

Estado da fertilidade do solo e da nutrição das principais culturas em Ribeira dos Picos (Cabo Verde)

Helton Mileno da Graça Tavares

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia*

Orientado por

Manuel Ângelo Rodrigues

Margarida Arrobas

Bragança

2026

Dedico este trabalho à minha mãe Maria (Nena), aos meus irmãos, à família Tavares (Tvrs), à memória do meu pai Gualdino Tavares (Nelo), mesmo não estando presente connosco, os seus ensinamentos serão eternos, aprendemos consigo a lutar, persistir e seguir em frente sempre na Graças de Deus. Cada conquista tem o seu nome, cada passo é guiado pelos seus ensinamentos. Obrigado por nos mostrar que a agricultura não é só um ramo de trabalho, mais sim Vida. Esta conquista também é sua ...

E a todos que direta ou indiretamente me apoiaram nesta jornada.

Agradecimentos

Durante a realização deste trabalho, ocorreu o falecimento do meu pai, um momento pessoalmente marcante que representou um desafio adicional ao longo deste percurso académico. Agricultor de profissão, foi sempre um exemplo de dedicação e uma fonte constante de incentivo para que eu seguisse esta área. A sua memória e os valores que me transmitiu permaneceram como referência no meu percurso. Após a sua partida, foi através do apoio, incentivo e confiança das pessoas que de seguida menciono que encontrei a força necessária para prosseguir e concluir esta etapa. A todas elas manifesto o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, pela força, pela sabedoria concedidas ao longo deste percurso. Nos momentos de maior fragilidade, foi na fé que encontrei coragem para continuar e esperança para não desistir.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Manuel Ângelo Rodrigues e Professora Doutora Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues, agradeço profundamente a paciência, compreensão, disponibilidade e apoio ao longo de todo o percurso. Reconheço a sua elevada competência científica, a orientação rigorosa e o incentivo constante, fundamentais para a concretização deste trabalho, nomeadamente na área da fertilidade do solo e na realização das análises. Obrigado por sempre terem compreendido as minhas falhas, fragilidade, e poderem compreender e me derem sempre oportunidade de melhorar e seguir em frente, guardarei sempre comigo, muito obrigado.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e à Câmara Municipal de Santa Cruz, na pessoa do Senhor Presidente Carlos Silva, agradeço o programa de cooperação e mobilidade que possibilitou a minha vinda para esta instituição e a continuidade dos meus estudos.

Aos professores e colegas com quem convivi desde a licenciatura em engenharia Agronómica até ao mestrado em Agroecologia, agradeço os conhecimentos partilhados, a convivência e as experiências vividas.

Aos técnicos do Laboratório de Solos de Solos da Escola Superior Agrária, na pessoa da Senhora Rita Diz, Senhora Ana Veiga, Senhor Davide Cabral e Celina Afonso, Agradeço o empenho, apoio, ensinamentos e esforços prestados na realização das análises.

À equipa de investigação dos Professores Doutores Manuel Ângelo Rodrigues e Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues, agradeço os conhecimentos transmitidos e a colaboração ao longo do trabalho.

A todos os agricultores de Ribeira dos Picos que disponibilizaram os seus terrenos suas culturas para a recolhas das amostras. Um agradecimento especial ao agricultor Adilson Gonçalves, “Di”, pelo acompanhamento prestado durante a recolha das amostras, pelo empenho demonstrado e pela constante disponibilidade para ajudar ao longo de todo o processo.

Ao Seminário São José de Bragança, a todos os Sacerdotes, ao Senhor Bispo de Bragança-Miranda, D. Nuno Almeida, e às funcionárias do Seminário, agradeço a amizade, os conselhos, o apoio e a formação espiritual que tanto contribuíram para o meu crescimento pessoal e cristão.

Aos meus amigos, que me deram força ao longo desta caminhada, agradeço de modo especial à minha amiga/irmã Arlinda Semedo, pelo incentivo constante e partilha de aprendizagens. E também a todos, sem exceção, os meus amigos que conheci em Bragança, em especial os dos PALOP e CPLP, com quem fizemos grandes amizades e até hoje são motivos de muita partilha e troca de ideias pertinentes.

