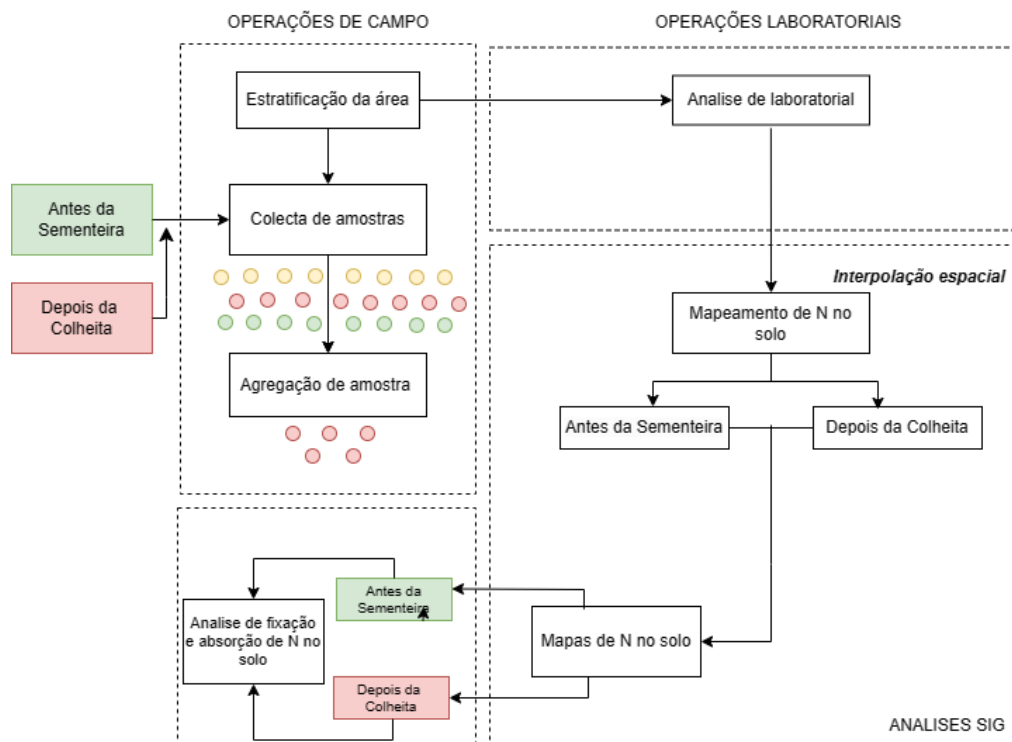


Figura 13. Fluxograma dos procedimentos metodológicos

3.3.1. Variáveis de observação ou medição

3.3.1.1. Vigor das sementes

Antes da implantação do experimento e da sementeira, as sementes de diferentes procedências foram submetidas a teste de laboratório para analisar a viabilidade de utilização das mesmas no experimento. O teste de sementes consistiu na análise da Pureza Física (PF) (Bishaw, Struik, & Van Gastel, 2012), que representa o número de sementes puras em um lote de sementes. Com base na disponibilidade de sementes para os testes, de cada lote, foram utilizados 154,39 gramas de sementes para separar as sementes puras das não puras. Esta informação foi depois aplicada à **equação 2** para determinar a PF.

Para além do PF, foram também determinados outros elementos. Estes incluem (1) Capacidade de germinação (CG) (Domin et al., 2019; Ranal & Santana, 2006; Vasanthakumar, Tewodros, & Anteneh, 2015) para analisar o número de sementes que poderiam germinar sob o ambiente alocado num lote de sementes. A Capacidade Germinativa também é um dos elementos utilizados para determinar a taxa de sementeira e foi calculada com base na **equação 3**; (2) Velocidade de germinação (VG) (Santos et al., 2015) que expressa a taxa de germinação em termos do número total de sementes que germinam em um intervalo de tempo (**equação 4**); (3) Energia de germinação (Domin et al., 2019; Ranal & Santana, 2006) que representa a percentagem de plântulas normais encontradas nas primeiras contagens da análise do poder

germinativo, normalmente após três ou quatro dias após a sementeira (**equação 5**); (4) o Tempo Médio de Germinação (TMG) (Ranal & Santana, 2006; Santos et al., 2015) que mede o tempo que a semente leva para germinar (**equação 6**); Para determinar o CG, VG, EG e TMG, foram utilizados 165 grãos de cada lote de sementes. Estes grãos foram subdivididos em números iguais de 15 e colocados em placas de vidro contendo algodão, que foi utilizado para criar a cama de sementes. Após a montagem da experiência de laboratório, os dados das sementes germinadas foram registados durante 7 dias. As sementes utilizadas nesta experiência foram selecionadas com base nos resultados do teste de sementes, em que os elementos analisados (ou seja, PF, CG, VG, EG e TMG) foram analisados em conjunto para a tomada de decisões.

$$PF (\%) = \frac{\text{Peso da semente pura}}{\text{Peso total da semente}} \times 100, \quad (2)$$

$$CG (\%) = \frac{\text{Total de sementes germinadas}}{\text{Número total de sementes}} \times 100, \quad (3)$$

$$VG = \left(\frac{G_1}{n_1}\right) + \left(\frac{G_2}{n_2}\right) + \dots + \left(\frac{G_n}{n_n}\right), \quad (4)$$

Onde: "G" corresponde ao número total de sementes germinadas e "n" corresponde ao número total de dias que a semente levou para germinar.

$$EG (\%) = \frac{\text{Total de sementes germinadas após 4 dias}}{\text{Número total de sementes testadas}} \times 100, \quad (5)$$

$$TMG = \frac{\sum_{i=1}^k T_i \times N_i}{\sum_{i=1}^k N}, \quad (6)$$

Onde "Ti" é o tempo decorrido desde o início da experiência até ao i-ésimo intervalo, "Ni" é o número de sementes germinadas no i-ésimo intervalo (não o número acumulado, mas o número correspondente ao i-ésimo intervalo) e "k" é o número total de intervalos de tempo.

3.3.1.2. Teste de correlação (EG vs CG/VG)

Após a coleta dos dados do teste de vigor, procedeu-se à realização de um teste de correlação para analisar a relação entre a Energia Germinativa e o Poder Germinativo, bem como entre a Energia Germinativa e a Velocidade de Germinação. O teste de correlação é uma análise estatística que mede o grau de associação entre duas variáveis e este pode ser usado para avaliar se há uma relação linear ou não linear entre as variáveis, bem como a força e a direção dessa relação (Asuero, Sayago, & González, 2006; Miot, 2018). O teste de correlação usado neste estudo foi o de Pearson, que é uma técnica mais difundida para a avaliação da correlação entre

duas variáveis quantitativas (Miot, 2018). Este teste, apresenta seus resultados num intervalo de -1 a 1.

Em que um valor de 0 indica que não há associação entre as duas variáveis. Um valor maior que 0 indica uma associação positiva, ou seja, à medida que o valor de uma variável aumenta, o mesmo acontece com o valor da outra variável. Um valor menor que 0 indica uma associação negativa, isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui.

3.3.1.3. Tamanho da população de plantas e análise do desenvolvimento da cultura

Como o tamanho da população de plantas (TPP) pode influenciar o rendimento potencial de qualquer cultura (Bleasdale & Nelder, 1960; Reis et al., 2022), bem como a quantidade total de nutrientes que podem ser recuperados do solo (Ciampitti, Camberato, Murrell, & Vyn, 2013), é importante avaliar a população de plantas nas parcelas de estudo. Para este estudo, foram estabelecidas três parcelas para as diferentes culturas (incluindo algodão, soja e milho). Cada parcela tinha uma área de 2505 m² ou 0,25 hectares (**Figura 14a**). Neste estudo, o tamanho da população de plantas foi analisado em três períodos diferentes (incluindo 15 dias após a data de sementeira, 45 dias após a data de sementeira e duas semanas antes do período de colheita). Para cada período, o número total de plantas dentro da área útil em cada parcela foi contado e o número foi então corrigido para a área de um hectare usando a **equação 7**.

$$TPP \text{ (ha)} = \frac{1 \times N}{\text{Área da parcela (ha)}} \quad (7)$$

Onde ‘TPP’ corresponde ao tamanho da população de plantas, N corresponde ao número total de plantas na área útil da parcela e 1 é o valor de correção.

Neste estudo, para além da análise do tamanho da população de plantas em diferentes períodos, foi efectuada uma avaliação das condições de desenvolvimento das culturas. Isto envolveu a análise do desenvolvimento de pragas e doenças e a implementação de medidas para evitar a sua propagação pelos campos, de modo a mitigar potenciais danos nas culturas. Para gerir eficazmente as pragas e as doenças, foi utilizado o método biológico para o controlo das pragas e das doenças. A utilização de abordagens orgânicas dá prioridade a técnicas sustentáveis e respeitadoras do ambiente para minimizar a utilização de produtos químicos sintéticos e promover o equilíbrio dos ecossistemas naturais (D. A. Moura, Paulo, Soares, Reis, & Farias, 2021; Pinto-Zevallos & Zarbin, 2013). Ao empregar tais métodos, o estudo teve como objetivo garantir a saúde e a produtividade das culturas, minimizando os impactos negativos no ambiente circundante.

Entre o vasto leque de plantas orgânicas estudadas pela sua potencialidade no controlo de pragas e doenças, o alho (*Allium sativum*) (Anwar, Gould, Tinson, Groom, & Hamilton, 2017; Magwanya, Svtwa, & Katsaruware, 2016), o rícino (*Ricinus communis*) (Choi et al., 2016; Sotelo-Leyva et al., 2020) e o neem (*Azadirachta indica*) (Adusei e Azupio 2022; Chaudhary et al. 2017) surgiram como candidatos proeminentes. Estas plantas possuem propriedades naturais que se acredita deterem as pragas e inibirem o crescimento de doenças.

O alho, por exemplo, é bem conhecido pelo seu forte aroma e propriedades inseticidas naturais (Aisyah, Anggraini, Adiesty, Tanjung, & Ramadhani, 2023), enquanto o ricinus, vulgarmente conhecido como rícino, contém compostos que exibem efeitos pesticidas (Choi et al., 2016; Sotelo-Leyva et al., 2020). O neem, por outro lado, é há muito reconhecido pelos seus numerosos compostos bioativos que exibem propriedades inseticidas, antifúngicas e antimicrobianas (Adusei & Azupio, 2022; Boeke et al., 2004). Com base nesta informação, o nosso estudo baseou-se na utilização de alho, que apresentou melhores resultados num estudo que comparou diferentes métodos orgânicos para o controlo de pragas e doenças (Chekwa, Ndubuisi, & Maxwell, 2010; Magwanya et al., 2016).

3.3.2. Mapeamento da distribuição espacial da fixação e absorção de N₂ da absorção

3.3.2.1. Estratégia de amostragem do solo

Neste estudo, adotou-se o método de amostragem do solo baseado em grelhas para recolher amostras de solo destinadas à análise de nitrogénio. Dado que o sucesso do método de amostragem em grelha depende de vários fatores, incluindo o tamanho da grelha e o número de pontos de amostragem, seguiu-se a recomendação de Ackerson, (2018) para amostragem espacialmente explícita em análises de fertilidade do solo. A abordagem recomendada envolve a recolha de uma amostra composta dentro de uma grelha que varia de 0,4 a 2,0 hectares de área, com subamostras que variam de 8 a 10.

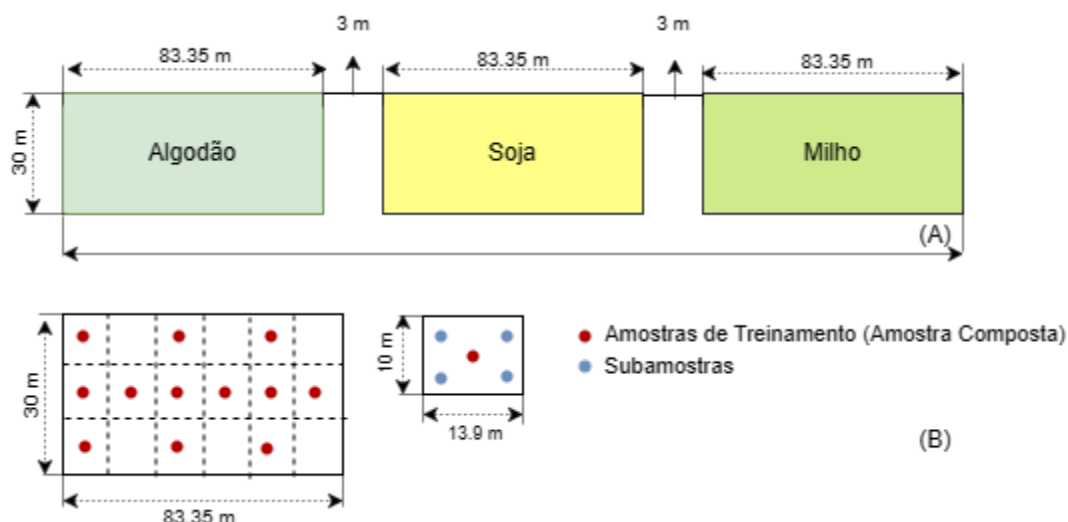


Figura 14. Representação do campo e procedimento de amostragem em grelha.

Neste estudo, contudo, estes números foram ajustados com base na dimensão dos campos, dividindo-os em 18 células de igual dimensão de 139 m² (10 m x 13,9 m). Para assegurar a heterogeneidade do solo, foram utilizadas apenas 12 destas grelhas e selecionou-se 5 pontos de amostragem em cada célula amostrada (**Figura 14b**). As amostras de solo foram recolhidas em dois períodos distintos (antes da sementeira e após a colheita) com um trado de solo a uma profundidade de pelo 20 cm (Carretero et al., 2016), e as amostras recolhidas em cada grelha foram combinadas para formar uma amostra composta. A informação geográfica (latitude, longitude e altitude) do ponto central de cada grelha foi recolhida utilizando a aplicação móvel GPS (Sistema de Informação Geográfica, Câmara e GPS) (Harris et al., 2013), permitindo a obtenção da informação geoespacial de cada amostra composta. No total, foram colhidas 12 amostras em cada campo em dois períodos distintos (antes da sementeira e após a colheita), totalizando 24 amostras em cada campo para os dois períodos.

As amostras compostas foram depois analisadas em laboratório para extrair a quantidade total de N_2 no solo durante os dois períodos. Os resultados da análise foram utilizados para criar mapas do solo e dar recomendações para práticas de manejo do solo. O método de amostragem do solo em grelha proporcionou uma abordagem sistemática à amostragem do solo que garantiu a recolha de amostras de solo representativas e imparciais. Este método tem sido amplamente utilizado em vários domínios, como a agricultura (Rafael Nanni et al., 2011; Stafilov et al., 2010; M. Wang et al., 2011).

3.1.1.1. Análise de N₂ no solo

A análise do teor de nitrogênio nas amostras de solo foi conduzida seguindo os padrões internacionais estabelecidos para a determinação desse nutriente e o que levou a essa eleição foi a grande disponibilidade e aplicabilidade deste método nos laboratórios nacionais de análise de solo. O método empregado foi o método Kjeldahl, que compreende três etapas fundamentais: digestão, destilação e titulação (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2021).

1. **Digestão:** Aproximadamente 0,5 g ou menos (0,2 g) da amostra foi transferida para o tubo de digestão e 1-3 g da mistura de K₂SO₄ e CuSO₄ foi adicionada (amostra e K₂SO₄ & CuSO₄.5H₂O na proporção de 5:1). Foram adicionados 10 ml de ácido sulfúrico concentrado e os tubos de digestão foram colocados no bloco de digestão com a temperatura ajustada para 400 °C. Após 2 a 3 horas, quando a cor do conteúdo nos tubos de digestão ficou verde-claro, eles foram retirados do bloco de digestão. Os tubos foram deixados esfriar até atingirem a temperatura ambiente.
2. **Destilação:** As amostras digeridas foram submetidas à unidade de destilação, e a destilação das amostras foi realizada usando 4% de ácido bórico e 40% de hidróxido de sódio. O programa foi ajustado automaticamente para adicionar 20 ml de água destilada, 20 ml de solução indicadora de ácido bórico e 20 ml de solução de NaOH, e a destilação foi conduzida por cerca de 9 minutos. Antes de iniciar o processo de destilação, foram adicionados 20 ml de água destilada. O frasco foi colocado sob o condensador com a ponta de entrega imersa na solução. As amostras digeridas foram transferidas para o aparato de destilação, e 40% de hidróxido de sódio foi adicionado a elas. O destilado foi coletado em um frasco cônico. Sempre foi realizada uma análise em branco contendo as mesmas quantidades de todos os reagentes, exceto a amostra, para cada conjunto de determinação de nitrogênio.
3. **Titulação:** A terceira etapa envolve a titulação da solução ácida contendo a amônia destilada. Nesse processo, a solução ácida é neutralizada usando uma solução padrão de ácido clorídrico de concentração conhecida. A quantidade de ácido clorídrico necessária para neutralizar a amônia é usada para determinar a quantidade de nitrogênio presente na amostra.

O cálculo dos resultados na análise de nitrogênio no solo pelo método Kjeldahl envolve o uso de fórmulas específicas para determinar a concentração de nitrogênio na amostra. A fórmula geral para o cálculo é como mostrado na **equação 8**.

$$\%N = \frac{(V \times N \times 14.007)}{W} \quad (8)$$

Onde: %N é o teor de nitrogênio na amostra, V é o volume da solução padrão de ácido clorídrico usado na titulação, N é a normalidade da solução padrão de ácido clorídrico, 14.007 é a massa molar do nitrogênio e W é a massa da amostra.

3.1.1.2. Interpolação de dados e quantificação da fixação ou absorção de N

Neste estudo, o total de 24 amostras de solo de cada campo divididas igualmente entre dois períodos diferentes: antes da sementeira (pré-colheita) e após a colheita (pós-colheita) foram colhidas (**vede a sessão 3.3.2.1**). Das 12 amostras obtidas para cada período, e para realizar a interpolação utilizou-se o método de Inverso da Distância Ponderada (IDW). O método IDW é uma técnica comumente utilizada para interpolação espacial, que estima os valores de locais desconhecidos com base nos valores conhecidos dos locais circundantes (Bofana & Costa, 2017; F. W. Chen & Liu, 2012). Neste estudo, o método IDW foi utilizado para prever o teor de nitrogénio em locais não observados dentro de cada campo. O processo de interpolação envolveu a atribuição de pesos às amostras com base em sua proximidade com o local de destino. As amostras mais próximas do local de destino receberam pesos mais elevados, enquanto as amostras mais afastadas receberam pesos mais baixos. Os pesos foram determinados por uma relação inversa com as distâncias entre as amostras (Bofana & Costa, 2017).

Uma vez atribuídos os pesos, os valores de nitrogénio das amostras de treino próximas foram combinados utilizando uma abordagem de média ponderada para estimar o teor de nitrogénio nos locais não observados. Este procedimento de interpolação foi repetido para cada um dos locais-alvo no campo, resultando numa representação espacial contínua da distribuição do nitrogénio. O processo de interpolação foi efectuado utilizando o software de cartografia da ESRI (Environment Systems Reseach Instituite), ArcGIS versão 10.7 na extensão ArcMap. Através da utilização do método IDW, este estudo teve como objetivo captar os padrões espaciais de absorção ou fixação de nitrogénio no solo resultantes dos diversos tipos de culturas em estudo. A diferença entre os teores de nitrogénio antes da sementeira e após a colheita foi calculada para determinar a absorção ou fixação de nitrogénio no solo, permitindo avaliar o impacto da cultura no teor de nitrogénio do solo.