À professora Sónia Alves, que marcou o meu percurso desde o terceiro ano do ensino primário, agradeço por ter acreditado em mim e por nunca ter desistido, sendo uma referência determinante na minha formação pessoal e académica.

Por fim, a minha família: à minha mãe Maria Hermínia e ao meu pai, Gualdino Vieira Tavares (in memoriam), cuja educação e valores foram a âncora da minha vida. À minha mãe, em particular, agradeço por continuar a ser minha maior força e coragem. Aos meus irmãos, Geiza, Helga, Gelson, Gilson, Érica e Adélio, agradeço a amizade, união e apoio constante. Aos meus sobrinhos, primos, tios e tias, deixo igualmente o meu sincero agradecimento pelo carinho, confiança e encorajamento.

Índice

Índice de figuras	XI
Índice de quadros.....	XIV
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Solo.....	3
2.2. Fertilidade do solo	3
2.2.1. Nutrientes essenciais às plantas.....	4
2.2.2. Parâmetros de fertilidade do solo	5
2.2.2.1. Parâmetros físicos da fertilidade do solo	5
2.2.2.2. Parâmetros químicos da fertilidade do solo.....	6
2.2.2.3. Parâmetros biológicos da fertilidade do solo.....	7
2.2.2.4. Técnicas de avaliação da fertilidade do solo	7
2.3. Aspectos da nutrição mineral em culturas tropicais	10
2.3.1. A cultura da bananeira	10
2.3.2. A cultura da papaeira	11
2.3.3. A cultura da mangueira.....	11
2.3.4. A cultura da mandiocueira.....	11
2.3.5. A cultura de tomateiro	12
2.3.6. A cultura do Pimentão	12
2.3.7. A cultura da cana-de-açúcar.....	12
2.4. Situação agrícola em Cabo Verde.....	13
2.4.1. Caracterização dos solos.....	13
2.4.2. Sistema de produção agrícola.....	14
2.4.3. Principais limitações agrícolas em Cabo Verde.....	15
2.4.4. Situação agrícola em Ribeira dos Picos (Chã da Silva)	16

2.4.5. Caracterização da fertilização, desafios e perspectivas	17
3. Materiais e métodos.....	18
3.1. Enquadramento geográfico e descrição do estudo	18
3.2. Descrição das áreas cultivadas e dos compassos de plantação.....	19
3.3. Planeamento antes da recolha das amostras	25
3.3.1. Identificação das amostras.....	25
3.3.2. Materiais utilizados para recolha das amostras e procedimentos.....	25
3.4. Colheita das amostras de solos e folhas	26
3.4.1. Colheita de amostras de solos.....	26
3.4.2. Colheita das amostras de folhas	27
3.5. Armazenamento e cuidado com as amostras	28
3.6. Procedimentos para análises dos solos e tecidos vegetais.....	29
3.7. Análises de solos.....	30
3.7.1. Matéria orgânica.....	30
3.7.2. pH.....	31
3.7.3. Fósforo e potássio.....	32
3.7.4. Condutividade elétrica.....	32
3.7.5. Complexo de troca.....	32
3.7.6. Micronutrientes.....	33
3.7.6.1. Boro	33
3.7.6.2. Cobre, ferro, zinco e manganês	33
3.8. Análises dos tecidos vegetais.....	33
3.8.1. Azoto.....	34
3.8.2. Boro	34
3.8.3. Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês.....	35
4. Resultados.....	36