3.4. Condução das actividades de campo

3.4.1. Delimitação do campo

Para estabelecer o estudo, delimitaram-se três áreas distintas (**Figura 14a**), cada uma com um quarto de hectare (2.500,5 m²), totalizando assim três quartos de hectare (7.681,5 m², incluindo as áreas de gestão e separação entre os campos) para a implantação das culturas. Esta atividade foi realizada na primeira semana de janeiro de 2023. As dimensões dos campos foram de 30 metros de largura por 83,35 metros de comprimento, com uma distância de 3 metros entre eles.

3.4.2. Sementeira

Imediatamente após a delimitação do campo, foi realizada a sementeira durante a primeira semana do mês de janeiro de 2023. Recomenda-se que a sementeira obedeça os compassos apropriados, sendo que para leguminosas variam de 45 a 75 cm entre as linhas e 5 a 15 cm entre as plantas, no milho, os compassos variam de 80 a 90 cm entre as linhas e 25 a 50 cm entre as plantas e na cultura de algodão os compassos variam de 75 a 100 cm entre linhas e 10 a 60 cm (Dias, 2018). Embora sejam mencionados estes compassos, os seguintes foram serão usados: Milho (90 x 30 cm), Soja (50 x 20 cm) e algodão (80 x 20 cm), dado que os produtores e as empresas de fomento também recomendam devido a situação do pequeno produtor.

3.4.3. Sacha

Durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, foi implementado um programa de controle de ervas daninhas que envolveu duas operações de sachas. Essas duas intervenções de sachas foram planejadas de forma estratégica. A primeira delas ocorreu durante a quarta semana do mês de janeiro de 2023, enquanto a segunda sacha foi realizada na primeira semana do mês de março de 2023. Optou-se por realizar essas tarefas manualmente, empregando enxadas e contando com a mão de obra contratada devido às extensas dimensões dos campos experimentais.

3.4.4. Pulverizações

Com o objetivo de preservar a integridade das culturas de algodão e milho e minimizar os danos causados por pragas e doenças durante o ciclo das culturas, foi implementado um programa de manejo orgânico. Este programa envolveu o uso de pesticidas orgânicos formulados a partir de extratos de rícino, margosa e alho. As ações tiveram início aproximadamente quatro semanas após a sementeira, quando foram observadas pragas no campo, incluindo afídeos no algodão e gafanhotos no milho. A **figura 15** mostra algumas das pragas e doenças registradas no campo.

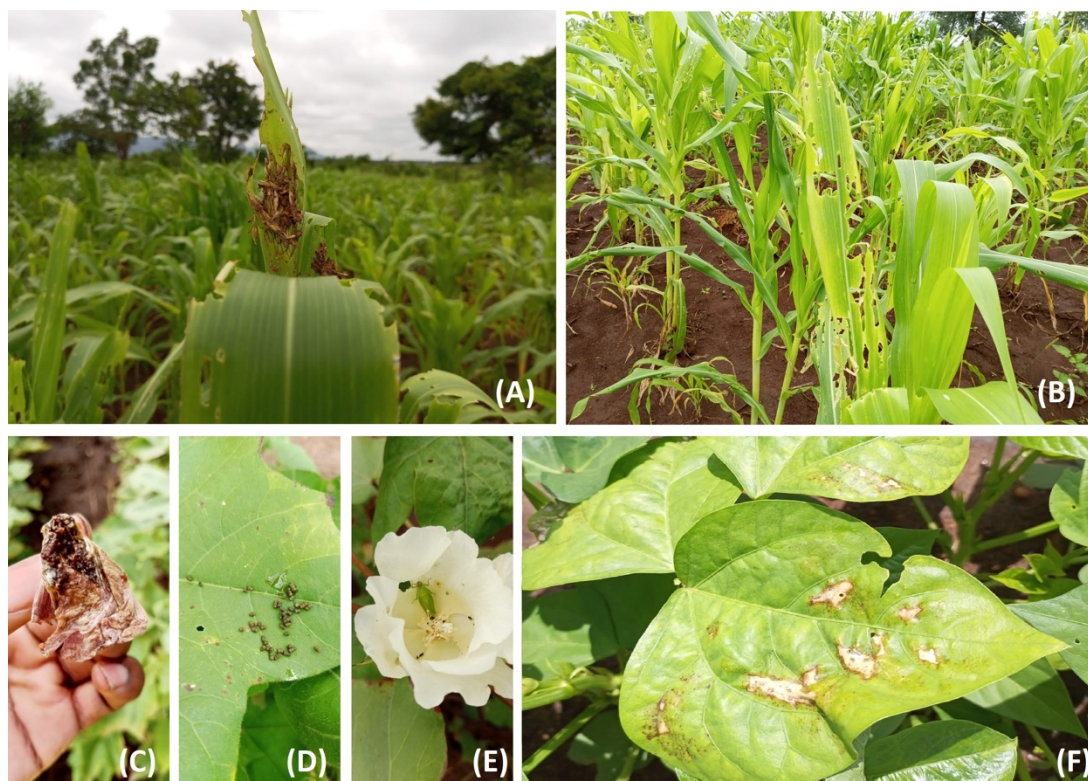


Figura 15. Diferentes pragas e doenças observados no campo

Campo de milho (A – *Spodoptera frugiperda* and B - *Gafanhotos*), campo de algodão (C - *Pectinophora gossypiella*, D – *Aphis gossypii* and E - *Gafanhotos*), e campo de soja (F - *Cercospora kikuchii*).

A frequência das aplicações de pesticidas foi ajustada com base no nível de infestação presente. Quando a presença de pragas era baixa ou para prevenir seu rápido desenvolvimento, as aplicações eram realizadas a cada 15 dias. Em momentos de infestação mais intensa, o intervalo entre as aplicações era encurtado para uma frequência semanal. A escolha de pesticidas com múltiplas origens foi motivada pelo fato de que na mesma área de estudo, um projeto paralelo estava em andamento, *avaliando a eficácia do uso de diferentes pesticidas orgânicos na prevenção de pragas e doenças nas culturas de algodão e milho*. A formulação dos pesticidas usados neste estudo baseou-se nos extratos mencionados no texto, alinhando-se com as práticas orgânicas e sustentáveis de manejo agrícola. Essa abordagem contribuiu para a proteção das culturas e a promoção da agricultura orgânica na área de estudo.

3.5. Análise e processamento de dados

Os dados provenientes das observações e dos resultados das análises laboratoriais das amostras de solo, coletadas nos campos de cultivo de algodão, soja e milho, tanto antes da sementeira quanto após a colheita, passaram por um processo de análise. Para isso, utilizou-se o software Microsoft Excel para calcular a população de plantas, com base nos resultados das contagens

realizadas no campo, e analisar as diferenças entre os períodos de contagem. Além disso, empregou-se a ferramenta IDW (Inverse Distance Weighted) para a interpolação dos valores das amostras, utilizando o software ArcGIS versão 10.7 da extensão ArcMap, desenvolvido pela ESRI (Environmental Systems Research Institute).

3.6. Constrangimentos

O estudo inicialmente planejou usar Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para monitorar a vegetação com NDVI, mas enfrentou-se dificuldades operacionais. Isso afetou a precisão na detecção de pragas e doenças, bem como na aplicação eficiente de pesticidas. Como alternativa, o monitoramento direto de pragas e doenças no campo foi realizado para aplicar insumos agrícolas de forma mais precisa e econômica.

3.7. Considerações éticas

O estudo foi conduzido com o mais elevado respeito pela dignidade e bem-estar dos participantes, das plantas e do meio ambiente. Durante a pesquisa, as pessoas envolvidas não foram sujeitas a qualquer dano físico, psicológico ou social. Os participantes foram tratados com cortesia, respeito e igualdade. Além disso, a diversidade e a sensibilidade cultural dos participantes foram estritamente respeitadas, evitando qualquer forma de discriminação com base em idade, gênero, raça, etnia, religião ou outros critérios.

O estudo foi realizado em um ambiente natural que não causou qualquer prejuízo ou perturbação ao meio ambiente. Fizemos esforços significativos para minimizar o uso de recursos ou materiais que pudessem impactar negativamente o meio ambiente. Além disso, todos os resíduos e subprodutos foram descartados de maneira segura e responsável.

Os resultados do estudo foram reportados com total honestidade e precisão, sem qualquer forma de fabricação, falsificação ou plágio. Reconhecemos as contribuições de todos os pesquisadores, participantes e patrocinadores envolvidos no estudo. Ao longo de todo o processo, mantivemos os mais rigorosos padrões de integridade científica e conduta ética.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS, ANALISE E DISCUSSÃO

4.1. Teste de vigor de Sementes

Neste estudo, diferentes lotes de sementes das diversas culturas de diferentes origens, foram usadas para o teste de vigor da semente para identificar quais seriam ideais para uso na produção. Os resultados deste teste podem ser vistos na **tabela 2**.

Tabela 2. Teste de Vigor de Sementes

Sementes	Algodão	Soja		Milho		
Variedades	ALBAR SZ9314	SAN- BEIB	LOCAL	ZM521 CERTIFICADA	ZM521 NÃO CERTIFICADA	LOCAL
PF (%)	98.9	96.2	97.0	99.6	99.4	93.8
CG (%)	66.7	84.2	78.8	11.3	24.8	86.7
VG	83.5	81.5	61.2	3.1	8.8	38.3
EG (%)	66.7	80.0	67.9	1.3	11.5	61.8
TMG (horas)	36	53	65	137	124	99.4

Os dados apresentados **tabela 2** oferecem uma visão abrangente das características das sementes testada. Notavelmente, as sementes de algodão demonstraram uma alta pureza física, atingindo 98,9%, o que indica a presença mínima de impurezas no lote. Além disso, o período médio de germinação foi relativamente rápido (média em 36 horas após a sementeira). No entanto, um aspecto importante a destacar é que a capacidade de germinação das sementes de algodão apresentou um desempenho relativamente baixo, com uma CG de 66,7%. Observa-se também que esse resultado de CG pode ter sido influenciado pela energia de germinação, que também registrou um valor próximo, atingindo 66,8%. Esses resultados indicam que, embora as sementes de algodão desta variedade sejam fisicamente puras e germinem rapidamente, sua capacidade de germinação é inferior. Isso sugere a possibilidade de questões relacionadas à viabilidade das sementes ou a fatores ambientais que podem afetar seu potencial de germinação.

No que diz respeito às sementes de soja, é importante observar que ambos os lotes demonstraram semelhanças em relação à sua pureza física. No entanto, uma diferença notável surgiu com a variedade San-Beib, que se destacou pela sua notável capacidade de germinação, atingindo um valor de 84%. Isso contrasta significativamente com a variedade local. Além da superioridade na capacidade de germinação, a variedade San-Beib se sobressaiu em todos os outros parâmetros analisados. Um destaque especial vai para a velocidade de germinação (81,5) e a energia de germinação (80,0%). Esses resultados ressaltam não apenas a qualidade das sementes da variedade San-Beib, mas também sua vantagem competitiva em relação à variedade local. A alta capacidade de germinação e a rápida velocidade de germinação indicam

um potencial significativo para o cultivo dessa variedade em termos de rendimento e produtividade.

A avaliação minuciosa das diferentes variedades de sementes de milho (ZM521 Certificada, ZM521 Não Certificada e Local) revela uma série de insights valiosos para os produtores e agricultores. É notável que a variedade Local tenha superado de maneira significativa as variedades ZM521 Certificada e ZM521 Não Certificada em vários aspectos cruciais. Primeiramente, em relação à pureza física das sementes, as variedades ZM521 Certificada e ZM521 Não Certificada obtiveram números impressionantes, com 99.6% e 99.4% de pureza, respectivamente. Isso significa que essas variedades apresentam sementes com uma percentagem muito alta de conteúdo genuíno, representando uma diferença de 5.8% e 5.6% em comparação com a variedade Local, que atingiu uma ainda respeitável percentagem de 93.8%. Essa alta pureza física é fundamental para assegurar que as sementes tenham um potencial máximo de germinação e vigor. No entanto, quando nos voltamos para a capacidade de germinação (CG), é a variedade Local que se sobressai de forma notável. Apresentando uma alta percentagem de 86.7%, supera significativamente as variedades ZM521 Certificada (11.3%) e ZM521 Não Certificada (24.8%). Essas diferenças substanciais de 75.4% e 61.9%, respectivamente, destacam a capacidade da variedade Local de gerar plântulas vigorosas e saudáveis, o que é crucial para o sucesso da lavoura. Além disso, a variedade Local demonstra sua superioridade quando se trata do tempo médio de germinação (TMG). Com um valor de 99.4 horas, o TMG da variedade Local é notavelmente mais curto do que os 137 e 124 horas apresentados pelas variedades ZM521 Certificada e ZM521 Não Certificada, respectivamente. Isso sugere que as sementes da variedade Local germinam de maneira mais rápida, proporcionando uma vantagem no estabelecimento das plantas.

Embora os resultados tenham variado entre as diferentes sementes testadas, é importante destacar a presença de correlações diretas entre várias variáveis avaliadas. A **figura 16** ilustra uma relação positiva entre a velocidade de germinação e a energia de germinação, bem como entre a capacidade de germinação e a energia de germinação. Os valores de correlação (r) para essa relação foram calculados em 0,97 e 0.99, respectivamente, indicando uma influência positiva mútua entre essas variáveis. Isso sugere que sementes que germinam mais rapidamente e sementes com maior capacidade de germinação, tendem a ter uma energia de germinação mais elevada, o que é um indicativo importante de sua qualidade e potencial de crescimento (Popinigis, 1983).

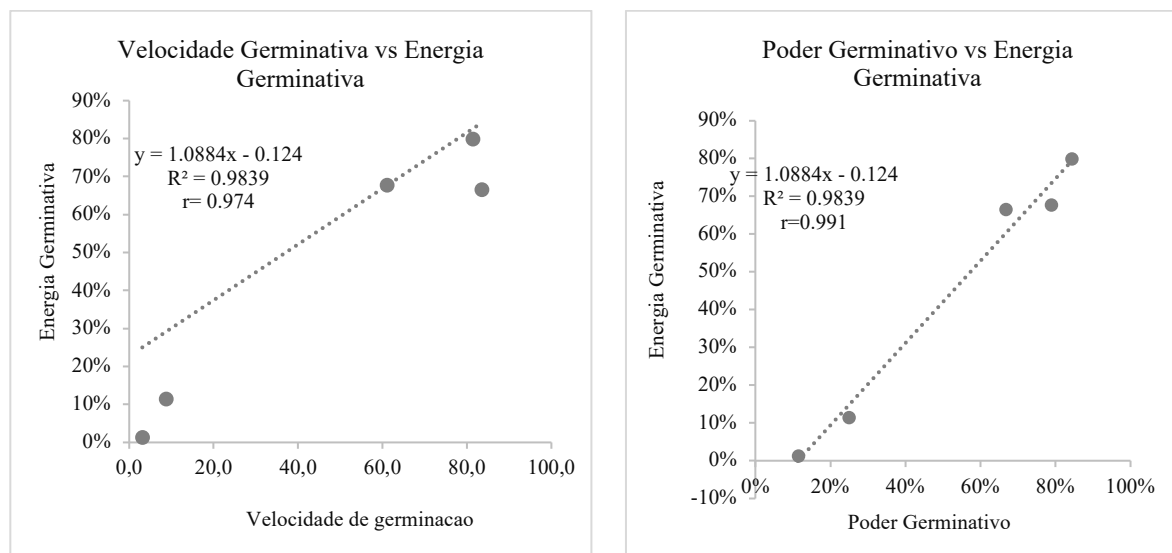


Figura 16. Relação entre as variáveis do teste de vigor de sementes

Velocidade germinação vs Energia Germinativa (A) & Poder Germinativo Vs Energia Germinativa (B)

Com base nos resultados de vigor das sementes acima referidos, foram selecionadas para plantação as seguintes variedades de sementes de culturas: (1) Algodão - variedade ALBAR SZ 9314; (2) Soja - variedade San-Beib; e (3) Milho - variedade local. A realização do teste de vigor de sementes bem como a escolha das sementes que melhores resultados apresentaram baseou-se no princípio de que qualidade das sementes desempenha um papel crucial no sucesso da agricultura, e as taxas de germinação são um indicador vital desse desempenho (Guedes, Alves, Gonçalves, Santos, & Lima, 2009; Sharma, 2018), em que Davies, Di Sacco, & Newton (2015) afirma que sementes com alta viabilidade devem atingir um resultado de germinação igual ou superior a 85%.

Com uma taxa de germinação real de 66.7%, as sementes de Algodão ALBAR SZ9314 estão abaixo da marca mínima recomendada em 18.3%. Para o caso da Soja (San-Beib), a taxa de germinação se encontra com 84.2%, está apenas ligeiramente abaixo do padrão recomendado de 85%. Essa pequena diferença de -0.8% pode ser devido a variações normais na qualidade das sementes. As sementes de Milho Local exibem uma taxa de germinação de 78.8%, o que representa uma diferença de -6.2% em relação aos 85% mínimos recomendados. E por mais que a pureza física das sementes seja alta, atingindo 98.9%, 96.2% e 93.8%, respectivamente, é necessário ressaltar que há outra componente que deve ser analisada para determinar a pureza das sementes, a pureza genética que é a proporção de genes da variedade desejada em relação ao total de genes presentes na semente (Padilha, Guimarães, & Paiva, 2003; Silveira Borba &

Vilela De Andrade², 1977), e pode certamente influencia na capacidade de germinação de um determinado lote de sementes (Padilha et al., 2003).

Para além do factor pureza genética acima mencionado, as diferenças aqui obtidas podem ser atribuídas a diversos fatores tais como a baixa qualidade das sementes, condições de temperatura e umidade do armazenamento que podem ter afetado a quantidade de reservas nutritivas se não bem manejado, não ter recebido da planta mãe reservas nutritivas suficientes durante o ciclo da cultura, características genéticas específicas das variedades, as condições do teste podem não ter sido as mais ideais para a germinação, e a presença de patógenos (Gebeyaw, 2020; Milošević, Vujaković, & Karagić, 2010; Reed, Bradford, & Khanday, 2022; Tekrony, 2003).

4.2. População de plantas

Durante este estudo, foi também feita uma avaliação detalhada da população de plantas nas diversas culturas agrícolas em três momentos distintos. A primeira avaliação ocorreu 15 dias após a sementeira, fornecendo informações iniciais sobre o estabelecimento e desenvolvimento das plantas. A segunda avaliação ocorreu cerca de 45 dias após a sementeira, oferecendo uma informação sobre o estágio intermediário do crescimento e expansão das culturas. Finalmente, a terceira contagem foi realizada no momento da colheita, permitindo a análise do número de plantas que atingiram o ciclo completo de crescimento. Essas avaliações sucessivas forneceram uma visão da evolução da população de plantas das culturas ao longo do ciclo. Isso tornou possível a compreensão das flutuações na população de plantas em diferentes fases do crescimento e como essas variações podem afetar a absorção ou a fixação de nitrogênio. Assim, os resultados destas avaliações são apresentados na **tabela 3**.

Tabela 3. População de plantas ao longo do ciclo das culturas

Cultura	15 dias após a sementeira			45 dias após a sementeira		Após a colheita		
	Esperada	Contagem	Diferença (%) *	Contagem	Diferença (%) **	Contagem	Diferença (%) ***	Diferença (%) ****
Algodão	62510.75	26926.61	-56.9	47558.49	+33.0	43167.3	-9.2	+60.3
Soja	83398.33	36636.67	-56.1	51837.63	+18.2	36864.6	-28.9	+0.60
Milho	36431.27	24023.2	-34.1	26238.75	+6.1	19268.1	-26.6	-19.8

*Diferença em relação à percentagem de emergência esperada; **Diferença entre a segunda e a primeira contagem;

Diferença entre a terceira e a segunda contagem; *Diferença entre a terceira e a primeira contagem.

Os resultados apresentados na tabela 03 indicam que 15 dias após a sementeira, a soja com um espaçamento de plantas de 50x20 apresentou a maior população de plantas por hectare (36.636

plantas) em comparação com as outras culturas. No entanto, essa população ainda estava 56,1% abaixo do número esperado de plantas com base no espaçamento de plantio designado (que era de 83.398 plantas). Padrões semelhantes foram observados nas culturas de algodão e milho, que, apesar de terem espaçamentos de plantio mais amplos, mostraram população de plantas por hectare menores, com 26.926 e 24.023 plantas, respectivamente (representando 56,9% e 34,1% a menos do que as contagens esperadas, respectivamente). Para lidar com esse problema, foi realizada uma atividade de ressemeadura após a contagem inicial, envolvendo o plantio de sementes adicionais em áreas com germinação deficiente ou população de plantas insatisfatória.

A reduzida população inicial de plantas pode estar associada a uma germinação inicial insuficiente, e isso pode ser resultado de várias causas, como a qualidade das sementes, como apontado também por Milošević et al., 2010; Reed et al., (2022). Esse problema é evidenciado nos resultados do teste de vigor (como descrito em 4.1), que aponta que a cultura do algodão apresenta um poder germinativo de apenas 66.7%. Essa taxa está consideravelmente abaixo do padrão recomendado de 85%, representando uma diferença de 18.3%. No caso das outras duas culturas, embora tenham atingido a taxa mínima recomendada, não há garantia de um alto número de plantas, mas pelo menos oferecem uma população estável, mesmo que com uma margem de erro. Além disso, é importante considerar possíveis influências de fatores climáticos, como chuvas excessivas ou prolongadas (vede a **figura 11** das condições da precipitação no decorrer do estudo), bem como níveis inadequados de luminosidade. Essas condições podem ter tido um impacto adverso na germinação, sobrevivência e crescimento das plantas, como também apontado em Marca et al., 2021; Stefanello et al., (2012) e Torres-Martínez et al., (2017). A qualidade do solo também pode ter desempenhado um papel crucial na germinação e crescimento das plantas, pois solos de baixa fertilidade, compactação, acidez inadequada ou deficiências de nutrientes podem limitar o desenvolvimento das raízes e a absorção de nutrientes (Fagundes, Camargos, & Costa, 2011; Shoemaker & Carlson, 1990);

Trinta dias depois (45 dias após a sementeira), uma segunda contagem revelou 47.558 plantas de algodão, equivalente a 79,22% da população total de plantas esperada (estimada em 62.510 plantas). Isso representou um aumento de 33% em comparação com a primeira contagem realizada 15 dias após a sementeira. Aumentos semelhantes foram observados para a soja e o milho, com populações de plantas de 51.837 e 26.238 plantas, respectivamente (representando 62,17% e 72,04% da população de plantas esperada). Esses números correspondiam a um aumento de 18% e 6% para a soja e o milho, respectivamente, em comparação com a primeira contagem. O aumento na população de plantas nesta contagem é atribuído a atividade de

ressementeira realizada, na qual sementes adicionais foram lançadas em áreas com baixa germinação na primeira contagem, isso resultou em uma recuperação na população de plantas.

No momento da colheita, uma terceira contagem mostrou uma redução nas populações de plantas. Houve 43.167 plantas de algodão, representando uma diminuição de 9,2% em relação à segunda contagem e um aumento de 60,3% em relação à primeira contagem. Para a soja, houve 36.864 plantas, indicando uma diminuição de 28,9% em relação à segunda contagem e um aumento de 0,60% em relação à primeira contagem. Quanto ao milho, houve 19.268 plantas, representando uma diminuição de 26,57% em relação à segunda contagem e uma diminuição de 19,8% em relação à primeira contagem. A diminuição observada na terceira contagem em comparação com a segunda contagem pode ser atribuída a fortes chuvas que ocorreram em março de 2023 (**Figura 11**), impactando significativamente o desenvolvimento das culturas. Outro fator que contribuiu para a redução nas populações de plantas foi a ocorrência de pragas e doenças (**Figura 15**). Embora métodos orgânicos de controle de pragas e doenças tenham sido implementados neste estudo e tenham mostrado bons resultados, sua eficácia não foi totalmente alinhada com recomendações de pesquisas anteriores, uma vez que algumas pragas e doenças persistiram ao longo do ciclo das plantas, especialmente no campo de algodão.

4.3. Quantificação da fixação e absorção e mapeamento da distribuição espacial do N

4.3.1. Quantificação da fixação e absorção do N

Os gráficos das **figuras 17, 18 e 19** são as concentrações de nitrogênio no solo, medida em quilogramas por hectare (kg/ha), antes da sementeira, após a colheita e a diferença entre esses dois períodos ao longo do ciclo de cultivo das culturas de algodão, milho e soja. Os dados coletados antes da sementeira revelam o estado inicial do solo em relação à concentração de nitrogênio. O que quando contrastados com os valores da colecta após a colheita poderá exibir o comportamento do nitrogênio, pois se houver entre ambos períodos uma redução, é indicativo de absorção. Mas se houver aumento na diferença, se estará a exibir-se uma fixação de nitrogênio.

4.3.1.1. Campo de algodão

No campo de algodão (**Figura 17**), antes da sementeira, a concentração de nitrogênio no solo variou de 2.584,5 kg/ha a 3.876,8 kg/ha. Após a colheita, os valores oscilaram entre 1.033,8 kg/ha e 2.584,5 kg/ha. Nesse contexto, é possível observar que em alguns casos, a diferença foi positiva, o que sugere que houve uma fixação de nitrogênio pelo algodão. Por exemplo, em

uma amostra, os níveis aumentaram em 258,5 kg/ha após a colheita. No entanto, em muitos casos, a diferença foi negativa, o que indica uma diminuição nos níveis de nitrogênio no solo após a colheita.

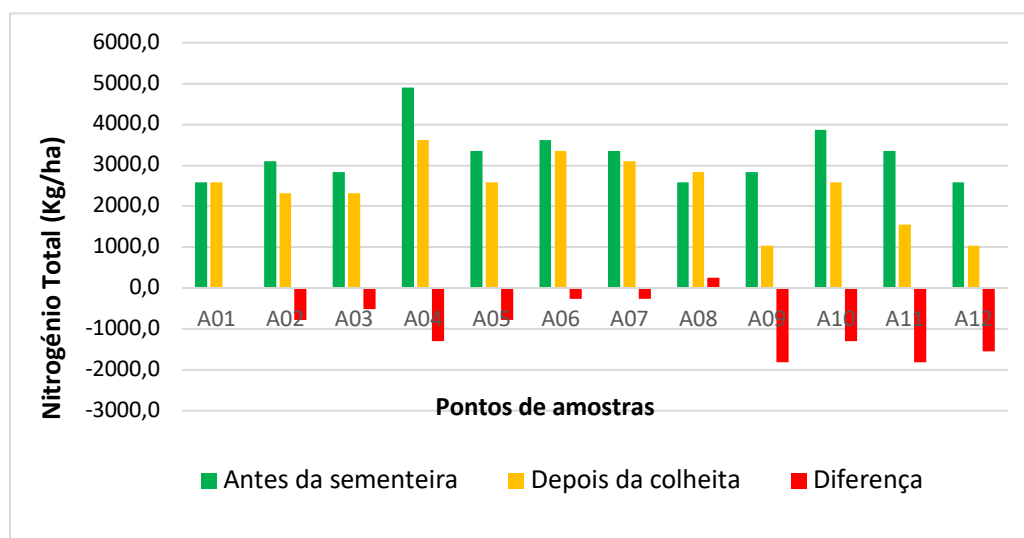


Figura 17. Variação do nitrogênio no campo de cultivo de Algodão.

4.3.1.2. Campo de milho

No caso do milho (**figura 18**), antes da sementeira, apresentou um valor de 1.233,6 kg/ha a 2.467,2 kg/ha de nitrogênio no solo. Após a colheita, esse valor passou a possuir de 1.233,6 kg/ha a 3.700,8 kg/ha, resultando em uma diferença de -740,2 kg/ha.

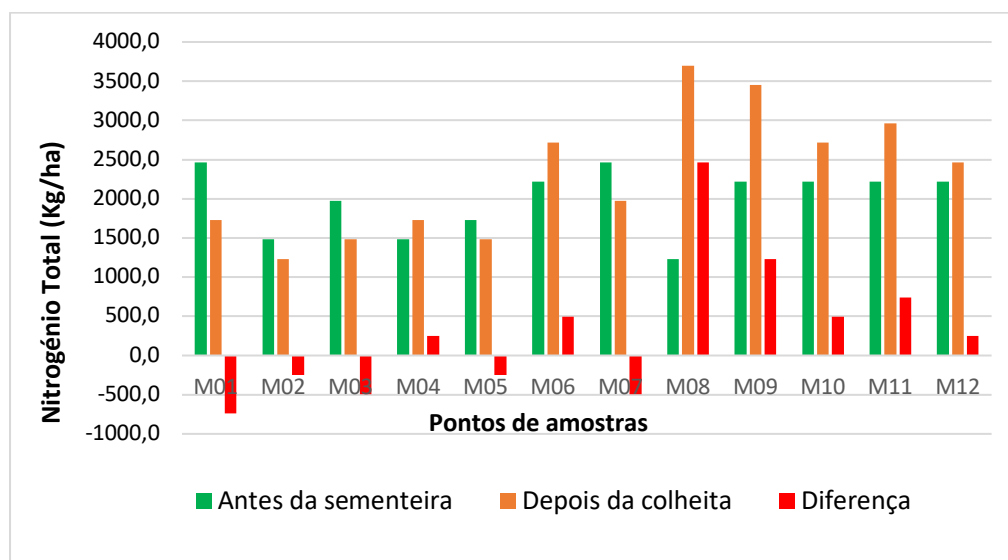


Figura 18. Variação do nitrogênio no campo de cultivo de Milho

A redução observada na quantidade de nitrogênio indica que o milho fixou uma quantidade significativa desse nutriente. A diferença negativa de -740,2 kg/ha sugere que o milho extraiu o nitrogênio do solo para atender às suas necessidades de crescimento e desenvolvimento. Essa

diferença representa uma redução nos níveis de nitrogênio no solo durante o ciclo de cultivo do milho.

4.3.1.3. Campo de soja

A análise do campo da soja (**figura 19**), antes da sementeira apresentou uma ampla variação nos níveis de nitrogênio no solo, variando de 1.372,6 kg/ha a 2.287,7 kg/ha.

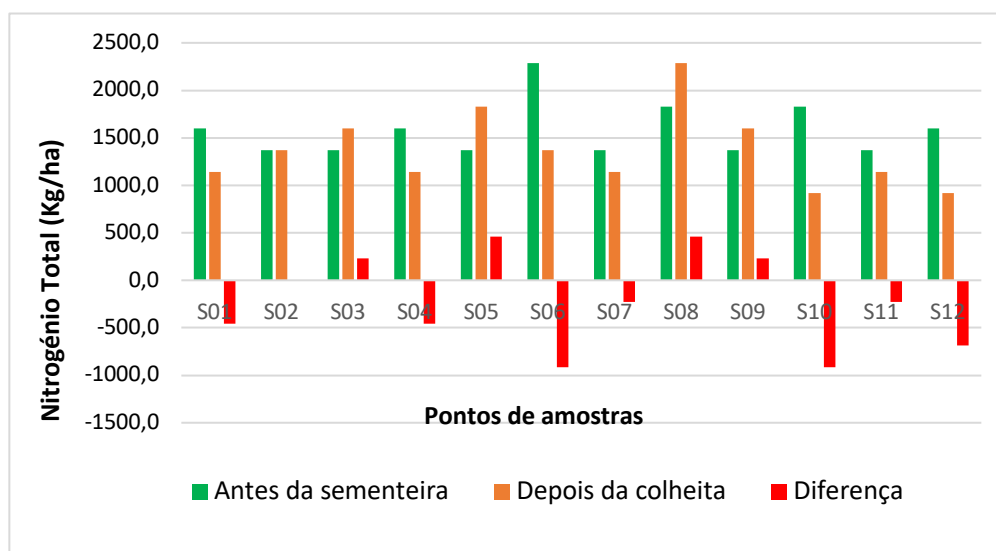


Figura 19. Variação do nitrogênio no campo de cultivo da Soja

Após a colheita, os valores se estenderam de 1.143,8 kg/ha a 1.830,1 kg/ha, indicando, em geral, uma redução de nitrogênio no solo, exceto por um caso de aumento notável. A análise das diferenças entre essas fases destacou a complexidade da dinâmica do nitrogênio, revelando tanto fixação significativa (457,5 kg/ha) como absorção expressiva (915,1 kg/ha) durante o ciclo da cultura de soja.

4.3.2. Distribuição espacial do N

4.3.2.1. Campo de Algodão

A **figura 20** ilustra um mapa da distribuição do teor de nitrogênio no solo durante duas fases temporais distintas: antes do plantio do e após a colheita. Essa representação oferece informações valiosas sobre as flutuações e mudanças nos níveis de nitrogênio no solo ao longo do ciclo de cultivo do algodão.

Na fase inicial, antes da sementeira do algodão, o mapa da distribuição de nitrogênio no solo revelou uma ampla faixa com valores variando de 2100,1 kg por hectare a 4908,65 kg por hectare. Notavelmente, a maior concentração de nitrogênio no solo foi observada no segmento noroeste do campo.

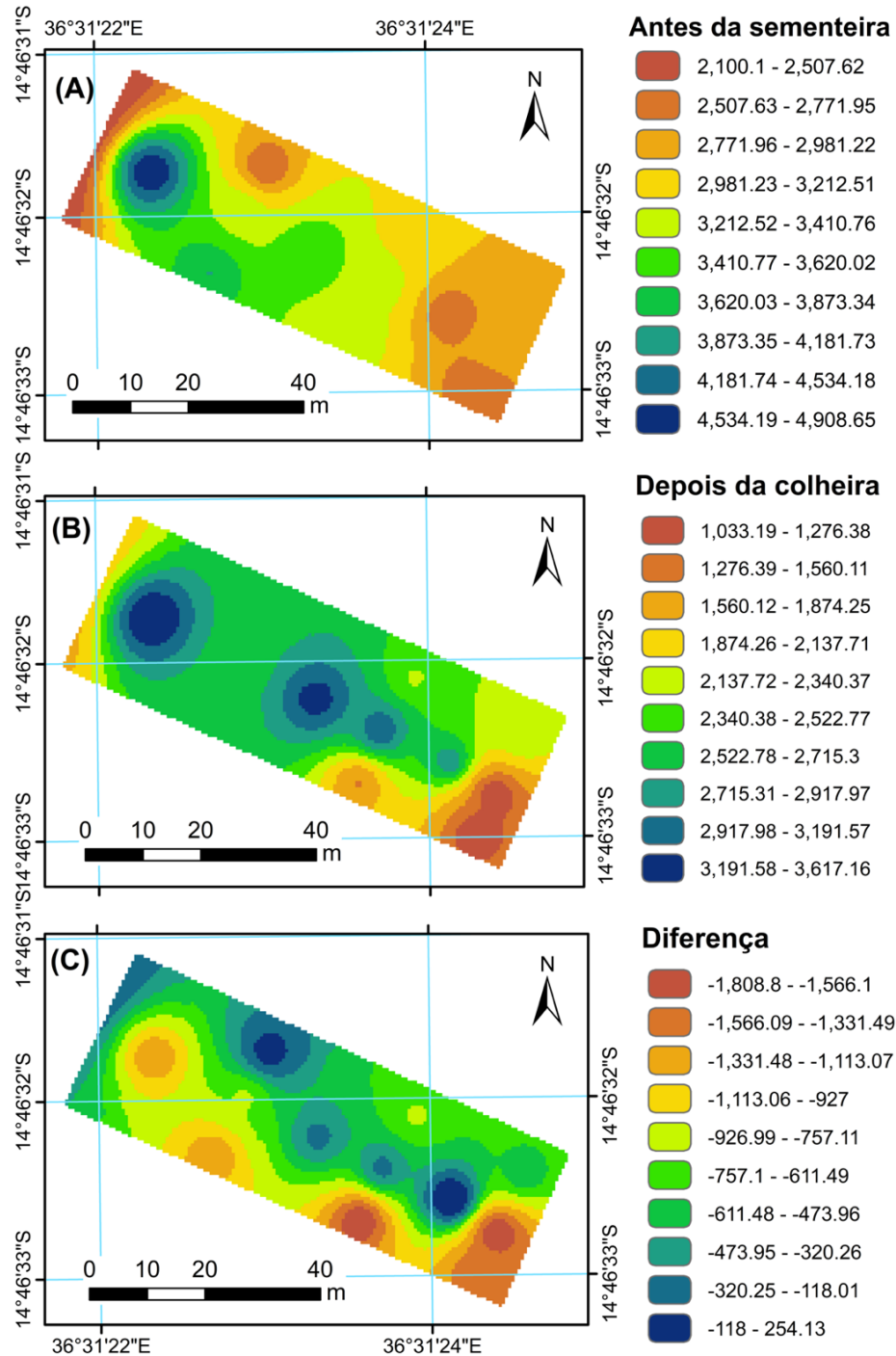


Figura 20. Distribuição espacial do Nitrogênio total no campo de algodão Antes da sementeira (A), depois da colheita (B) e a diferença entre o período antes da sementeira e depois da colheita (C).

Em contraste, as regiões sudoeste e sudeste apresentavam valores consideravelmente mais baixos, enfatizando a variabilidade na distribuição de nitrogênio no campo. Na área central, caracterizada por valores intermediários, foi registrada uma média de teor de nitrogênio de aproximadamente 3000 kg por hectare. Esses resultados mostram-se de grande importância, especialmente ao considerar as necessidades recomendadas de nitrogênio para a cultura do

algodão, que geralmente variam de 120 kg por hectare a 300 kg por hectare, conforme apoiado por (Ahmad & Hasanuzzaman, 2020, p. 82; N. Khan et al., 2019; Ma et al., 2019).

O solo em análise apresentou uma notável variabilidade nos níveis de nitrogênio no solo, abrangendo uma faixa que se estende de 2100,1 kg por hectare a 4908,65 kg por hectare. Levando em consideração as necessidades da cultura do algodão, que se situam entre 120 kg por hectare e 300 kg por hectare, é evidente que os níveis de nitrogênio disponíveis no solo superam substancialmente as demandas da cultura. Essa análise revela que, devido à quantidade de nitrogênio disponível ser significativamente superior à quantidade exigida pela cultura, o solo estava, de fato, em condições ideais para suprir todas as necessidades da cultura do algodão ao longo de seu ciclo de crescimento. Essa superabundância de nitrogênio disponível no solo fornece um ambiente propício para o desenvolvimento saudável e produtivo da cultura, demonstrando a capacidade do solo de sustentar a cultura de forma adequada durante todo o seu ciclo.

O período subsequente, após a colheita, apresenta uma notável diferença em relação às descobertas anteriores. Durante este período, o campo exibiu uma variabilidade de teor total de nitrogênio, variando entre 1033,19 kg por hectare e 3617,16 kg por hectare. Uma comparação minuciosa entre este período e o período anterior à sementeira revelou uma redução significativa no teor de nitrogênio no solo, com uma média de redução de 1000 kg por hectare. Essa queda acentuada está alinhada com pesquisas existentes que enfatizam a dinâmica distinta do nitrogênio em campos de culturas de algodão, já que este depende muito da absorção de em vez da fixação de nitrogênio (Ahmad & Hasanuzzaman, 2020, p. 19; Ali, 2015; Gerick et al., 1998). Consequentemente, a representação visual da diferença entre esses dois períodos ilustra claramente as reduções mais substanciais no teor de nitrogênio no solo, concentradas principalmente na região sudeste do campo, onde as reduções excedem 1800 kg por hectare, proporcionando uma imagem vívida da dinâmica do nitrogênio. Em contraste, as regiões norte e noroeste experimentaram reduções relativamente modestas, com valores abaixo de 500 kg por hectare.