4.1. Propriedades do solo.....	36
4.1.1. Matéria orgânica.....	36
4.1.2. Fósforo extraível.....	36
4.1.3. Potássio extraível.....	37
4.1.4. Reação do solo.....	38
4.1.5. Cálcio de troca.....	38
4.1.6. Magnésio de troca.....	39
4.1.7. Potássio de troca.....	40
4.1.8. Sódio de troca.....	40
4.1.9. Capacidade de troca catiónica.....	41
4.1.10. Ferro extraível.....	42
4.1.11. Boro extraível.....	42
4.1.12. Cobre extraível.....	43
4.1.13. Zinco extraível.....	44
4.1.14. Manganês extraível.....	44
4.1.15. Condutividade elétrica do solo.....	45
4.1.16. Razão de adsorção de sódio.....	45
4.2. Concentrações de nutrientes nas folhas.....	46
4.2.1. Concentrações de nutrientes nas folhas das bananeiras.....	46
4.2.1.1. Azoto.....	46
4.2.1.2. Fósforo.....	47
4.2.1.3. Potássio.....	47
4.2.1.4. Cálcio.....	48
4.2.1.5. Magnésio.....	48
4.2.1.6. Boro.....	49
4.2.1.7. Ferro.....	49

4.2.1.8. Manganês	50
4.2.1.9. Zinco	50
4.2.1.10. Cobre.....	51
4.2.2. Concentração de nutrientes nas folhas das restantes culturas	51
4.2.2.1. Concentração de macronutrientes nas folhas.....	51
4.2.2.2. Concentração de micronutrientes nas folhas	53
4.2.3. Concentração de sódio nas folhas.....	54
5. Discussão dos resultados	55
5.1. Estado nutricional azotada das culturas.....	55
5.2. Estado nutricional em fósforo das culturas	55
5.3. Macronutrientes catiões.....	56
5.4. Micronutrientes aniões	59
5.5. Micronutrientes catiões.....	60
6. Conclusões.....	61
7. Referências bibliográficas	63

Índice de figuras

Figura 1- Localização geográfica da zona de estudo.....	18
Figura 2-Temperaturas médias, máximas e mínimas e precipitação mensal em Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo verde). Dados adaptados de Weather Spark (s.d.) e Weather Atlas (s.d.).	19
Figura 3-Delimitações da área de estudo com destaques para as parcelas agrícolas em imagem de satélite (Google Earth).	23
Figura 4- Registos fotográficos dos pontos de amostragem dos locais de recolha das amostras de solo e de folhas das culturas em estudo.....	24
Figura 5- Materiais utilizados na colheita das amostras de solo.	26
Figura 6- Esquema de recolha de amostras de solo em ziguezague e por zonas homogêneas. Retirado de Veloso et al. (2022).	26
Figura 7- Exemplo da colheita de solos na bananeira feitas em quatro pontos, dando uma volta completa à planta.....	27
Figura 8- Exemplo da colheita de cada subamostra feita à volta da copa das culturas perenes.....	28
Figura 9- Local de secagem das amostras de solos e folhas.....	29
Figura 10- Amostras em processo de secagem estufa de ventilação forçada.	29
Figura 11- Preparação das amostras para análise.	30
Figura 12- Determinação da matéria orgânica pelo método Walkley-Black.....	31
Figura 13- Leitura do pH (Potenciómetro Mettler Toledo)	32
Figura 14- Equipamento utilizados no processo de determinação de azoto.....	34
Figura 15- Matéria orgânica nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	36
Figura 16- Fósforo (P) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	37
Figura 17- Potássio (K) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	37
Figura 18- Valores de pH em água nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	38
Figura 19- Cálcio (Ca ⁺⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	39
Figura 20- Magnésio (Mg ⁺⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	39

Figura 21- Potássio (K ⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	40
Figura 22- Sódio (Na ⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	41
Figura 23- Capacidade de troca catiónica (CTC) nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	41
Figura 24- Ferro (Fe) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	42
Figura 25- Boro (B) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana)	43
Figura 26- Cobre (Cu) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	43
Figura 27- Zinco (Zn) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	44
Figura 28- Manganês (Mn) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).	45
Figura 29- Condutividade elétrica nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand).	45
Figura 30- Razão de adsorção de sódio nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand).	46
Figura 31- Concentração de azoto (N) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).	47
Figura 32- Concentração de fósforo (P) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).	47
Figura 33- Concentração de potássio (K) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).	48
Figura 34- Concentração de cálcio (Ca) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).	48
Figura 35- Concentração de magnésio (Mg) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).	49
Figura 36- Concentração de boro (B) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)	49
Figura 37- Concentração de ferro (Fe) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15.	50