O algodão, conhecido por sua alta demanda de nitrogênio, depende amplamente das reservas de nitrogênio no solo para sustentar seu crescimento e desenvolvimento (Ahmad & Hasanuzzaman, 2020; Gerick et al., 1998; A. N. Shah et al., 2022). As diferentes taxas nas quais as plantas de algodão assimilam o nitrogênio, influenciadas por fatores como o vigor do crescimento e as regiões específicas do campo, contribuem para os padrões distintos de depleção de nitrogênio (Gerick et al., 1998). Essas observações estão alinhadas com pesquisas

anteriores que destacam o processo complexo de absorção de nutrientes no solo em contextos agroecológicos diversos.

4.3.2.2. *Campo de milho*

No período antes da sementeira da cultura de milho, a análise do teor de nitrogênio no solo revelou uma notável diversidade nos valores obtidos. Essa variabilidade nos níveis de nitrogênio no solo é um reflexo da interação complexa de diversos fatores que desempenham um papel fundamental na determinação da fertilidade desse ambiente essencial para o crescimento das plantas. Dentro da área do campo de milho, foi observado um intervalo de valores que se estendiam de 1235,11 kg N/ha a 2466,02 kg N/ha. O teor mais elevado de nitrogênio, 2466,02 kg N/ha, foi notado na região noroeste do campo, enquanto a região com o menor valor de nitrogênio (1235,11 kg N/ha) pode ser identificada na porção Este do campo.

Essas variações realçam a variabilidade do teor de nitrogênio existente antes da sementeira. Na região central do campo, merece destaque a média registrada dos teores de nitrogênio, a qual atingiu o valor de 2118 kg N/ha. Os resultados estabelecidos fornecem dados que estão alinhados com a premissa de que o campo era adequado para o cultivo do milho. Isso se deve ao fato de que a quantidade de nitrogênio disponível antes da semeadura permitia o estabelecimento da cultura de milho. O milho possui uma demanda de nitrogênio que varia de 125 kg N/ha a 310 kg N/ha (Osterholz, Rinot, Liebman, & Castellano, 2017; Ricardo Carvalho et al., 2016).

No período após a colheita do milho, observou-se uma diferença notável em comparação com o início, como também evidenciado na **figura 18**. Essa diferença é particularmente marcante, uma vez que o campo passou a exibir uma ampla variação nos teores totais de nitrogênio, que variam entre 1233,07 kg N/ha e 3696,56 kg N/ha. Isso revela um aumento significativo no teor de nitrogênio no solo, com uma média de 2000 kg N/ha. O aumento do teor de nitrogênio no campo de milho após a colheita pode ser atribuído a várias causas potenciais, muitas vezes sendo o resultado de uma combinação de fatores. Alguns desses fatores incluem a decomposição dos restos da cultura de milho ou de outras culturas anteriores que permaneceram no campo (Delgado-Baquerizo, García-Palacios, Milla, Gallardo, & Maestre, 2015).

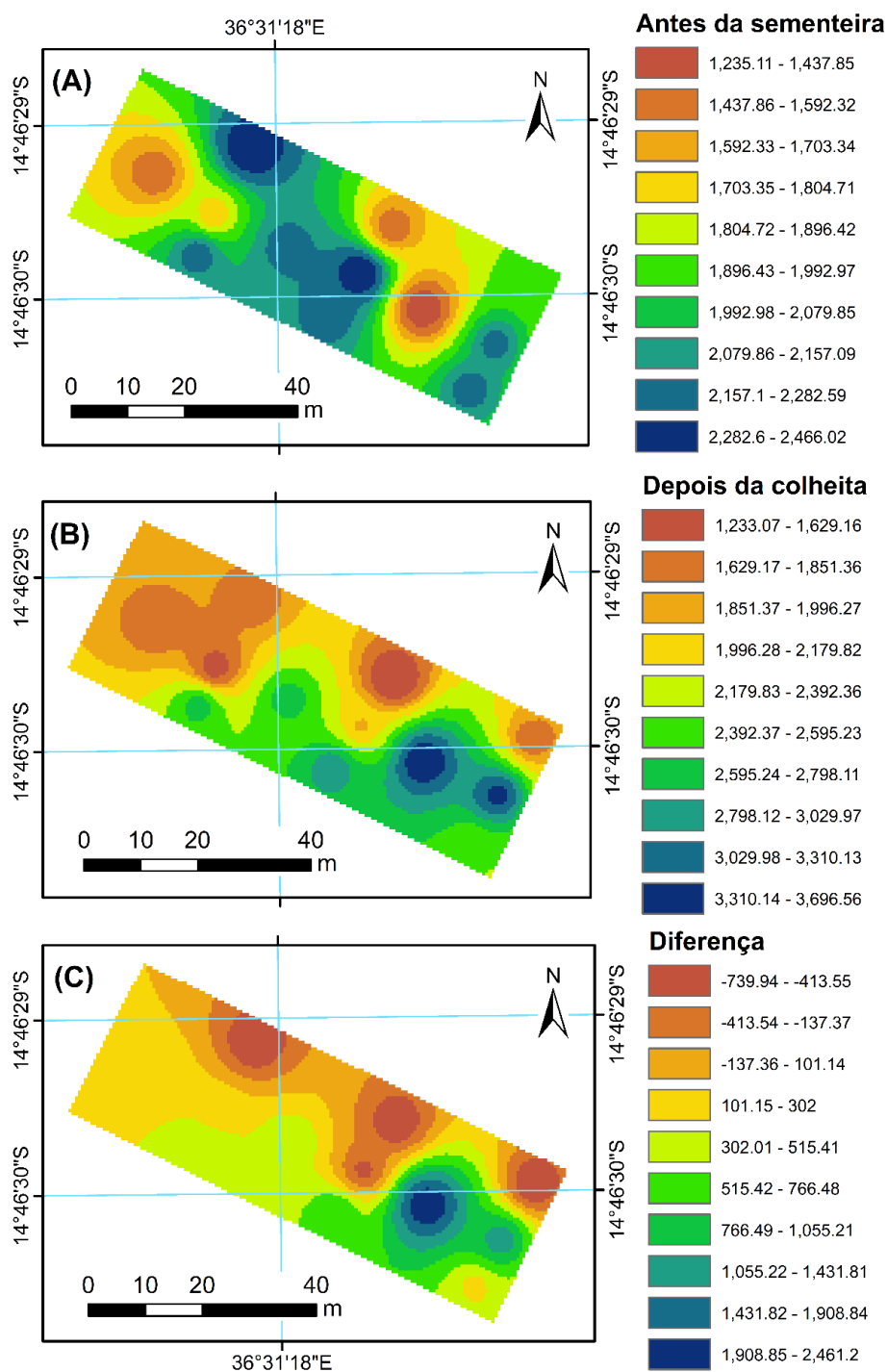


Figura 21. Distribuição espacial do Nitrogénio total no campo de milho
Antes da sementeira (A), depois da colheita (B) e a diferença entre o período antes da sementeira e depois da colheita (C).

Além disso, é possível que o solo contenha bactérias denitrificantes, que são capazes de transformar compostos nitrogenados em formas gasosas, resultando na liberação de nitrogênio para as plantas (Bloch, Clark, Gottlieb, Wood, et al., 2020; Sheoran, Kumar, Kumar, Meena, & Rakshit, 2021).

Consequentemente, a representação visual da diferença entre esses dois períodos temporais ilustra claramente os aumentos mais substanciais no teor de nitrogênio no solo, concentradas principalmente na região sudeste do campo, onde as reduções excedem 1900 kg por hectare, proporcionando uma imagem vívida da dinâmica do nitrogênio. Em contraste, as regiões norte e noroeste experimentaram aumentos relativamente modestos, com valores abaixo de 300 kg por hectare.

4.3.2.3. *Campo de soja*

No período antes da sementeira, a análise do teor de nitrogênio no solo revelou uma notável diversidade nos valores. Dentro da área do campo de soja, foi observada uma faixa de valores que variou de 1372.02 kg N/ha a 2266.78 kg de nitrogênio por hectare. Essa amplitude de valores é particularmente evidente nas extremidades do intervalo em que o teor mais alto de nitrogênio de 2266.78 kg N/ha, foi observado na região central do campo, enquanto a região com o menor valor de nitrogênio pode ser identificada na porção nordeste a sudeste em linha vertical desde a bordadura norte a até a bordadura sul.

Essas variações notáveis nos teores de nitrogênio ressaltam a diversidade do teor de nitrogênio existente antes da sementeira. A região central do campo registrou teores de nitrogênio médios de 1700 kg N/ha. Os resultados estabelecidos fornecem dados que corroboram a suposição de que o campo era adequado para o cultivo da soja, pois a quantidade de nitrogênio disponível antes da sementeira estava de acordo com aquela recomendada por Bagale, (2021); Ohyama & Sueyoshi, (2010) que varia de 80 kg N/ha 120 kg N/ha, pois também é auxiliada pela fixação biológica de nitrogênio. No período após a colheita do milho, observou-se uma diferença em relação ao período antes da sementeira. O campo passou a exibir uma ampla variação nos teores totais de nitrogênio, que variam de 915.19 kg N/ha a 2284.9 kg N/ha. Isso demonstra uma redução significativa no teor de nitrogênio no solo, enquanto se esperava que esta crescesse por intermedio da fixação biológica de nitrogênio.

Ao analisar a diferença entre os dois períodos para compreender a quantidade de nitrogênio fixado no campo, observou-se uma situação inesperada. Foi constatado que apenas na região sudoeste do campo houve uma fixação significativa de nitrogênio, variando de 663,69 kgN/há a 914,78 kg N/ha, indicando um fenômeno de fixação que merece atenção. Por outro lado, as regiões sudeste e nordeste apresentaram valores que não ultrapassaram 118,43 kg N/ha, sugerindo uma fixação mínima nessas áreas. Além disso, as demais regiões do campo registraram valores negativos, inferiores a 3,64, indicando um cenário de absorção de nitrogênio nessas áreas.

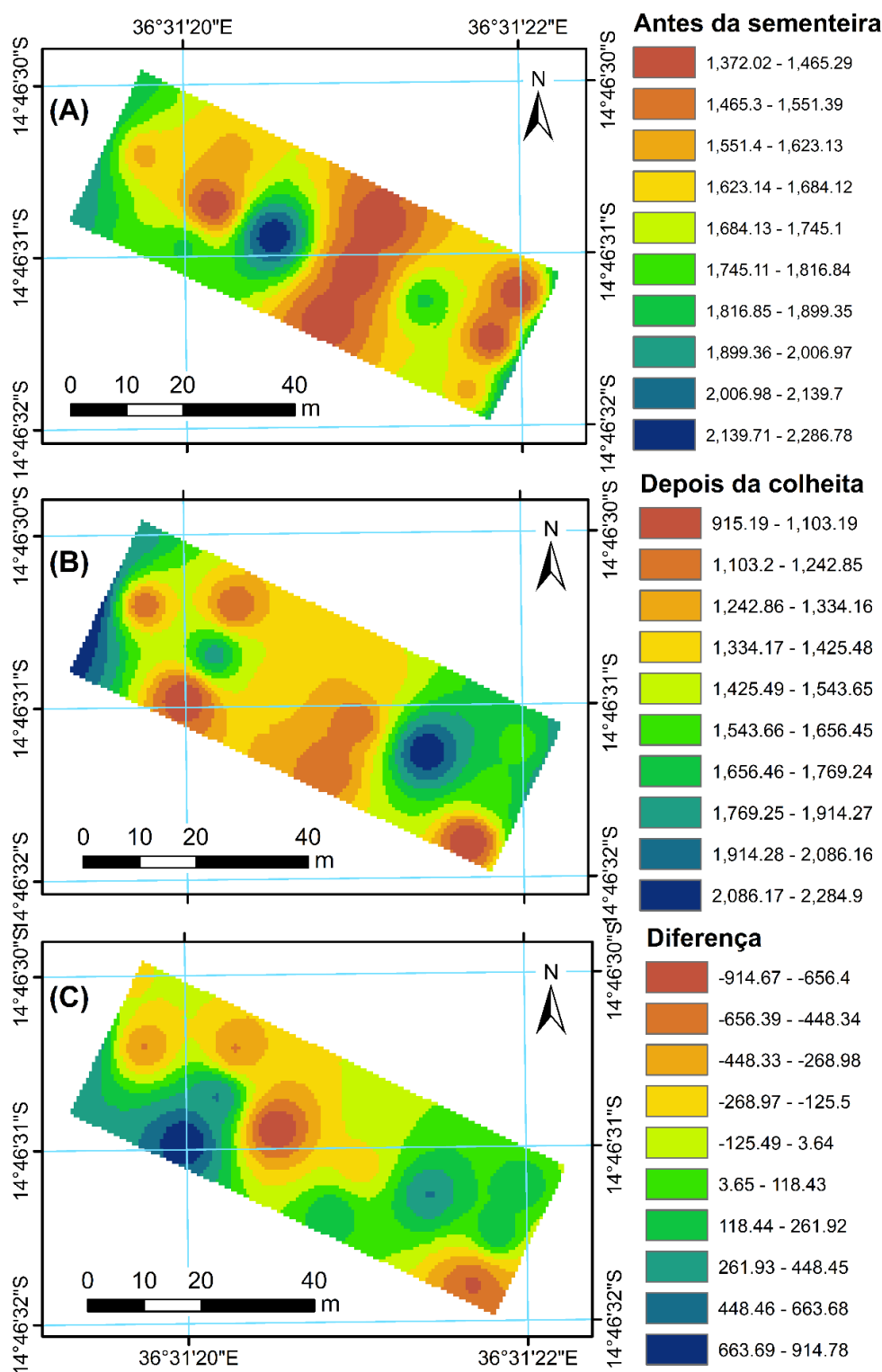


Figura 22. Distribuição espacial do Nitrogênio total no campo de Soja
Antes da semeadura (A), depois da colheita (B) e a diferença entre o período antes da semeadura e depois da colheita (C).

Esse padrão inusitado revela uma distribuição desigual do processo de fixação de nitrogênio no campo, com o Sudoeste se destacando como a região com a fixação mais expressiva, enquanto o sudeste e o nordeste apresentam valores moderados e as demais regiões demonstram uma ausência de fixação, possivelmente devido a condições desfavoráveis ou outras variáveis

ambientais específicas. Diversos autores sustentam que a não fixação de nitrogênio no solo pela soja pode ser causada por fatores como: estirpes incompatíveis de bactérias fixadoras pois se estabelece que a fixação biológica de nitrogênio é uma simbiose entre a soja e bactérias do gênero *Rhizobium* e se as estirpes de bactérias presentes no solo não forem compatíveis com a variedade de soja plantada, a fixação de nitrogênio pode ser comprometida, e isso ocorre porque a planta não é capaz de estabelecer uma relação simbiótica eficiente com as bactérias, resultando na não fixação de nitrogênio (Bohrer & Hungria, 1998; Hungria & Nogueira, 2022; Junior & Reis, 2008).

A carência dessas bactérias, em alguns casos o solo pode não conter uma quantidade adequada de bactérias fixadoras de nitrogênio, e isso pode ser causado por práticas agrícolas passadas, como a ausência de cultivos de leguminosas, que são cruciais para manter populações saudáveis de bactérias fixadoras de nitrogênio no solo (Hungria & Nogueira, 2022); competição com nitrato, a soja pode não fixar nitrogênio quando há uma disponibilidade abundante de nitrato no solo. nesse caso, a planta pode preferir a absorção de nitrato em vez de investir energia na fixação de nitrogênio (Latimore, Giddens, & Ashley, 1977; Salvagiotti et al., 2009; Takuji et al., 2011); acidez do solo, bactérias fixadoras de nitrogênio são sensíveis à acidez do solo. Solos ácidos prejudicam a atividade dessas bactérias, reduzindo a capacidade de fixação de nitrogênio da planta (Bakari, Mungai, Thuita, & Masso, 2020; Coskan & Dogan, 2011; Ferreira et al., 2016); estresse ambiental, em situações de estresse, a soja pode reduzir sua fixação de nitrogênio para direcionar recursos para sua sobrevivência e crescimento básico (Coskan & Dogan, 2011; Freitas, Cerezini, Hungria, & Nogueira, 2022; Khosro Mohammadi, 2012); e escolha inadequada de variedades de soja (Okereke & Unaegbu, 1992; Zimmer et al., 2016)

4.4. Relação entre a população final de plantas e a quantidade de absorção ou fixação de Nitrogênio

□ Cultura do algodão

Vários estudos destacam a importância da densidade populacional de plantas de algodão na absorção de nitrogênio (N) do solo. Um exemplo notável é o estudo que revela que uma população de 52.500 plantas de algodão, com uma densidade de 5,25 plantas por metro quadrado, é capaz de absorver aproximadamente 1.800 kg de nitrogênio ao longo do ciclo de crescimento. Essa relação entre a densidade populacional e a absorção de nitrogênio desempenha um papel crítico na otimização do manejo de nutrientes em culturas agrícolas (P. Li et al., 2017; S. Wang et al., 2021).

Ao analisar-se os resultados da última contagem de plantas registrada na Tabela 3, onde se constatou a presença de 43.167,3 plantas de algodão, e ao considerar a discrepância entre os valores do mapeamento do solo antes da sementeira e após a colheita (**Figura 20a e 20c**), observamos variações que se estendem desde -118 kg N/ha até -1.808,8 kg N/ha. Isso indica uma diferença média de -963,4 kg N/ha em relação ao valor inicial, que variava de 2.100,1 kg N/ha a 3.212,51 kg N/ha, com uma média de 2.656,3 kg N/ha.

Esses resultados apontam para uma média de absorção de nitrogénio de 1.692,29 kg N/ha por parte da cultura do algodão. Ao se comparar esse valor com as estimativas dos autores mencionados anteriormente, observamos uma diferença de cerca de 5% em relação à média de 1.800 kg N/ha que eles propuseram para a população de 52.500 plantas.

□ **Cultura do milho**

É amplamente reconhecido que o milho é uma cultura que demanda um suprimento significativo de nitrogénio para atingir seu pleno potencial de crescimento e produção. Estudos como os conduzidos por Osterholz et al., (2017) & Ricardo Carvalho et al. (2016), documentaram uma ampla variação na demanda de nitrogénio do milho, geralmente situando-se entre 125 kg N/ha a 310 kg N/ha. Em concordância com essas referências, um estudo anterior realizado por Fallah & Tadayyon (2010) demonstrou que uma densidade populacional de 138.900 plantas de milho por hectare requer um suprimento de nitrogénio na ordem de 248 kg N/ha.

A análise dos resultados da última contagem de plantas, conforme registrados na Tabela 3, onde se observou a presença de 19.268,1 plantas de milho, e a consideração da discrepância entre os valores do mapeamento do solo antes da semeadura e após a colheita (**Figura 21a e 21c**), revelam variações que abrangem desde -137 kg N/ha até -739,84 kg N/ha. Isso indica uma diferença média de -438,4 kg N/ha em relação ao valor inicial, que variava de 1.235,11 kg N/ha a 1.804,7 kg N/ha, com uma média de 1.519,9 kg N/ha.

Esses resultados apontam para uma média de absorção de nitrogénio de 1.081,5 kg N/ha pela cultura do milho. No entanto, ao comparar-se esse valor com as estimativas dos autores mencionados anteriormente, observa-se uma diferença considerável em relação às médias previamente citadas, mas ao comparar-se com a demanda média estimada por planta de 217,5, esta absorção é relativamente normal.

□ **Cultura da soja**

Sabe-se que a soja requer um suprimento de nitrogênio que varia entre 80 kg N/ha e 130 kg N/ha para completar seu ciclo individualmente (Bagale, 2021; Ohyama & Sueyoshi, 2010), como evidenciado pela média de 130 kg N/ha encontrada por alguns autores (Ciampitti et al., 2021). Em termos de fixação afirma-se que a cultura da soja realiza uma fixação média de 38 kg N/ha a 126 kg N/ha (Sanginga, Dashiell, Okogun, & Thottappilly, 1997), em que ainda o mesmo autor reportou ter obtido 84 kg N/ha e 91 kg N/ha em diferentes variedades.

Na última contagem, o número total de plantas de soja foi registrado em 36.864,6, conforme mostrado na Tabela 3. A análise da **Figura 22a** e **Figura 22c** revela uma faixa de fixação de nitrogênio de 3.65 kg N/ha a 914.78 kg N/ha, com uma média de 459.215 kg N/ha fixados ao longo do ciclo da cultura.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E INOVAÇÕES

5.1. Conclusões

A análise abrangente das características das sementes de algodão, soja e milho revelou nuances importantes. As sementes de algodão, apesar de alta pureza física, apresentaram baixa capacidade de germinação, indicando possíveis desafios de viabilidade. Já as sementes de soja, especialmente da variedade San-Beib, destacaram-se pela alta capacidade, velocidade e energia de germinação, sugerindo um potencial promissor para o cultivo. Quanto ao milho, a variedade Local superou as certificadas em diversos aspectos, como capacidade de germinação, pureza física e tempo médio de germinação, enfatizando a importância de considerar fatores além da taxa de germinação na escolha das variedades.

A dinâmica da população de plantas ao longo do ciclo de crescimento evidenciou desafios iniciais relacionados à qualidade das sementes, condições climáticas adversas e características do solo. A implementação de uma ressementeira corrigiu a baixa germinação inicial, resultando em um aumento nas populações, mas fatores como chuvas intensas e pragas impactaram negativamente próximo à colheita. O controle orgânico de pragas mostrou eficácia, embora algumas persistissem, especialmente no campo de algodão.

A análise da dinâmica de nitrogênio nos campos de algodão, milho e soja revelou padrões distintos. O algodão mostrou condições ideais antes do plantio, mas experimentou uma queda notável após a colheita, especialmente no sudeste. O milho apresentou níveis adequados pré-plantio, com um aumento pós-colheita indicando possível contribuição da decomposição de resíduos. Já na soja, a variabilidade inicial de nitrogênio refletiu condições favoráveis, mas após a colheita, apenas o sudoeste mostrou fixação significativa, atribuída a vários fatores, incluindo falta de bactérias fixadoras e competição com nitrato.

Em relação à absorção de nitrogênio, a cultura do algodão demonstrou eficiência, absorvendo uma média de 1.692,29 kg N/ha, embora ligeiramente abaixo de estimativas anteriores. No milho, a absorção média foi de 1.081,5 kg N/ha, eficaz em relação à demanda média estimada por planta. Já a cultura da soja fixou, em média, 459,215 kg N/ha ao longo do ciclo.

5.2. Recomendações

Com base nas observações tiradas deste estudo, recomenda-se o seguinte:

- Embora este estudo tenha quantificado a distribuição espacial da fixação de nitrogênio no solo, recomenda-se a continuação do estudo, incorporando elementos adicionais que aprimorem a compreensão do processo de fixação de nitrogênio na cultura de soja. Em futuros estudos, aspectos como a amostragem e análise dos nódulos de fixação nas raízes da soja, a fim de determinar se a relação simbiótica essencial para a fixação biológica está ocorrendo efetivamente, são recomendados.
- Além disso, seria valioso investigar a microbiologia do solo para identificar a presença de microorganismos que desempenham um papel na fixação de nitrogênio. Se esses microorganismos estiverem ausentes, pode ser considerada a possibilidade de uma incorporação controlada para otimizar o processo de fixação.
- Recomenda-se também que futuras pesquisas aprofundem a compreensão da relação de fixação de nitrogênio em diversas populações de plantas de soja, uma vez que os recursos e materiais disponíveis para essa análise são atualmente limitados. Isso permitiria uma investigação mais abrangente e precisa dos fatores que influenciam a fixação de nitrogênio e seu potencial impacto na gestão de nutrientes nas culturas.
- Apesar de nosso estudo não ter quantificado a quantidade de nitrogênio que a cultura da soja pode fixar, pelas razões indicadas nas seções anteriores, recomenda-se, no entanto, que a rotação de culturas, como o algodão e o milho, continue sendo praticada, uma vez que estudos anteriores demonstram as vantagens do uso desta prática agrícola.

5.3. Inovações para a comunidade local

O estudo sobre a quantificação da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogênio (N₂) em solos com culturas diversas representa uma valiosa contribuição para o avanço da agricultura sustentável. À medida que exploramos os resultados e *insights* obtidos, identificamos várias áreas de inovação e oportunidades com o potencial de revolucionar a maneira como aborda-se a gestão de nutrientes nas culturas. Muitas vezes recomenda-se a implementação de rotações de culturas em solos onde são cultivadas culturas com alta demanda nutricional.

Embora as rotações sejam uma prática bem estabelecida na agricultura, muitas vezes a determinação do período ideal para essas rotações pode ser imprecisa. Este estudo, com base em dados detalhados, pretendia oferecer uma estimativa precisa do período de rotação. Sendo

esta uma inovação, essa estimativa é uma ferramenta valiosa que auxilia os agricultores na prevenção do esgotamento do solo e na manutenção de sua fertilidade ao longo do tempo. Além disso, essas inovações podem desempenhar um papel significativo na promoção da sustentabilidade agrícola. Algumas das perspectivas incluem:

- Mapeamento preciso da distribuição de fixação de Nitrogênio: este estudo forneceu uma análise detalhada e precisa da distribuição espacial da fixação de nitrogênio no solo em áreas com diferentes culturas. Isso representa uma inovação, uma vez que esse nível de detalhes pode ser crucial para a otimização da gestão de nutrientes nas culturas, especialmente para as comunidades locais onde o custo de insumos é alto.
- Compreensão aprofundada da sustentabilidade agrícola: Esse estudo contribui para uma compreensão mais profunda da fixação de nitrogênio e sua relação com a sustentabilidade agrícola. Isso é uma inovação, uma vez que ajuda a identificar maneiras de promover a eficiência do uso de nitrogênio e reduzir o impacto ambiental da agricultura.
- Promoção de práticas de agricultura sustentável: Ao quantificar a fixação ou absorção de nitrogênio em diferentes culturas, este estudo visa incentivar a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. Isso representa uma inovação que pode beneficiar tanto os agricultores quanto o meio ambiente.
- Potencial para Personalização da gestão de Nutrientes: Este estudo abre caminho para a personalização da gestão de nutrientes com base na fixação de nitrogênio em áreas específicas do campo. Isso é inovador a nível local, pois pode resultar em uma aplicação mais eficaz de fertilizantes e, assim, economizar recursos e reduzir custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel Rahman, M. A. E., Zakarya, Y. M., Metwaly, M. M., & Koubouris, G. (2021). Deciphering soil spatial variability through geostatistics and interpolation techniques. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010194>
- Ackerson, J. (2018). *Soil Sampling Guidelines*.
- Adusei, S., & Azupio, S. (2022). Neem: A Novel Biocide for Pest and Disease Control of Plants. *Journal of Chemistry*, Vol. 2022. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2022/6778554>
- Ahmad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). Cotton production and uses: Agronomy, crop protection, and postharvest technologies. Em *Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2>
- Aisyah, R. S., Anggraini, S., Adiesty, Z., Tanjung, I. F., & Ramadhani, F. (2023). Effectiveness of Garlic Extract Pesticide (*Allium sativum*) Against Leaf Films in Saws (*Brassica juncea*). *Jurnal Biologi Tropis*, 23(1). <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i1.4612>
- Akanmu, A. O., Akol, A. M., Ndolo, D. O., Kutu, F. R., & Babalola, O. O. (2023). Agroecological techniques: adoption of safe and sustainable agricultural practices among the smallholder farmers in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Vol. 7. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1143061>
- Ali, N. (2015). Review: Nitrogen Utilization Features in Cotton Crop. *American Journal of Plant Sciences*, 06(07), 987–1002. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.67105>
- Alves, B. J. R., Baêta, A. M., & Alves, J. V. (1999). *Protocolo da Embrapa Agrobiologia para Análise de Nitrogênio em Adubos Orgânicos, Solo e Tecidos*. Seropédica.
- Amir, J. (1996). Impact of Crop Rotation and Land Management on Soil Erosion and Rehabilitation. Em M. Agassi (Ed.), *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation* (pp. 375–392). New York: Marcel Dekker. In.
- Anderson, E. J., Ali, M. L., Beavis, W. D., Chen, P., Clemente, T. E., Diers, B. W., ... (2019). Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] Breeding: History, Improvement, Production and Future Opportunities. Em J. M. Al Khayri, S. M. Jainn, & D. V Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes* (Vol. 7, pp. 431–495). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3>
- Anwar, A., Gould, E., Tinson, R., Groom, M., & Hamilton, C. J. (2017, Março 1). Think yellow and keep green—role of sulfanes from garlic in agriculture. *Antioxidants*, Vol. 6. MDPI. <https://doi.org/10.3390/antiox6010003>
- Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(1), 41–59. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Auerswald, K., Kainz, M., & Fiener, P. (2004). Soil erosion potential of organic versus conventional farming evaluated by USLE modelling of cropping statistics for agricultural districts in Bavaria. *Soil Use and Management*, 19(4), 305–311. <https://doi.org/10.1079/sum2003212>
- Australian Government. (2008). *The Biology of Zea mays L. ssp mays (maize or corn)*. Obtido de https://www.ogtr.gov.au/sites/default/files/files/2021-07/the_biology_of_zea_mays_l_ssp_mays_maize_or_corn.pdf
- Bagale, S. (2021). Nutrient Management for Soybean Crops. *International Journal of Agronomy*, Vol. 2021. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/3304634>
- Bakari, R., Mungai, N., Thuita, M., & Masso, C. (2020). Impact of soil acidity and liming on soybean (*Glycine max*) nodulation and nitrogen fixation in Kenyan soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 70(8), 667–678. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1833976>

- Baldani, J. I., & Baldani, V. L. D. (2005). *History on the biological nitrogen fixation research in graminaceous plants: special emphasis on the Brazilian experience*. 77(3), 549–579. Obtido de www.scielo.br/aabc
- Barros, V. D. C., Lira Junior, M. A., Fracetto, F. J. C., Fracetto, G. G. M., Ferreira, J. da S., de Barros, D. J., & da Silva Júnior, A. F. (2020). Effects of different legume green manures on tropical soil microbiology after corn harvest. *Bragantia*, 79(4). <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200262>
- Basnet, S., Wood, A., Röö, E., Jansson, T., Fetzer, I., & Gordon, L. (2023). Organic agriculture in a low-emission world: exploring combined measures to deliver sustainable food system in Sweden. *Sustainability Science*, 18(1), 501–519. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01279-9>
- Beckers, V., Poelmans, L., Van Rompaey, A., & Dendoncker, N. (2020). The impact of urbanization on agricultural dynamics: a case study in Belgium. *Journal of Land Use Science*, 15(5), 626–643. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1769211>
- Bernhard, A. (2010). The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact. Obtido 15 de Outubro de 2023, de Nature Education Knowledge website: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-nitrogen-cycle-processes-players-and-human-15644632/>
- Bhunja, G. S., Shit, P. K., & Maiti, R. (2018). Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2). <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001>
- Binotto Fagan, E., P Medeiros, S. L., Manfron, P. A., & Casaroli, D. (2007). Fisiologia da Fixação Biológica de Nitrogênio em Soja-Revisão Physiology of Biologic Fixation Nitrogen in Soybean-A Review. *Revista da FZVA*, 14(1), 89–106.
- Bishaw, Z., Struik, P. C., & Van Gastel, A. J. G. (2012). Farmers' Seed Sources and Seed Quality: 1. Physical and Physiological Quality. *Journal of Crop Improvement*, 26(5), 655–692. <https://doi.org/10.1080/15427528.2012.670695>
- Biswas, R. N., Islam, M. N., Mia, M. J., & Islam, M. N. (2020). Modeling on the spatial vulnerability of lightning disaster in Bangladesh using GIS and IDW techniques. *Spatial Information Research*, Vol. 28. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00311-y>
- Blair, B. (2001). Effect of soil nutrient heterogeneity on the symmetry of belowground competition. *Plant Ecology*, 156(2). <https://doi.org/10.1023/A:1012664431933>
- Blanco, I., Diego, I., Bueno, P., Fernández, E., Casas-Maldonado, F., Esquinas, C., ... Miravittles, M. (2019). Geographic distribution of chronic obstructive pulmonary disease prevalence in Africa, Asia and Australasia. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 23(10). <https://doi.org/10.5588/ijtld.19.0015>
- Bleasdale, J. K. A., & Nelder, J. A. (1960). Plant Population and Crop Yield. *Nature*, 188(4747), 342–342. <https://doi.org/10.1038/188342a0>
- Bloch, S. E., Clark, R., Gottlieb, S. S., Kent Wood, L., Shah, N., Mak, S. M., ... Temme, K. (2020). Biological nitrogen fixation in maize: Optimizing nitrogenase expression in a root-associated diazotroph. *Journal of Experimental Botany*, 71(15), 4591–4603. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa176>
- Bloch, S. E., Clark, R., Gottlieb, S. S., Wood, L. K., Shah, N., Mak, S.-M., ... Temme, K. (2020). Biological nitrogen fixation in maize: optimizing nitrogenase expression in a root-associated diazotroph. *Journal of Experimental Botany*, 71(15), 4591–4603. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa176>
- Bloch, S. E., Ryu, M. H., Ozaydin, B., & Broglie, R. (2020). Harnessing atmospheric nitrogen for cereal crop production. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 62. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.024>

- Boeke, S. J., Boersma, M. G., Alink, G. M., Van Loon, J. J. A., Van Huis, A., Dicke, M., & Rietjens, I. M. C. M. (2004, Setembro). Safety evaluation of neem (*Azadirachta indica*) derived pesticides. *Journal of Ethnopharmacology*, Vol. 94, pp. 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2004.05.011>
- Boerema, A., Peeters, A., Swolfs, S., Vandevenne, F., Jacobs, S., Staes, J., & Meire, P. (2016). Soybean trade: Balancing environmental and socio-economic impacts of an intercontinental market. *PLoS ONE*, 11(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155222>
- Bofana, J. do R., & Costa, A. C. (2017). Comparison of spatial interpolators for variability analysis of soil chemical properties in Cuamba (Mozambique). *African Journal of Agricultural Research*, 12(25), 2153–2162. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12415>
- Bogunovic, I., Mesic, M., Zgorelec, Z., Jurisic, A., & Bilandzija, D. (2014). Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil and Tillage Research*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.020>
- Bohrer, T. R. J., & Hungria, M. (1998). Avaliação de cultivares de soja quanto à fixação biológica do nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 33(6). Obtido de <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4921>
- Borah, T. R., & Kumar, A. (2012). *Maize-its versatile uses in Sikkim Comparative evaluation of different farming system models suitable for small and marginal farmers View project*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/224771769>
- Borba, A., Reyna-Llorens, L., Dickinson, P., Steed, G., Gouveia, P., Górski, A., ... Hibberd JM. (2023). *Compartmentation of photosynthesis gene expression*.
- Boucharlat, R. (2018). Javier Álvarez-Mon, “The Introduction of Cotton into The Near East: A View from Elam”. *Abstracta Iranica*, (Volume 37-38-39). <https://doi.org/10.4000/abstractairanica.45351>
- Brasil, E. C., Cravo, M. da S., & Veloso, C. A. C. (2020). *Amostragem do solo*. Obtido de <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218392/1/LV-RecomendacaoSolo-2020-49-56.pdf>
- Bremner, J. M. (1996). *Total Nitrogen*. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Busch, A. K., Douglas, M. R., Malcolm, G. M., Karsten, H. D., & Tooker, J. F. (2020). A high-diversity/IPM cropping system fosters beneficial arthropod populations, limits invertebrate pests, and produces competitive maize yields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106812>
- Cabalar, A. F., Karabas, B., Mahmutluoglu, B., & Yildiz, O. (2021). An IDW-based GIS application for assessment of geotechnical characterization in Erzincan, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(20). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08481-6>
- Çakmakçı, R., Salık, M. A., & Çakmakçı, S. (2023, Maio 1). Assessment and Principles of Environmentally Sustainable Food and Agriculture Systems. *Agriculture (Switzerland)*, Vol. 13. MDPI. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051073>
- Carnicer, S., Romero, A. M. E., & Rojas, J. (2022). Muestreo de suelo para análisis biológicos. Em C. E. Sotelo, M. Porta, C. M. Hack, & M. E. Castelán (Eds.), *Metodologías microbiológicas de indicadores ambientales de suelo*. : Editorial de la Universidad Nacional del Nordeste EUDENE ; Instituto Agrotécnico Pedro M. Fuentes Godo., Obtido de www.eudene.unne.edu.ar
- Carretero, R., Marasas, P. A., Souza, E., & Rocha, A. (2016). Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. *Archivo agronómico*. Obtido de [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A440303257F880046ABB5/\\$FILE/AA%2015.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/7712B35AB30A440303257F880046ABB5/$FILE/AA%2015.pdf)
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2006). *Soil Sampling and Methods of analysis*.
- Carter, T. E., Nelson, R. L., & Sneller, C. H. (2004). 8 *Genetic Diversity in Soybean 8-1 A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR GENETIC DIVERSITY*.