Figura 38- Concentração de manganês (Mn) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).....	50
Figura 39- Concentração de zinco (Zn) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).....	51
Figura 40- Concentração de cobre (Cu) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).....	51
Figura 41- Concentração de sódio (Na) nas culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).....	54

Índice de quadros

Quadro 1- Caracterização da cultura da bananeira (produção convencional, com fertilização) nas 16 amostras de terrenos agrícolas estudados na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.	20
Quadro 2- Caracterização da cultura da papaveira (produção convencional, com fertilização) nas 3 amostras de terrenos agrícolas realizadas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.	21
Quadro 3- Caracterização das culturas hortícolas - pimentão e tomateiro - (produção convencional, com fertilização) nas quatro amostras retiradas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.	21
Quadro 4- Caracterização das culturas de mangueira, cana-de-açúcar e mandioca (produção convencional) amostradas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, fertilização, rega e declive.....	22
Quadro 5- Concentrações foliares de macronutrientes nas diferentes culturas e respetivos intervalos de suficiência.	52
Quadro 6- Concentrações foliares de micronutrientes nas diferentes culturas e respetivos intervalos de suficiência.	53

Abreviaturas

N- Azoto

P- Fósforo

K- Potássio

Mg- Magnésio

Ca- Cálcio

S- Enxofre

Fe- Ferro

Mn- Manganês

Zn- Zinco

Cu- Cobre

B- Boro

Mo- Molibdénio

Ni- Níquel

CTC- Capacidade de troca catiónica

Al³⁺- Alumínio

CE- Condutividade elétrica

C- Carbono

Fe₂O₃- Óxidos de ferro

CO₂- Dióxido de carbono

NIR- Infravermelho próximo

MIR- Infravermelho médio

WRB- World Reference Base for Soil Resources

CO(NH₂)₂- Ureia

(NH₄)₂SO₄- Sulfato de amónio

FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations

Cr³⁺- Ião crómio

CaCl₂- Cloreto de Cálcio

nm- Nanómetro

DTPA- Ácido dietilenotriaminopentaacético

NH_4^+ - Ião amónio

CaO- Óxido de cálcio

H_2SO_4 - Ácido sulfúrico

HNO_3 - Ácido nítrico

$^\circ\text{C}$ - Graus Celsius

M- Molar (unidade de concentração molar, equivalente a mol/L)

CPLP- Comunidade dos Países de Língua Portuguesa

mm- Milímetro

Resumo

A agricultura é um setor de primordial importância no desenvolvimento de Cabo Verde. Estratégias de fertilização que conduzam a um bom estado nutricional das culturas e promovam a sua produtividade são fundamentais para o crescimento do setor agrícola. Neste estudo, realizou-se um levantamento da fertilidade do solo e do estado nutricional de diversas culturas importantes para a economia do país, num trabalho de campo realizado em Ribeira dos Picos, na ilha de Santiago. As culturas incluídas no estudo foram pimentão (*Capsicum annuum* L.), tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.), bananeira (*Musa paradisiaca* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), papaeira (*Carica papaya* L.), mandiocqueira (*Manihot esculenta* Crantz) e mangueira (*Mangifera indica* L.). O número de parcelas amostradas variou conforme a espécie. Tomateiro, mangueira, mandiocqueira e cana-de-açúcar foram amostrados apenas numa parcela, enquanto a bananeira foi amostrada em dezasseis. No processo de amostragem, colheram-se folhas das culturas e solos na zona de influência das suas copas, permitindo estabelecer a relação entre a nutrição das plantas e as propriedades do solo. Em termos gerais, os solos apresentaram tendência para teores baixos de matéria orgânica, pH alcalino, teores elevados de fósforo (P) e potássio (K), bem como níveis elevados de sódio (Na) no complexo de troca. Todas estas características são típicas de solos de origem vulcânica em regiões áridas e semiáridas. O estado nutricional azotado das culturas variou entre adequado e deficiente, refletindo situações com e sem aplicação de fertilizantes. Os teores de P nas folhas seguiram tendência semelhante ao azoto (N). A bananeira, por exemplo, apresentou teores baixos de N e P nas folhas. Ainda que os solos apresentassem teores elevados de K, algumas espécies não exibiram níveis elevados nas folhas, possivelmente devido a antagonismo iónico com o Na ou à extrema secura do solo, dificultando a absorção. Cálcio (Ca) e magnésio (Mg), embora tenham surgido em níveis baixos no complexo de troca, mostraram níveis tendencialmente adequados nas folhas, parecendo não representar um problema relevante na nutrição das espécies analisadas. O boro (B) apresentou-se em níveis elevados ou mesmo excessivos. Entre os micronutrientes catiónicos, o zinco (Zn) mostrou tendência à deficiência, revelando-se como um possível problema nutricional das culturas. Embora este estudo tenha incluído um número reduzido de parcelas, a diversidade de resultados obtidos sugere que a definição de estratégias de fertilização para este território é complexa e que se beneficiaria

significativamente de estudos complementares, incluindo ensaios de resposta das plantas a diferentes estratégias de fertilização.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; Estado nutricional das culturas; Solos vulcânicos alcalinos; Sodicidade; Antagonismo iônico; Cabo Verde.

Abstract

Agriculture is a sector of paramount importance for the development of Cabo Verde. Fertilization strategies that ensure adequate plant nutrition and promote crop productivity are fundamental for the growth of the agricultural sector. In this study, the fertility of the soil and the nutritional status of several crops important to the national economy were assessed in a field survey conducted in Ribeira dos Picos, on the island of Santiago. The crops included in the study were bell pepper (*Capsicum annuum* L.), tomato (*Solanum lycopersicum* L.), banana (*Musa × paradisiaca* L.), sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), papaya (*Carica papaya* L.), cassava (*Manihot esculenta* Crantz), and mango (*Mangifera indica* L.). The number of sampled plots varied by species: tomato, mango, cassava, and sugarcane were sampled in only one plot, whereas banana was sampled in sixteen plots. During sampling, leaves from the crops and soils within the influence zone of their canopies were collected to allow the establishment of relationships between plant nutrition and soil properties. In general terms, the soils tended to exhibit low organic matter content, alkaline pH, high phosphorus (P) and potassium (K) levels, as well as elevated sodium (Na) in the cation exchange complex. These characteristics are typical of volcanic soils in arid and semi-arid regions. The nitrogen (N) nutritional status of the crops ranged from adequate to deficient, reflecting situations with and without fertilizer application. Leaf P levels followed a similar trend to N. For instance, banana showed low levels of both N and P in its leaves. Although soils exhibited high K levels, some species did not show elevated leaf K concentration, possibly due to ionic antagonism with Na or extreme soil dryness, which limited nutrient uptake. Calcium (Ca) and magnesium (Mg), although low in the cation exchange complex, were generally adequate in the leaves, appearing not to constitute a significant limitation to the nutrition of the studied species. Boron (B) was generally present at high or even excessive levels. Among cationic micronutrients, zinc (Zn) tended to be deficient, suggesting it may represent a potential nutritional constraint for the crops. Although this study included a limited number of plots, the diversity of results obtained suggests that defining fertilization strategies for this territory is complex and would greatly benefit from complementary studies, including trials assessing plant responses to different fertilization strategies.

Keywords: Soil fertility; Crop nutritional status; Alkaline volcanic soils; Sodicty; Ionic antagonism; Cabo Verde.