- Catani, R. A., Gallo, J. R., Gargantini, H., & Conagin, A. (1955). Amostragem de solo para estudos de fertilidade. *Bragantia*, 14(unico). <https://doi.org/10.1590/s0006-87051955000100003>
- Chaudhary, P. (2022, Outubro 26). Kjeldahl Method: Procedure, Formula and Advantages. Obtido 21 de Outubro de 2023, de https://chemistnotes.com/analytical_chemistry/kjeldahl-method-procedure-formula-and-advantages/#Published_by_Pratiksha_Chaudhary
- Chekwa, I., Ndubuisi, U., & Maxwell, N. B. (2010). Comparative Studies On Effects Of Garlic (*Allium Sativum*) And Ginger (*Zingiber Officinale*) Extracts On Cowpea Insects Pest Attack. Em *World Rural Observations* (Vol. 2010). Obtido de <http://www.sciencepub.net/rural>
- Chen, B., Liu, E., Tian, Q., Yan, C., & Zhang, Y. (2014). Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 34, pp. 429–442. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0207-8>
- Chen, F. W., & Liu, C. W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10(3), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>
- Cheng, J. liang, Shi, Z., & Zhu, Y. wei. (2007). Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(1). [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60008-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60008-4)
- Choi, G. H., Kim, L., Lee, D. Y., Jin, C. L., Lim, S. J., Park, B. J., ... Kim, J. H. (2016). Quantitative analyses of ricinoleic acid and ricinine in ricinus communis extracts and its biopesticides. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 59(2), 165–169. <https://doi.org/10.3839/jabc.2016.030>
- Ciampitti, I. A., Camberato, J. J., Murrell, S. T., & Vyn, T. J. (2013). Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Agronomy Journal*, 105(3), 783–795. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0467>
- Ciampitti, I. A., de Borja Reis, A. F., Córdova, S. C., Castellano, M. J., Archontoulis, S. V., Correndo, A. A., ... Moro Rosso, L. H. (2021). Revisiting Biological Nitrogen Fixation Dynamics in Soybeans. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727021>
- Ciampitti, I. A., & Salvagiotti, F. (2018, Julho 1). New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy Journal*, Vol. 110, pp. 1185–1196. American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>
- Cipriano, S., & Silva, J. (2017). Relação entre o rendimento de grão do milho (zea mays l.), nitrogénio e fósforo aplicados no solo. *Revista Eletronica de Investigacao e Desenvolvimento (REID)*, 2. Obtido de <http://reid.ucm.ac.mz/index.php/reid/article/view/225/207>
- Ciupală, L., Deaconu, A., & Spridon, D. (2021). Idw map builder and statistics of air pollution in braşov. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series III: Mathematics and Computer Science*, 1(1). <https://doi.org/10.31926/but.mif.2021.1.63.1.18>
- Coelho, A. M., & Agr, E. (2003). *Amostragem de Solos: a base para aplicação de corretivos e fertilizantes*.
- Coskan, A., & Dogan, K. (2011). Symbiotic Nitrogen Fixation in Soybean. Em H. A. El Shemy (Ed.), *Soybean Physiology and Biochemistry* (pp. 167–177). InTech.
- Costa, M. P., Reckling, M., Chadwick, D., Rees, R. M., Saget, S., Williams, M., & Styles, D. (2021). Legume-Modified Rotations Deliver Nutrition With Lower Environmental Impact. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.656005>
- Cox, M. S., Gerard, P. D., Wardlaw, M. C., & Abshire, M. J. (2003). *Variability of Selected Soil Properties and Their Relationships with Soybean Yield*.
- Cruz, I., Figueiredo, M. L. C., Oliveira, A. C., & Vasconcelos, C. A. (1999). Damage of Spodoptera frugiperda (Smith) in different maize genotypes cultivated in soil under three levels of aluminium saturation. *International Journal of Pest Management*, 45(4), 293–296. <https://doi.org/10.1080/096708799227707>

- Cunningan, C. L., & Qin, Y. (2018). *United Nations Sustainable Development Goals Pathways to Success – A Systematic Framework for Aligning Investment (Issue June)*.
- Davies, R., Di Sacco, A., & Newton, R. (2015). *Germination testing procedures*. Obtido de <https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Gomez-Barreiro/post/Is-Giberellic-acid-GA3-heat-stable-Can-i-add-GA3-into-MS-media-for-germination-prior-to-autoclaving-the-media-or-should-it-be-added-after-autoclave/attachment/5e204f15cfe4a777d404bde3/AS%3A847938502803456%401579175701149/download/13a-Germination-testing-procedures.pdf>
- Dawson, A., & Knowles, O. (2018). *To Grid Or Not To Grid-A Review Of Soil Sampling Strategies*. Obtido de <http://flrc.massey.ac.nz/publications.html>.
- Delgado-Baquerizo, M., García-Palacios, P., Milla, R., Gallardo, A., & Maestre, F. T. (2015). Soil characteristics determine soil carbon and nitrogen availability during leaf litter decomposition regardless of litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.009>
- Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UN DESA). (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results Ten key messages*. Obtido de https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2022_wpp_key-messages.pdf
- Department of Agriculture at Illinois State University. (2012). *Soybean production guide: Systematic Strategies to Increasing Yields*. Obtido de www.ilsoy.org
- Dev, P., Khandelwal, S., Yadav, S. C., Arya, V., Mali, H. R., Poonam, & Yadav, K. K. (2023). Conservation Agriculture for Sustainable Agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(5), 1–11. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i52828>
- Dhital, S., & Raun, W. R. (2016). Variability in Optimum Nitrogen Rates for Maize. *Agronomy Journal*, 108(6), 2165–2173. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0139>
- Dias, D. (2018). *Técnicas Elementares para Produzir Milho e Leguminosas Usando Agricultura de Conservação (CASI)*. Obtido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://simlesa.cimmyt.org/wp-content/uploads/Farmer-and-Extension-Manuals-portuguese-min.pdf](https://simlesa.cimmyt.org/wp-content/uploads/Farmer-and-Extension-Manuals-portuguese-min.pdf)
- Dick, R. P., Thomas, D. R., & Halvorson, J. J. (1996). *Standardized Methods, Sampling, and Sample Pretreatment*.
- Dinkins, C. P., & Jones, C. (2008). *Soil Sampling Strategies*. Obtido de www.msuextension.org
- Domin, M., Kluza, F., Góral, D., Nazarewicz, S., Kozłowicz, K., Szmigielski, M., & Ślaska-Grzywna, B. (2019). Germination Energy and Capacity of Maize Seeds Following Low-Temperature Short Storage. *Sustainability*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.3390/su12010046>
- Drucker, P. (2000). *O futuro já chegou: O maior pensador contemporâneo do mundo dos negócios desvenda a nova economia*. Obtido de http://professor.ufop.br/sites/default/files/fred/files/quinta_leitura_revolucao_industrial.pdf
- Duarte Júnior, J. B., & Cunha Coelho, F. (2010). *Rotação de Culturas*. Obtido de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/ROTACAO%20DE%20CULTURAS.pdf](https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/ROTACAO%20DE%20CULTURAS.pdf)
- Eldrandaly, K. A., & Abu-Zaid, M. S. (2011). Comparison of six GIS-based spatial interpolation methods for estimating air temperature in western saudi arabia. *Journal of Environmental Informatics*, 18(1). <https://doi.org/10.3808/jei.201100197>
- Encyclopaedia Britannica. (2023). Nitrogen Cycle. Obtido 15 de Outubro de 2023, de Encyclopaedia Britannica website: <https://www.britannica.com/science/nitrogen-cycle>
- Estel, S., Kuemmerle, T., Levers, C., Baumann, M., & Hostert, P. (2016). Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024015>

- Fagundes, M., Camargos, M. G., & Costa, F. V. da. (2011). A qualidade do solo afeta a germinação das sementes e o desenvolvimento das plântulas de *Dimorphandra mollis* Benth. (Leguminosae: Mimosoideae). *Acta Botanica Brasílica*. Obtido de <https://www.scielo.br/j/abb/a/R4g8H4qYgbMPRdyVXjkdMMR/?format=pdf&lang=pt>
- Fallah, S., & Tadayyon, A. (2010). Uptake and nitrogen efficiency in forage maize: effects of nitrogen and plant density absorción y eficiencia del nitrógeno en maíz forrajero: efectos del nitrógeno y la densidad de población. *Agrociencia*, 44, 549–560.
- FAO. (2009). *How to Feed the World in 2050. Insights from an Expert Meeting at FAO, 2050*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1728-4457.2009.00312.x>
- FAO. (2023, Setembro 22). Food and agriculture data. Obtido 8 de Outubro de 2023, de FAO website: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Fathi, A. (2022). Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency: A review. *Agrisost*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7143588>
- Feiziene, D., Feiza, V., Povilaitis, V., Putramentaite, A., Janusauskaite, D., Seibutis, V., & Slepetyš, J. (2016). Soil sustainability changes in organic crop rotations with diverse crop species and the share of legumes. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 66(1), 36–51. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1063683>
- Ferguson, R. B., & Hergert, G. W. (2009). *Soil Sampling for Precision Agriculture*. Obtido de <http://precisionagriculture.unl.edu/>
- Ferreira, T. C., Aguilar, J. V., Souza, L. A., Justino, G. C., Aguiar, L. F., & Camargos, L. S. (2016). pH effects on nodulation and biological nitrogen fixation in *Calopogonium mucunoides*. *Brazilian Journal of Botany*, 39(4), 1015–1020. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0300-0>
- FEWS NET MOÇAMBIQUE. (2014). *Descrição Das Zonas de Formas de Vida*. Maputo.
- Fisher, C. H. (1981). History of Natural Fibers. *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, 15(7), 1345–1375. <https://doi.org/10.1080/00222338108056788>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2021). *Standard operating procedure for soil nitrogen Kjeldahl method*. Rome. Obtido de <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>
- França, E. E., da Silva, G. C., de Araújo, M. E. V., Teixeira, I. R., Corrêa, P. C., & da Silva, A. G. (2021). Agronomic and physiological characteristics of soybean cultivars and their seeds according to plant population. *Agronomia Colombiana*, 39(2), 177–186. <https://doi.org/10.15446/AGRON.COLOMB.V39N2.93019>
- Francaviglia, R., Almagro, M., & Vicente-Vicente, J. L. (2023, Março 1). Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon: Principles, Processes, Practices and Policy Options. *Soil Systems*, Vol. 7. MDPI. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>
- Freitas, V. F. de, Cerezini, P., Hungria, M., & Nogueira, M. A. (2022). Strategies to deal with drought-stress in biological nitrogen fixation in soybean. *Applied Soil Ecology*, 172, 104352. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104352>
- Fugi, C. G. Q., Lourenção, A. L., & Parra, J. R. P. (2005). Biology of *Anticarsia gemmatilis* on soybean genotypes with different degrees of resistance to insects. *Scientia Agricola*, 62(1). <https://doi.org/10.1590/s0103-90162005000100006>
- Galinat, W. C. (1988). The history and evolution of maize. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 7(3), 197–220. <https://doi.org/10.1080/07352688809382264>
- Game, A., Gangahagedara, R., Game, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., & Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, 1(1), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- GAO, X. song, XIAO, Y., DENG, L. ji, LI, Q. quan, WANG, C. quan, LI, B., ... ZENG, M. (2019). Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan

- Basin, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2). [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62069-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62069-6)
- Gao, Z. F., Yang, X., Mei, Y., Zhang, J., Chao, Q., & Wang, B. C. (2023). A dynamic phosphoproteomic analysis provides insight into the C4 plant maize (*Zea mays* L.) response to natural diurnal changes. *Plant Journal*, 113(2), 291–307. <https://doi.org/10.1111/tpj.16047>
- García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2018). Corn History and Culture. Em *Corn: Chemistry and Technology, Third Edition* (pp. 1–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>
- Gebeyaw, M. (2020). Review on: Impact of Seed-Borne Pathogens on Seed Quality. *American Journal of Plant Biology*, 5(4), 77. <https://doi.org/10.11648/j.ajpb.20200504.11>
- Geng, S., Tan, J., Li, L., Miao, Y., & Wang, Y. (2023). Legumes can increase the yield of subsequent wheat with or without grain harvesting compared to Gramineae crops: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126643>
- Gerick, T. J., Oostherhuis, D. M., & Torbert, H. A. (1998). Managing Cotton Nitrogen Supply. Em D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 64, pp. 116–142). Academic Press.
- Ghosh, P. K., Hazra, K. K., Venkatesh, M. S., Praharaj, C. S., Kumar, N., Nath, C. P., ... Singh, S. S. (2019a). Grain legume inclusion in cereal-cereal rotation increased base crop productivity in the long run. *Experimental Agriculture*. <https://doi.org/10.1017/S0014479719000243>
- Ghosh, P. K., Hazra, K. K., Venkatesh, M. S., Praharaj, C. S., Kumar, N., Nath, C. P., ... Singh, S. S. (2019b). Grain legume inclusion in cereal-cereal rotation increased base crop productivity in the long run. *Experimental Agriculture*. <https://doi.org/10.1017/S0014479719000243>
- Gollner, G., Starz, W., & Friedel, J. K. (2019). Crop performance, biological N fixation and pre-crop effect of pea ideotypes in an organic farming system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 115(3). <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10021-4>
- Goyal, R. K., Mattoo, A. K., & Schmidt, M. A. (2021, Junho 11). Rhizobial–Host Interactions and Symbiotic Nitrogen Fixation in Legume Crops Toward Agriculture Sustainability. *Frontiers in Microbiology*, Vol. 12. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.669404>
- Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003, Março 1). Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, Vol. 131, pp. 872–877. American Society of Plant Biologists. <https://doi.org/10.1104/pp.017004>
- Guarçoni, A. M., Hugo Alvarez, V. V., Ferreira Novais, R., Bertola Cantarutti, R., Garcia Leite, H., & Morel Freire, F. (2006). *Definição da dimensão do indivíduo solo e determinação do número de amostras simples necessário à sua representação*.
- Guarçoni, A., Soares de Souza, G., & de Sá Paye, H. (2019). Representatividade da amostra de solo de acordo com o volume coletado em lavoura de café Arábica. *COLLOQUIUM AGRARIAE*, 15(3). <https://doi.org/10.5747/ca.2019.v15.n3.a300>
- Guedes, R. S., Alves, E. U., Gonçalves, E. P., Santos, S. do R. N. dos, & Lima, C. R. de. (2009). Testes de vigor na avaliação da qualidade fisiológica de sementes *Erythrina Velutinawilld.* (Fabaceae – papilionoideae). *Ciênc. agrotec.*, (5), 1360–1365.
- Harris, G., Farley, S., Russell, G. J., Butler, M. J., & Selinger, J. (2013). Sampling designs matching species biology produce accurate and affordable abundance indices. *PeerJ*, 2013(1). <https://doi.org/10.7717/peerj.227>
- Hengl, T., Leenaars, J. G. B., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Heuvelink, G. B. M., Mamo, T., ... Kwabena, N. A. (2017). Soil nutrient maps of Sub-Saharan Africa: assessment of soil nutrient content at 250 m spatial resolution using machine learning. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 109(1), 77–102. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9870-x>
- Hoskins, B., & Ross, D. (1996). *Soil Sample Preparation and Extraction*.

- Howard, L. O. (2013). Mexican cotton-boll weevil (*Anthonomus grandis* Boh.) /. Em *Mexican cotton-boll weevil (Anthonomus grandis Boh.)* /. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.63447>
- Hungria, M., & Nogueira, M. A. (2022). Fixação biológica do nitrogênio. Em M. C. Meyer, A. de F. B. Sérgio, M. M. Juliano, & C. da Silva (Eds.), *Bioinsumos na cultura da soja* (pp. 141–162). Brasília: Embrapa.
- Hunter, M. C., Smith, R. G., Schipanski, M. E., Atwood, L. W., & Mortensen, D. A. (2017, Abril 1). Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *BioScience*, Vol. 67, pp. 386–391. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- Hutchings, M. J., John, E. A., & Wijesinghe, D. K. (2003). Toward understanding the consequences of soil heterogeneity for plant populations and communities. *Ecology*, 84(9), 2322–2334. <https://doi.org/10.1890/02-0290>
- Idris, M., Memon, G. H., & Vinther, F. P. (1981). Occurrence of *Azospirillum* and *Azotobacter* and Potential Nitrogenase Activity in Danish Agricultural Soils under Continuous Barley Cultivation. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 31(4), 433–437. <https://doi.org/10.1080/00015128109435724>
- Iheshiulo, E. M.-A., Larney, F. J., Hernandez-Ramirez, G., Luce, M. St., Liu, K., & Chau, H. W. (2023). Do diversified crop rotations influence soil physical health? A meta-analysis. *Sciencedirect*. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198723001484>
- INE. (2012). *Estatísticas Do Distrito de Cuamba*.
- Ipata, P. L., & Pesi, R. (2015). What is the true nitrogenase reaction? A guided approach. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 43(3). <https://doi.org/10.1002/bmb.20843>
- Iván Bedolla-Rivera, H., De La Luz, M., Negrete-Rodríguez, X., Paúl Gámez-Vázquez, F., Álvarez-Bernal, D., & Conde-Barajas, E. (2023). *Intensive Agriculture and its Effect on Soil Quality Analyzed by Quality Indexes: A Systematic Review and Global Meta-Analysis*. <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1907.v1>
- Jabran, K., & Farooq, M. (2007). *Maize: cereal with a variety of uses Crop Management View project Improvement of cropping system View project*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3899.4725>
- Jain, G., Pathak, P., Bhatawdekar, R. M., Kainthola, A., & Srivastav, A. (2022). Evaluation of Machine Learning Models for Ore Grade Estimation. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 228. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9770-8_40
- Javaid, I. (1995). Cultural control practices in cotton pest management in tropical africa. *Journal of Sustainable Agriculture*, 5(1–2). https://doi.org/10.1300/J064v05n01_12
- Jayne, T. S., Mather, D., & Mghenyi, E. (2010). Principal Challenges Confronting Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa. *World Development*, 38(10), 1384–1398. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002>
- John, I., Snapp, S., Nord, A., Chimonyo, V., Gwenambira, C., & Chikowo, R. (2021). Marginal more than mesic sites benefit from groundnut diversification of maize: Increased yield, protein, stability, and profits. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107585>
- Junior, P. I. F., & Reis, V. M. (2008). *Algumas Limitações à Fixação Biológica de Nitrogênio em Leguminosas*.
- Kalfas, D., Kalogiannidis, S., Chatzitheodoridis, F., & Toska, E. (2023). Urbanization and Land Use Planning for Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): A Case Study of Greece. *Urban Science*, 7(2), 43. <https://doi.org/10.3390/urbansci7020043>
- Kamarudin, M. K. A., Rahman, L. A., Mohamad, M., Amin, W. A. A. W. M., Wahab, N. A., Toriman, M. E., ... Bati, S. N. A. M. (2021). The Development of Urban Quality of Life Spatial Model Using Geographic Information System (GIS) in Kuala Terengganu, Malaysia. *ASM Science Journal*, 15. <https://doi.org/10.32802/ASMSCJ.2020.410>

- Kebede, E. (2020). Grain legumes production and productivity in Ethiopian smallholder agricultural system, contribution to livelihoods and the way forward. *Cogent Food and Agriculture*, Vol. 6. Informa Healthcare. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1722353>
- Khan, M. A., Wahid, A., Ahmad, M., Tahir, M. T., Ahmed, M., Ahmad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). World cotton production and consumption: An overview. Em *Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2_1
- Khan, N., Wang, Z., Feng, L., Li, Y., Han, Y., Wang, G., ... Author, C. (2019). *Role of proper management of nitrogen in cotton growth and development* 74 PUBLICATIONS 685 CITATIONS SEE PROFILE *Role of proper management of nitrogen in cotton growth and development International Journal of Biosciences | IJB |*. 14(5), 483–496. <https://doi.org/10.12692/ijb/14.5.483-496>
- Khosro Mohammadi. (2012). Effective factors on biological nitrogen fixation. *African Journal of Agricultural Research*, 7(12). <https://doi.org/10.5897/AJARX11.034>
- Kim, M. Y., Van, K., Kang, Y. J., Kim, K. H., & Lee, S. H. (2011). Tracing soybean domestication history: From nucleotide to genome. *Breeding Science*, Vol. 61, pp. 445–452. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.61.445>
- Knudsen, M. T., Meyer-Aurich, A., Olesen, J. E., Chirinda, N., & Hermansen, J. E. (2014). Carbon footprints of crops from organic and conventional arable crop rotations - Using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.009>
- Koch, H., van Kessel, M. A. H. J., & Lückner, S. (2019). Complete nitrification: insights into the ecophysiology of comammox Nitrospira. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 103. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9486-3>
- Koomson, E. (2021). *Benefits and trade-offs of legume-led crop rotations on crop performance and soil erosion at various scales in SW Kenya* (University of Hohenheim). University of Hohenheim, Accra. Obtido de http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2021/1890/pdf/Doctoral_dissertation_Eric_Koomson_April_2021.pdf
- Kumar, R. M., Gadratagi, B. G., Paramesh, V., Kumar, P., Madivalar, Y., Narayanappa, N., & Ullah, F. (2022). Sustainable Management of Invasive Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Agronomy*, Vol. 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092150>
- Lassaga, S. S. (2011). *Muestreo y Análisis de Suelos Para Diagnóstico De Fertilidad*. San José: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Obtido de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P33-9965.pdf>
- Latimore, M., Giddens, J., & Ashley, D. A. (1977). Effect of Ammonium and Nitrate Nitrogen upon Photosynthate Supply and Nitrogen Fixation by Soybeans ¹. *Crop Science*, 17(3), 399–404. <https://doi.org/10.2135/cropsci1977.0011183X001700030015x>
- Ledgard, S. F., & Steele, K. W. (1992). Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. Em *Plant and Soil* (Vol. 141).
- Lee, J. A. (2016). *Cotton as a World Crop*. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr24.c1>
- Lee, J. A., & Fang, D. D. (2015). Cotton as a world crop: Origin, history, and current status. Em *Cotton* (Vol. 57). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr57.2013.0019>
- Lehman, R. M., Cambardella, C. A., Stott, D. E., Acosta-Martinez, V., Manter, D. K., Buyer, J. S., ... Karlen, D. L. (2015). Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/su7010988>
- Lengwati, D. M., Mathews, C., & Dakora, F. D. (2020). Rotation Benefits From N₂-Fixing Grain Legumes to Cereals: From Increases in Seed Yield and Quality to Greater Household Cash-Income by a Following Maize Crop. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00094>