1. Introdução

O conhecimento sobre a fertilidade do solo e o estado nutricional das culturas em Cabo Verde é limitado, refletindo uma fraca perceção da importância de compreender a fertilidade dos solos e a sua relação com a produtividade. Em Cabo Verde, a prática da análise de solos e de tecidos vegetais não é considerada necessária pela maioria dos agricultores, o que é preocupante num país em que a agricultura constitui uma das principais fontes de rendimento e sustento das famílias, além de ser um setor estratégico para a segurança alimentar nacional.

O conhecimento sobre a fertilidade dos solos e o estado nutricional das culturas é fundamental para o desenvolvimento do país. Uma base de conhecimento mais ampla nestas áreas permite colocar o país numa posição mais favorável, com maior capacidade para produzir alimentos, reduzindo a dependência das importações e, conseqüentemente, promovendo a segurança alimentar e o crescimento económico.

Um arquipélago localizado no meio do oceano Atlântico deve estar preparado para abastecer a sua população a nível alimentar, porque o mundo está permanentemente sujeito a catástrofes naturais e conflitos que podem bloquear o fornecimento regular de alimentos ou fazer variar o seu preço, pondo em causa a segurança alimentar das populações, sobretudo das mais vulneráveis.

Cabo Verde, fazendo parte dos países da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP), integra o grupo de nações onde os principais responsáveis pela produção de alimentos são os pequenos produtores agrícolas. Cerca de 41.000 famílias dependem do meio rural, aproximadamente 60% da população, sendo, contudo, também gravemente afetadas pela insegurança alimentar e nutricional.

O país enfrenta várias limitações ecológicas para a produção agrícola. Por isso, adquirir mais conhecimentos no domínio da agricultura é essencial para utilizar e preservar de forma racional os escassos recursos disponíveis, promovendo, assim, uma maior produtividade e rentabilidade agrícola.

Este estudo tem como objetivo avaliar a situação da fertilidade dos solos e o estado nutricional das principais culturas da região de Ribeira dos Picos, situada no interior da ilha de Santiago, em Cabo Verde. A partir desses dados, procurar-se-á inferir sobre a situação do resto do país. Pretende-se aprofundar o conhecimento sobre os solos e as

principais culturas, de modo a informar os agricultores acerca das condições das suas plantações e dos solos onde estas se desenvolvem.

O estudo será realizado nos terrenos dos próprios agricultores, e as informações obtidas permitirão ajudá-los a melhorar as suas práticas agrícolas, nomeadamente no que diz respeito à fertilização das culturas, identificando os principais desequilíbrios nutricionais detetados.

Como referido, a recolha de amostras de solo e de tecidos vegetais será efetuada em algumas das principais culturas da região, nomeadamente bananeira, papaeira, mangueira, mandioqueira, tomateiro, cana-de-açúcar e pimentão. As amostras serão analisadas no Laboratório de Solos da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança.

A tese está estruturada em seis secções principais. Inclui uma revisão bibliográfica que aborda questões relacionadas com o solo, a fertilização e apresenta uma breve descrição da região da Ribeira dos Picos, da ilha de Santiago e das culturas em estudo. Contém também uma secção de materiais e métodos, onde se caracteriza a região e se descrevem os processos de amostragem e os métodos de análise utilizados no laboratório. Na secção de resultados, a informação é organizada em quadros e figuras, acompanhada de textos explicativos que facilitam a sua interpretação pelos leitores. Na discussão, procura-se justificar os resultados observados à luz do conhecimento científico atual. A tese inclui ainda uma secção dedicada às principais conclusões do estudo e termina com a lista das referências citadas ao longo dos textos.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Solo

O solo constitui um dos recursos naturais mais valiosos do planeta, desempenhando funções essenciais nos ecossistemas terrestres. As plantas, enquanto produtores primários, desenvolvem-se no solo, onde obtêm a maioria dos nutrientes e da água necessários ao seu crescimento (Nwachokor et al., 2009).