- Leo, M. W. M. (1963). Nutrients in Soils, Heterogeneity of Soil of Agricultural Land in Relation to Soil Sampling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 11(5), 432–434. <https://doi.org/10.1021/jf60129a023>
- Li, P., Dong, H., Zheng, C., Sun, M., Liu, A., Wang, G., ... Zhao, X. (2017). Optimizing nitrogen application rate and plant density for improving cotton yield and nitrogen use efficiency in the North China Plain. *PLoS ONE*, 12(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185550>
- Li, Q., Zhou, J. H., Yang, R. S., Zhang, Z. Y., Xie, Y., Zhang, Y. Y., ... Li, W. (2011). Soil nutrients spatial variability and soil fertility suitability in Qujing tobacco-planting area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(4).
- Li, Z. (2021). An enhanced dual IDW method for high-quality geospatial interpolation. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89172-w>
- Liang, Z., Xu, Z., Cheng, J., Ma, B., Cong, W.-F., Zhang, C., ... Groot, J. C. J. (2023a). Designing diversified crop rotations to advance sustainability: A method and an application. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 532–544. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.018>
- Liang, Z., Xu, Z., Cheng, J., Ma, B., Cong, W.-F., Zhang, C., ... Groot, J. C. J. (2023b). Designing diversified crop rotations to advance sustainability: A method and an application. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 532–544. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.018>
- Lindström, K., & Mousavi, S. A. (2020, Setembro 1). Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microbial Biotechnology*, Vol. 13, pp. 1314–1335. John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13517>
- Linnér, B.-O. (2023). *The Return of Malthus: Environmentalism and the Post-war Population–Resource Crises*. The White Horse press. <https://doi.org/https://doi.org/10.3197/63811987103618.book>
- Liu, K. (1997). *Soybeans*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1763-4>
- Liu, W., Du, P., Zhao, Z., & Zhang, L. (2016). An adaptive weighting algorithm for interpolating the soil potassium content. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep23889>
- Liu, X. (2023). Sustainable intensification: A historical perspective on China's farming system. *Farming System*, 1(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100001>
- Liu, Y., Evans, S. E., Friesen, M. L., & Tiemann, L. K. (2022). Root exudates shift how N mineralization and N fixation contribute to the plant-available N supply in low fertility soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108541>
- Lokuruka, M. (2010). Soybean nutritional properties: The good and the bad about soy foods consumption - A review. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 10(4). <https://doi.org/10.4314/ajfand.v10i4.55335>
- Long, L., Liu, Y., Chen, X., Guo, J., Li, X., Guo, Y., ... Lei, S. (2022). Analysis of Spatial Variability and Influencing Factors of Soil Nutrients in Western China: A Case Study of the Daliuta Mining Area. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052793>
- Loy, D. D., & Lundy, E. L. (2018). Nutritional properties and feeding value of corn and its coproducts. Em *Corn: Chemistry and Technology*, 3rd Edition (pp. 633–659). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00023-1>
- Ma, L., Zhang, Q., Lin, J., Su, W., Yin, C., Lv, X., & Zhang, Z. (2019). The Estimation of Nitrogen Uptake and Utilization Efficiency in Cotton by the Fertilizer-Response Model. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(4), 1400–1408. <https://doi.org/10.15835/nbha47411672>
- MAE. (2005). Perfil Do Distrito de Cuamba.
- Magwanya, T., Sivotwa, E., & Katsaruware, R. D. (2016). Evaluating the efficacy of garlic (*Allium sativum*) as a bio-pesticide for controlling cotton aphid (*Aphis gossypii*). *Scientia Agriculturae*, 16(2). <https://doi.org/10.15192/pscp.sa.2016.16.2.5460>

- Maia, W. J. M. S., Cruz, I., Carvalho, C. F., Souza, B., Waquil, J. M., Pinho, R. G. V., ... Loureiro, I. (2005). Efeito do Estádio Fenológico do Milho (*Zea mays* L.) Sobre a Infestação pelo Pulgão *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856). *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 4(3). <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v4n3p308-315>
- Maja, M. M., & Ayano, S. F. (2021, Junho 1). The Impact of Population Growth on Natural Resources and Farmers' Capacity to Adapt to Climate Change in Low-Income Countries. *Earth Systems and Environment*, Vol. 5, pp. 271–283. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00209-6>
- Makate, C., Wang, R., Makate, M., & Mango, N. (2016). Crop diversification and livelihoods of smallholder farmers in Zimbabwe: Adaptive management for environmental change. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2802-4>
- Manjarrez-Domínguez, C., Uc-Campos, M. I., Esparza-Vela, M. E., Baray-Guerrero, M. del R., Giner-Chávez, O., & Santellano-Estrada, E. (2023). Geospatial-Temporal Dynamics of Land Use in the Juárez Valley: Urbanization and Displacement of Agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118499>
- Marabi, R., Das, S., Bhowmick, A., Pachori, R., & Sharma, H. (2017). Seasonal population dynamics of whitefly (*Bemisia tabaci* Gennadius) in soybean. ~ 169 ~ *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(2).
- Marca, N. R., López, R. P., & Naoki, K. (2021). Effect of shade and precipitation on germination and seedling establishment of dominant plant species in an Andean arid region, the Bolivian Prepuna. *PLoS ONE*, 16(3 March 2021). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248619>
- Massimi, M. (2023). *Guidebook: Agronomy of Maize*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/370580904>
- Mathesius, U. (2022). Are legumes different? Origins and consequences of evolving nitrogen fixing symbioses. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 276. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153765>
- Matyas, C. J., & Silva, J. A. (2013). Extreme weather and economic well-being in rural Mozambique. *Natural Hazards*, 66(1), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0064-6>
- McMichael, P. (1991). Slavery in capitalism - The rise and demise of the U.S. ante-bellum cotton culture. *Theory and Society*, 20(3). <https://doi.org/10.1007/BF00213550>
- Medic, J., Atkinson, C., & Hurburgh, C. R. (2014, Março 1). Current knowledge in soybean composition. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 91, pp. 363–384. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2407-9>
- Mello, N. de O., Negri, B. F., & Souza, I. R. P. de. (2015). Detecção Molecular De Potyvirus Causador Do Mosaico Comum Do Milho Em Plantas Daninhas Da Família Poaceae. *Revista Brasileira de Ciências da Vida*, 3(2).
- Mesfin, S., Gebresamuel, G., Haile, M., & Zenebe, A. (2023). Potentials of legumes rotation on yield and nitrogen uptake of subsequent wheat crop in northern Ethiopia. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16126>
- Messina, M. (2022). Perspective: Soybeans Can Help Address the Caloric and Protein Needs of a Growing Global Population. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.909464>
- Milošević, M., Vujaković, M., & Karagić, D. (2010). Vigour tests as indicators of seed viability. *Genetika*, 42(1), 103–118. <https://doi.org/10.2298/GENSR1001103M>
- Miot, H. A. (2018). Análise de correlação em estudos clínicos e experimentais. *Jornal Vascular Brasileiro*, 17(4), 275–279. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.174118>
- Mitas, L., & Mitsova, H. (1999). Spatial Interpolation. Em P. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley: GeoInformation International.

- Mohamed, S. P. (2023). Assessment of the Role of Crop Rotation in Integrated Pest Management for Small-Scale Farmers. *UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY*, 44(19). <https://doi.org/10.56557/upjoz/2023/v44i193626>
- Moraes, J. C., Goussain, M. M., Carvalho, G. A., & Costa, R. R. (2005). Feeding non-preference of the corn leaf aphid *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae) to corn plants (*Zea mays* L.) treated with silicon. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(4). <https://doi.org/10.1590/s1413-70542005000400007>
- Mosier, S., Córdova, S. C., & Robertson, G. P. (2021). Restoring Soil Fertility on Degraded Lands to Meet Food, Fuel, and Climate Security Needs via Perennialization. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.706142>
- Moura, D. A., Paulo, J., Soares, G., Reis, S. A., & Farias, L. F. (2021). *Agricultura Orgânica: impactos ambientais, sociais, econômicos e na saúde humana*. Obtido de <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/a-revolucao-verde.htm>
- Moura, S. M. de, Babilonia, K., Macedo, L. L. P. de, Grossi-de-Sá, M. F., Shan, L., He, P., & Ferreira, M. A. (2022). The oral secretion from Cotton Boll Weevil (*Anthonomus grandis*) induces defense responses in cotton (*Gossypium* spp) and *Arabidopsis thaliana*. *Current Plant Biology*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2022.100250>
- Muratore, C., Espen, L., & Prinsi, B. (2021). Nitrogen uptake in plants: The plasma membrane root transport systems from a physiological and proteomic perspective. *Plants*, Vol. 10. <https://doi.org/10.3390/plants10040681>
- Musa, S. F. P. D., Basir, K. H., & Luah, E. (2021). The Role of Smart Farming in Sustainable Development. *International Journal of Asian Business and Information Management*, 13(2), 1–12. <https://doi.org/10.4018/ijabim.20220701.oa5>
- Naoum, S., & Tsanis, I. K. (2004). Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based DSS. *Global Nest Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.30955/gnj.000224>
- Narayan, A., Kumar, D., & Narayan Jhariya, A. (2013). Mini Review Paper Nutritional, Medicinal and Economical importance of Corn: A Mini Review. *Research Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(7), 1–6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30058.62408>
- Nchanji, E. B., Chagomoka, T., Bellwood-Howard, I., Drescher, A., Schareika, N., & Schlesinger, J. (2023). Land tenure, food security, gender and urbanization in Northern Ghana. *Land Use Policy*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106834>
- Neely, C. B., Rouquette, F. M., Morgan, C. L., Smith, G. R., Hons, F. M., & Rooney, W. L. (2018). Integrating legumes as cover crops and intercrops into grain sorghum production systems. *Agronomy Journal*, 110(4). <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0293>
- Nemecek, T., Hayer, F., Bonnin, E., Carrouée, B., Schneider, A., & Vivier, C. (2015). Designing eco-efficient crop rotations using life cycle assessment of crop combinations. *European Journal of Agronomy*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.01.005>
- Nemecek, T., von Richthofen, J. S., Dubois, G., Casta, P., Charles, R., & Pahl, H. (2008). Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 28(3). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.004>
- Neto, E. B., & Paes, L. B. (2011). *As Técnicas De Hidroponia* (Vol. 8). Obtido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://core.ac.uk/download/pdf/228884069.pdf>
- Norberg, M. B., & Deutsch, L. (2023). *The Soybean Through World History; Lessons for Sustainable Agrofood Systems*. <https://doi.org/10.4324/9780367822866>
- Oborn, I., Phillips WorldFish, M., & Thomas, R. (2017). *Sustainable Intensification in Smallholder agriculture. An integrated systems research approach*. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-093911>

- Ohshima, Takuji., & Sueyoshi, Kuni. (2010). Nitrogen absorption and transport in soybean plants. Em *Nitrogen Assimilation in Plants* (p. 378). Research Signpost.
- Ojadi, F.-X. I. (2023). Sustainable Agricultural Practices: Value Chain of Egusi, A Local Soup Condiment in Nigeria. *IntechOpen*. Obtido de <https://www.intechopen.com/online-first/86179>
- Ojiem, J. O., Franke, A. C., Vanlauwe, B., de Ridder, N., & Giller, K. E. (2014). Benefits of legume-maize rotations: Assessing the impact of diversity on the productivity of smallholders in Western Kenya. *Field Crops Research*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.08.004>
- Okereke, G. U., & Unaegbu, D. (1992). Nodulation and biological nitrogen fixation of 80 soybean cultivars in symbiosis with indigenous rhizobia. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 8(2), 171–174. <https://doi.org/10.1007/BF01195841>
- Okumura, R. S., Mariano, D. de C., & Zaccheo, P. V. C. (2012). Uso de fertilizante nitrogenado na cultura do milho: uma revisão. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, 4(2). <https://doi.org/10.5777/paet.v4.n2.13>
- Ongaratto, S., Baldin, E. L. L., Hunt, T. E., Montezano, D. G., Robinson, E. A., & dos Santos, M. C. (2021). Effects of intraguild interactions on *Anticarsia gemmatilis* and *Chrysodeixis includens* larval fitness and behavior in soybean. *Pest Management Science*, 77(6). <https://doi.org/10.1002/ps.6330>
- Osterholz, W. R., Rinot, O., Liebman, M., & Castellano, M. J. (2017). Can mineralization of soil organic nitrogen meet maize nitrogen demand? *Plant and Soil*, 415(1–2), 73–84. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3137-1>
- Ozinga, W., Van Andel, J., & McDonnell-Alexander, M. (1997). Nutritional soil heterogeneity and mycorrhiza as determinants of plant species diversity. Em *Acta Bot. Neerl* (Vol. 46).
- Padilha, L., Guimarães, C. T., & Paiva, E. (2003). *Avaliação da Pureza Genética em Sementes de Milho Utilizando Marcadores Microsatélites*.
- Pagano, M. C., & Miransari, M. (2016). The importance of soybean production worldwide. Em *Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production: Soybean Production: Volume 1* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801536-0.00001-3>
- Paraguassú, L., Leite, M. G. P., Moreira, F. W. A., Mendonça, F. P. C., & Eskinazi-Sant'Anna, E. M. (2019). Impacts of mining in artificial lake of Iron Quadrangle-MG: past marks and changes of the present. *Environmental Earth Sciences*, 78(5). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8158-7>
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use /cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management*, 7(2). <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.04.006>
- Peigné, J., Vian, J. F., Cannavacciuolo, M., Bottollier, B., & Chaussod, R. (2009). Soil sampling based on field spatial variability of soil microbial indicators. *European Journal of Soil Biology*, 45(5–6). <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.09.002>
- Pereira, G. W., Valente, D. S. M., de Queiroz, D. M., Santos, N. T., & Fernandes-Filho, E. I. (2022). Soil mapping for precision agriculture using support vector machines combined with inverse distance weighting. *Precision Agriculture*, 23(4). <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09880-9>
- Peter-Jerome, H., Adewopo, J. B., Kamara, A. Y., Aliyu, K. T., & Dawaki, M. U. (2022). Assessing the Spatial Variability of Soil Properties to Delineate Nutrient Management Zones in Smallholder Maize-Based System of Nigeria. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5111635>
- Pinto-Zevallos, D. M., & Zarbin, P. H. G. (2013). A Química na agricultura: perspectivas para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. *Química Nova*, 36(10), 1509–1513. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013001000005>
- Popinigis, F. (1983). *vigor-de-sementes*. Obtido de <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164452/1/vigor-de-sementes.pdf>

- Puspita, R., Ninasafitri, N., & Ente, Moh. R. (2022). Characteristics of Ultramafik Rock and Nickel Laterite Distribution in Siuna Area, Pagimana, Banggai, Central Sulawesi. *JURNAL GEOCELEBES*. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v6i1.18523>
- Putri, R. F., Naufal, M., Nandini, M., Dwiputra, D. S., Wibirama, S., & Sumantyo, J. T. S. (2019). The Impact of Population Pressure on Agricultural Land towards Food Sufficiency (Case in West Kalimantan Province, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 256(1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/256/1/012050>
- Qiao, P., Lei, M., Yang, S., Yang, J., Guo, G., & Zhou, X. (2018). Comparing ordinary kriging and inverse distance weighting for soil as pollution in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1552-y>
- Raaflaub, K. A. (2014). *Thinking, Recording, and Writing History in the Ancient World*.
- Rafael Nanni, M., Pinheiro Povh, F., Alexandre Melo Demattê, J., Berti de Oliveira, R., Luiz Chicati, M., & Cezar, E. (2011). Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. *Sci. Agric*, (3), 386–392.
- Rakita, S., Banjac, V., Djuragic, O., Cheli, F., & Pinotti, L. (2021). Soybean molasses in animal nutrition. *Animals*, Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/ani11020514>
- Ramírez, Í. A. P. (2022). *Poblaciones de fijadores biológicos de nitrógeno en la producción del cultivo de soya en la zona de Los Ríos*. Babahoyo. Obtido de <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11357>
- Ranal, M. A., & Santana, D. G. de. (2006). How and why to measure the germination process? *Revista Brasileira de Botânica*, 29(1), 1–11. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100002>
- Rani, K., Sharma, P., Kumar, S., Wati, L., Kumar, R., Gurjar, D. S., ... Kumar, R. (2019). Legumes for sustainable soil and crop management. Em *Sustainable Management of Soil and Environment*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8832-3_6
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105–112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
- Reckling, M., Hecker, J. M., Bergkvist, G., Watson, C. A., Zander, P., Schläfke, N., ... Bachinger, J. (2016). A cropping system assessment framework—Evaluating effects of introducing legumes into crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.005>
- Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128(6), 450–459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
- Reetz, Jr. H. F. (2016). *Fertilizers and their efficient use*. International Fertilizer industry Association, IFA.
- Reis, V. U. V., Penido, A. C., Carvalho, E. R., Rocha, D. K., Reis, L. V., & Semolini, P. H. Z. (2022). Vigor of maize seeds and its effects on plant stand establishment, crop development and grain yield. *Journal of Seed Science*, 44. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44257527>
- Reyes-Palomino, S. E., Micaela, D., & Ccoa, C. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad Effects of intensive agriculture and climate change on biodiversity Sección: Artículo de revisión. *Revista de Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 24(1), 53–64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Ricardo Carvalho, I., Jardel Szareski, V., Henrique Demari, G., Nardino, M., Jardel Simone Morgan Dellagostin, V., Corazza da Rosa, T., ... Zanatta Aumonde, T. (2016). *Importance of nitrogen in maize production*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/308443580>
- Robbins, W. J. (1937). The Assimilation by Plants of Various Forms of Nitrogen. Em *Source: American Journal of Botany* (Vol. 24). Obtido de <http://www.jstor.orghttp://www.jstor.org/stable/2436609> Accessed:28-11-201509:16UTC

- Roberts, L., & Henry, J. L. (2000). *El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo*. Obtido de [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/\\$FILE/El%20muestreo%20de%20suelos.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/$FILE/El%20muestreo%20de%20suelos.pdf)
- Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.003>
- Rodrigues, R. H. F., Silva, L. B., Almeida, L. F. O., da Silva, S. R., Sobrinho, N., Maggioni, K., ... Pavan, B. E. (2021). Vertical distribution of *Bemisia tabaci* on soybean and attractiveness of cultivars. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 169(7). <https://doi.org/10.1111/eea.13051>
- Rodriguez, C., Carlsson, G., Englund, J. E., Flöhr, A., Pelzer, E., Jeuffroy, M. H., ... Jensen, E. S. (2020). Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>
- Rosegrant, M. W., & Cline, S. A. (2003, Dezembro 12). Global Food Security: Challenges and Policies. *Science*, Vol. 302, pp. 1917–1919. <https://doi.org/10.1126/science.1092958>
- Sabbe, W. E., & Marx, D. B. (1987). *Soil Sampling: Spatial and Temporal Variability!*
- Sáez-Plaza, P., Navas, M. J., Wybraniec, S., Michałowski, T., & Asuero, A. G. (2013). An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 224–272. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751787>
- Salvagiotti, F., Specht, J. E., Cassman, K. G., Walters, D. T., Weiss, A., & Dobermann, A. (2009). Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean: Impact of Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal*, 101(4), 958–970. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0173x>
- Sampaio, A. M., De Sousa Araújo, S., Rubiales, D., & Patto, M. C. V. (2020). Fusarium wilt management in legume crops. *Agronomy*, Vol. 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081073>
- Sandström, H., Reeder, S., Barthä, A., Birke, M., Berge, F., Davidsen, B., ... Ødegård, M. (2005). *Sample Preparation And Analysis*.
- Sanginga, N., Dashiell, K., Okogun, J. A., & Thottappilly, G. (1997). Nitrogen fixation and N contribution by promiscuous nodulating soybeans in the southern Guinea savanna of Nigeria. *Plant and Soil*, 195(2), 257–266. <https://doi.org/10.1023/A:1004207530131>
- Santhanam, V., & Sundaram, V. (2015). Agri-history of cotton in India - An overview. *Textile Trends*, Vol. 58.
- Santi, A. L., Sebem, E., Giotto, E., & Amado, T. J. C. (2016). *Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul*.
- Santos, H. O. dos, Botelho, F. B. S., Amorim Fonseca, A. C. de, Kenji Uenojo, R., Pedroso Mendes, M., & Resende Von Pinho, E. V. de. (2015). Quality of Seeds of Upland Rice Lines Adapted to the State of Minas Gerais, Brazil. *American Journal of Plant Sciences*, 06(12), 1920–1927. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.612193>
- Schlick-Souza, E. C., Baldin, E. L. L., Morando, R., & Lourenção, A. L. (2018). Antixenosis to *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) among soybean genotypes. *Bragantia*, 77(1). <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016449>
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. (1998). *Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos*.
- Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A., & Rao, M. A. (2015). Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. Em *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (Vol. 15).

- Setianto, A., & Triandini, T. (2013). Comparison of kriging and inverse distance weighted (idw) interpolation methods in lineament extraction and analysis. Em *J. SE Asian Appl. Geol* (Vol. 5).
- Shah, A. N., Javed, T., Singhal, R. K., Shabbir, R., Wang, D., Hussain, S., ... Jaremko, M. (2022, Agosto 22). Nitrogen use efficiency in cotton: Challenges and opportunities against environmental constraints. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 13. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.970339>
- Shah, V., Pande, R., Verma, P., Gokte-Narkhedkar, N., & Prasad, Y. G. (2022). Oviposition preference of pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* on cotton. *Animal Biology*. <https://doi.org/10.1163/15707563-bja10088>
- Shah, Z., Shah, S. H., Peoples, M. B., Schwenke, G. D., & Herridge, D. F. (2003). Crop residue and fertiliser N effects on nitrogen fixation and yields of legume-cereal rotations and soil organic fertility. *Field Crops Research*, 83(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00005-4)
- Sharma, S. (2018). *Seed Vigour Testing: Principles and Methods*. Obtido de www.agrobiosonline.com
- Sheoran, S., Kumar, S., Kumar, P., Meena, R. S., & Rakshit, S. (2021). Nitrogen fixation in maize: breeding opportunities. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(5), 1263–1280. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03791-5>
- Shoemaker, C. A., & Carlson, W. H. (1990). pH Affects Seed Germination of Eight Bedding Plant Species. Em *HORTSCIENCE* (Vol. 25).
- Sichone, R., & Mweetwa, A. M. (2018). Soil Nutrient Status and Cowpea Biological Nitrogen Fixation in a Maize-Cowpea Rotation Under Conservation Farming. *Journal of Agricultural Science*, 10(6). <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p136>
- Silva, F. A. C., da Silva, J. J., Depieri, R. A., & Panizzi, A. R. (2012). Feeding Activity, Salivary Amylase Activity, and Superficial Damage to Soybean Seed by Adult *Edessa meditabunda* (F.) and *Euschistus heros* (F.) (Hemiptera: Pentatomidae). *Neotropical Entomology*, 41(5). <https://doi.org/10.1007/s13744-012-0061-9>
- Silveira Borba, C., & Vilela De Andrade, R. (1977). *Qualidade das sementes*.
- Soare, E., Chiurciu, I.-A., Bălan, A.-V., & David, L. (2018). World Market Research on Maize. “Agriculture for Life, Life for Agriculture” Conference Proceedings, 1(1). <https://doi.org/10.2478/alife-2018-0032>
- Sotelo-Leyva, C., Salinas-Sánchez, D. O., Peña-Chora, G., Trejo-Loyo, A. G., González-Cortázar, M., & Zamilpa, A. (2020). Insecticidal compounds in *Ricinus communis* L. (Euphorbiaceae) to control *Melanaphis sacchari* Zehntner (Hemiptera: Aphididae). *Florida Entomologist*, 103(1), 91–95. <https://doi.org/10.1653/024.103.0415>
- Soumare, A., Diedhiou, A. G., Thuita, M., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Gopalakrishnan, S., & Kouisni, L. (2020, Agosto 1). Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards a sustainable agriculture. *Plants*, Vol. 9, pp. 1–22. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants9081011>
- Stafilov, T., Šajn, R., Boev, B., Cvetković, J., Mukaetov, D., Andreevski, M., & Lepitkova, S. (2010). Distribution of some elements in surface soil over the Kavadarci region, Republic of Macedonia. *Environmental Earth Sciences*, 61(7), 1515–1530. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0467-9>
- Stefanello, R., Garcia, D. C., Menezes, N. L. de, & Wrasse, C. F. (2012). *Influence of light, temperature and hydric stress in the germination and vigor of seeds of anise*. Obtido de <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/view/1299>
- Stein, L. Y., & Klotz, M. G. (2016, Fevereiro 8). The nitrogen cycle. *Current Biology*, Vol. 26, pp. R94–R98. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.021>
- Stomph, T. J., Dordas, C., Baranger, A., de Rijk, J., Dong, B., Evers, J., ... van der Werf, W. (2020). Designing intercropping for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles? Em *Advances in Agronomy* (Vol. 160, pp. 1–50). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.002>

- Takuji, O., Hiroyuki, F., Hiroyuki, Y., Sayuri, T., Shinji, I., Takashi, S., ... Shu, F. (2011). Effect of Nitrate on Nodulation and Nitrogen fixation of Soybean. Em A. Coskan & K. Dogan (Eds.), *Symbiotic Nitrogen Fixation in Soybean*. InTech.
- Tamburi, V., Shetty, A., & Shrihari, S. (2020). Geostatistical analysis on spatial variability of soil nutrients in vertisols of Deccan plateau region of North Karnataka, India. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5(2), 283–295. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.2.023>
- Tan, J., Xie, X., Zuo, J., Xing, X., Liu, B., Xia, Q., & Zhang, Y. (2021). Coupling random forest and inverse distance weighting to generate climate surfaces of precipitation and temperature with Multiple-Covariates. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126270>
- Tan, K. H. (1995). *Soil Sampling, Preparation and Analysis*. CRC Press.
- Tan, Q., & Xu, X. (2014). Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study. Em *Sensors & Transducers* (Vol. 165). Obtido de <http://www.sensorsportal.com>
- Tanklevska, N., Petrenko, V., Karnaushenko, A., & Melnykova, K. (2020). World corn market: analysis, trends and prospects of its deep processing. Em *journal.com* (Vol. 6). Obtido de <http://are>
- Tekrony, D. (2003). Precision is an essential component in seed vigour testing. Em *Seed Sci. & Technol* (Vol. 31).
- Tessmer, M. A., de Azevedo Kuhn, T. M., Appezzato-da-Glória, B., Lopes, J. R. S., Erler, G., & Bonani, J. P. (2022). Histology of Damage Caused by *Euschistus heros* (F.) Nymphs in Soybean Pods and Seeds. *Neotropical Entomology*, 51(1). <https://doi.org/10.1007/s13744-021-00931-w>
- Thomas, D., Schütze, B., Heinze, W. M., & Steinmetz, Z. (2020, Novembro 1). Sample preparation techniques for the analysis of microplastics in soil—a review. *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 12, pp. 1–28. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12219074>
- Tito, B. (2020, Outubro 24). Tipos de muestras de suelo. Obtido 26 de Outubro de 2023, de ingenieriaambiental website: <https://ingenieriaambiental.net/tipos-de-muestras-de-suelo/>
- Torres-Martínez, L., Weldy, P., Levy, M., & Emery, N. C. (2017). Spatiotemporal heterogeneity in precipitation patterns explain population-level germination strategies in an edaphic specialist. *Annals of Botany*, 119(2), 253–265. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw161>
- Turner, M. G., & Chapin, F. S. (2005). Causes and Consequences of Spatial Heterogeneity in Ecosystem Function. Em *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes* (pp. 9–30). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/0-387-24091-8_2
- Uguru, M. I., Benedict, •, Oyiga, C., & Jandong, E. A. (2011). *The African Journal of Plant Science and Biotechnology Responses of Some Soybean Genotypes to Different Soil pH Regimes in two Planting Seasons*.
- Valente, I. Q., Brasco, T., De, F., Alari, O., & Rios Do Amaral, L. (2018). *Eficiência da amostragem em grade para a caracterização da disponibilidade de potássio no solo Proximal sensing on sugarcane View project*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/330738577>
- van Zanten, H. H. E., Simon, W., van Selm, B., Wacker, J., Maindl, T. I., Frehner, A., ... Herrero, M. (2023). Circularity in Europe strengthens the sustainability of the global food system. *Nature Food*, 4(4), 320–330. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00734-9>
- Vasanthakumar, K., Tewodros, B., & Anteneh, B. (2015). Response of varieties and planting dates on growth and flowering of gladiolus (*Gladiolus grandiflorus* Andrews) under the ecological conditions of Haramaya University, Eastern Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry*, 7(5), 112–117. <https://doi.org/10.5897/JHF2015.0392>
- Verma, A., Yadav, B. K., & Singh, N. B. (2020). Data on the assessment of Groundwater Quality in Gomti-Ganga alluvial plain of Northern India. *Data in Brief*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105660>

- Verulkar, S. (2022). Comparative analysis of different protein estimation methods. *The Pharma Innovation Journal*, 11(4), 2091–2095. Obtido de www.thepharmajournal.com
- Vickery, H. B. (1946). The early years of the kjeldahl method to determine nitrogen. Em *YALE JOURNAL OF BIOLOGY AND MEDICINE* (Vol. 18).
- Victor, V. S., Dias, W., Santos, T. L. B., Monteiro, G. C., Sartori, M. M. P., Lourenção, A. L., & Baldin, E. L. L. (2022). Tolerance of soybean genotypes to *Euschistus heros* (Fabricius) (Hemiptera: Pentatomidae). *Phytoparasitica*, 50(5). <https://doi.org/10.1007/s12600-022-01024-z>
- Wang, H. J., Shi, X. Z., Yu, D. S., Weindorf, D. C., Huang, B., Sun, W. X., ... Milne, E. (2009). Factors determining soil nutrient distribution in a small-scaled watershed in the purple soil region of Sichuan Province, China. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.010>
- Wang, M., Markert, B., Shen, W., Chen, W., Peng, C., & Ouyang, Z. (2011). Microbial biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(6), 958–967. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0445-0>
- Wang, S., Mao, L., Shi, J., Nie, J., Song, X., & Sun, X. (2021). Effect of Nitrogen Levels and Plant Spacing on Growth and Yield of Cotton. *Journal of Integrative Agriculture*. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63323-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63323-8)
- Ward, B. B. (2019). Nitrification. Em *Encyclopedia of Ecology: Volume 1-4, Second Edition* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00697-7>
- Wendel, J. F., & Grover, C. E. (2015). Taxonomy and evolution of the cotton genus, *Gossypium*. Em *Cotton* (Vol. 57, pp. 25–44). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr57.2013.0020>
- Wolkowski, R. P., & Wollenhaupt, N. C. (1994). *Grid Soil Sampling For Precision And Profit*.
- Wollenhaupt, N. C., Mulla, D. J., & Crawford, C. A. G. (1997). *Soil Sampling and Interpolation Techniques for Mapping Spatial Variability of Soil Properties*.
- Wollenhaupt, N. C., & Wolkowski, R. P. (1994). *Grid Soil Sampling*.
- Wulfsohn, D. (2010). *Sampling Techniques for Plants and Soil* (Vol. 340).
- Xiao, J., Yin, X., Ren, J., Zhang, M., Tang, L., & Zheng, Y. (2018). Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 221, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.009>
- Xie, Y., Hunter, M., Sorensen, A., Nogueira-McRae, T., Murphy, R., Suraci, J. P., ... Lark, T. J. (2023). U.S. Farmland under Threat of Urbanization: Future Development Scenarios to 2040. *Land*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/land12030574>
- Yan, C., Wang, L., & Zhang, Q. (2021). Study on coupled relationship between urban air quality and land use in Lanzhou, China. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147724>
- Ye, J. Y., Tian, W. H., & Jin, C. W. (2022, Dezembro 1). Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. *Stress Biology*, Vol. 2. Springer. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00030-1>
- Yi, G., Zhang, T., He, Y., Ye, H., Jingji, L., Bie, X., & Liu, D. (2020). Applicability analysis of four spatial interpolation methods for air temperature. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 47(1). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-9727.2020.01.11>
- Yigezu, Y. A., El-Shater, T., Boughlala, M., Bishaw, Z., Niane, A. A., Maalouf, F., ... Aw-Hassan, A. (2019). Legume-based rotations have clear economic advantages over cereal monocropping in dry areas. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(6), 58. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0602-2>
- Yu, Y., & Flury, M. (2021). How to take representative samples to quantify microplastic particles in soil? *Science of the Total Environment*, 784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147166>

- Zeng, H., Wu, B., Zhang, N., Tian, F., Phiri, E., Musakwa, W., ... Mashonjowa, E. (2019). Spatiotemporal analysis of precipitation in the sparsely gauged Zambezi River Basin using remote sensing and google Earth engine. *Remote Sensing*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/rs11242977>
- Zimmer, S., Messmer, M., Haase, T., Piepho, H.-P., Mindermann, A., Schulz, H., ... Heß, J. (2016). Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany. *European Journal of Agronomy*, 72, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.008>
- Zúñiga, F. B., Cram Heydrich, S., & Cervantes, I. S. (2010). *Suelos*.

APÊNDICES

Apêndice 1: Resultados das análises laboratoriais



INSTITUTO DE INVESTIGAÇÃO AGRÁRIA DE MOÇAMBIQUE
DIRECÇÃO DE AGRONOMIA E RECURSOS NATURAIS
LABORATÓRIO DE SOLOS PLANTAS E ÁGUAS

Cliente: Universidade Catolica de Mocambique-UCM
Data: 21/09/2023

Local: Niassa-Cuamba

Resultados de amostras de solo

Nr. lab.	Unidade de solo	Nr.de solo	%
			N-total
791	cm	IAP1	0,10
792	cm	IAP2	0,12
793	cm	IAP3	0,11
794	cm	IAP4	0,19
795	cm	IAP5	0,13
796	cm	IAP6	0,14
797	cm	IAP7	0,13
798	cm	IAP8	0,10
799	cm	IAP9	0,11
800	cm	IAP10	0,15
801	cm	IAP11	0,13
802	cm	IAP12	0,10
803	cm	IIAP1	0,10
804	cm	IIAP2	0,09
805	cm	IIAP3	0,09
806	cm	IIAP4	0,14
807	cm	IIAP5	0,10
808	cm	IIAP6	0,13
809	cm	IIAP7	0,12
810	cm	IIAP8	0,11
811	cm	IIAP9	0,04
812	cm	IIAP10	0,10
813	cm	IIAP11	0,06
814	cm	IIAP12	0,04
815	cm	IIMP1	0,10
816	cm	IIMP2	0,06

Quantificação da distribuição espacial da fixação e absorção de Nitrogénio (N₂) em solos com culturas diversas para apoiar sistemas de agricultura sustentável.

Nr. lab.	Unidade de solo	Nr.de solo	%
			N-total
817	cm	IIMP3	0,08
818	cm	IIMP4	0,06
819	cm	IIMP5	0,07
820	cm	IIMP6	0,09
821	cm	IIMP7	0,10
822	cm	IIMP8	0,05
823	cm	IIMP9	0,09
824	cm	IIMP10	0,09
825	cm	IIMP11	0,09
826	cm	IIMP12	0,09
827	cm	IIMP1	0,07
828	cm	IIMP2	0,05
829	cm	IIMP3	0,06
830	cm	IIMP4	0,07
831	cm	IIMP5	0,06
832	cm	IIMP6	0,11
833	cm	IIMP7	0,08
834	cm	IIMP8	0,15
835	cm	IIMP9	0,14
836	cm	IIMP10	0,11
837	cm	IIMP11	0,12
838	cm	IIMP12	0,10
839	cm	ISP1	0,07
840	cm	ISP2	0,06
841	cm	ISP3	0,06
842	cm	ISP4	0,07
843	cm	ISP5	0,06
844	cm	ISP6	0,10
845	cm	ISP7	0,06
846	cm	ISP8	0,08
847	cm	ISP9	0,06
848	cm	ISP10	0,08
849	cm	ISP11	0,06
850	cm	ISP12	0,07
851	cm	IISP1	0,05
852	cm	IISP2	0,06
853	cm	IISP3	0,07
854	cm	IISP4	0,05
855	cm	IISP5	0,08
856	cm	IISP6	0,06
857	cm	IISP7	0,05
858	cm	IISP8	0,10

Apêndices

Nr. lab.	Unidade de solo	Nr.de solo	%
			N-total
859	cm	IISP9	0,07
860	cm	IISP10	0,04
861	cm	IISP11	0,05
862	cm	IISP12	0,04

O Responsável do Laboratório

Óscar Chichongue

(Investigador Assistente)

Apêndice 2: Orçamento

Para a realização do estudo, foi necessário um total de **MZN 97,965.00 (Noventa e sete mil e novecentos e sessenta e cinco)**. Este montante cobriu as despesas de pessoal, equipamento e análises de laboratório, como indicado na tabela abaixo.

Nº	Categoria	Item	Unidades	Quantidade	Preço unitário	Total		
Custos directos								
1	Pessoal de trabalho	Pagamento de sazonais (Sementeira)	Campo	3	MZN	1,500.00	MZN	4,500.00
2		Pagamento de sazonais (Sachas)	Campo	3	MZN	1,500.00	MZN	4,500.00
3	Análises Laboratoriais	Análise de Nitrogênio	Amostras	72	MZN	539.44	MZN	38,840.00
4	Equipamento	Aparelho de GPS	Aparelho	1	MZN	45,000.00	MZN	45,000.00
5		Sacos plásticos 12x20cm (embalagem de 50)	Embalagem	2	MZN	100.00	MZN	200.00
6		Sacos plásticos 40x50cm (grandes)	Unidade	6	MZN	10.00	MZN	60.00
7		Sacos	Unidade	10	MZN	20.00	MZN	200.00
Total dos custos directos							MZN	93,300.00
8	Custos indirectos	Contingência (5% do total dos custos directos)	Unidade	1	MZN	4,665.00	MZN	4,665.00
Total geral (Total dos custos directos + Custos indirectos)							MZN	97,965.00

Apêndice 3: Cronograma de atividades

Actividades	Ano de 2022				Ano de 2023																																											
	Dezembro				Janeiro				Fevereiro				Março				Abril				Maio				Junho				Julho				Agosto				Setembro				Outubro				Novembro			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48
1																																																
2																																																
3																																																
4																																																
5																																																
6																																																
7																																																
8																																																
9																																																
10																																																
11																																																
12																																																
13																																																

1 Teste de vigor de sementes

2 Lavoura

3 Demarcação de campo

4 Colecta de amostras de solo antes da sementeira

5 Sementeira

6 Retancha

7 Sacha

8 Pulverizações

9 Contagem de plantas

10 Colecta de amostras de solo depois da colheita

11 Processamento de amostras de solo

12 Análise de amostras e processamento

13 Produção do relatório final

Apêndice 4: Fotos tiradas no decorrer do estudo



A4-1. Colecta de amostras de solo



A4-2. Demarcação do campo



A4-3. Testes de vigor de sementes



A4-4. Sementeira



A4-5. Controle de pragas



A4-6. Análises laboratoriais