O solo serve como meio para o crescimento das culturas, essenciais para a produção de alimentos, fibras, medicamentos e muitos outros produtos. Desempenha também um papel fundamental na sobrevivência de inúmeros organismos vivos. Enquanto componente essencial do ecossistema terrestre, o solo exerce múltiplas funções, incluindo aquelas indispensáveis para o sustento e desenvolvimento das plantas (Nwachokor et al., 2009).

A cobertura edáfica superficial está presente em praticamente toda a superfície terrestre vegetada, sendo que o crescimento e a distribuição das plantas estão fortemente condicionados pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Kardol et al., 2006).

Os solos de Cabo Verde formaram-se maioritariamente a partir de rochas vulcânicas, como basaltos, fonólitos e tufos vulcânicos, embora em algumas ilhas mais planas a sua origem seja calcária. Devido ao clima árido, à precipitação irregular e ao relevo acidentado, os solos apresentam um baixo grau de desenvolvimento, com perfis superficiais rasos, baixo teor de matéria orgânica, pH neutro a alcalino e elevada retenção de P, o que limita a sua fertilidade natural. Apenas cerca de 10% da superfície do solo do arquipélago é potencialmente cultivável, estando a maior parte a produzir em regime de sequeiro (Monteiro et al., 2020; Madeira & Pinto 2014).

2.2. Fertilidade do solo

A fertilidade do solo é um conceito complexo, cuja definição varia consoante o contexto ecológico, agronómico ou socioeconómico. Segundo Patzel et al. (2000), não existe uma definição única da fertilidade do solo. Por exemplo, pode ser entendida como a capacidade do solo em gerar colheitas economicamente viáveis, traduzida na produtividade por unidade de área. Em outros casos, associa-se ao conceito de sustentabilidade, ou seja, à aptidão do solo para manter uma produção agrícola estável ao

longo do tempo, mesmo sob diferentes usos e manejos. Para além da dimensão produtiva, a fertilidade do solo assume também uma componente ecológica, sendo interpretada como o equilíbrio funcional dos ecossistemas, a capacidade de regeneração natural, a reposição contínua de nutrientes e a manutenção da biodiversidade edáfica.

De forma mais objetiva, diversos autores definem a fertilidade como a capacidade do solo de disponibilizar, de forma equilibrada e em quantidades adequadas, os nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, sem conter elementos tóxicos em concentrações prejudiciais. Trata-se de um dos principais determinantes da produtividade agrícola, resultando da interação entre propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Foth & Ellis, 1997; Havlin et al., 2014; Weil & Brady, 2017).

Nas regiões áridas e semiáridas, a fertilidade do solo deve ser compreendida como um conceito dinâmico, resultando assim em um ciclo contínuo de nutrientes em formas orgânicas e inorgânicas, ligado ao fornecimento de água, à circulação de ar e à disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Essas zonas enfrentam problemas que constituem grandes limitações à produtividade agrícola, como a baixa disponibilidade de água, baixo teor de matéria orgânica e a salinização. Vários autores destacam que a avaliação da fertilidade do solo nas zonas áridas exige atenção não apenas pela composição química, mas também em relação a aspetos físicos e biológicos do solo, incluindo a sua aptidão para conservar a humidade de forma eficaz (Hag Husein et al., 2021).

2.2.1. Nutrientes essenciais às plantas

Segundo Epstein e Bloom (2005), a nutrição mineral das plantas assenta na absorção de elementos químicos essenciais ao seu desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. Um elemento é considerado nutricionalmente essencial quando a sua ausência compromete alguma etapa do ciclo de vida da planta, quando a sua função não pode ser substituída por nenhum outro elemento e quando participa diretamente em processos metabólicos ou na constituição estrutural dos tecidos vegetais.

Os nutrientes essenciais classificam-se em macronutrientes e micronutrientes, de acordo com a quantidade requerida pelas plantas (Hawkesford et al., 2012).

Os macronutrientes principais, N, P e K, são os nutrientes necessários em maiores quantidades. Já os macronutrientes secundários incluem o Ca, o Mg e o enxofre (S). Estes

nutrientes desempenham funções estruturais e fisiológicas vitais, tais como a síntese de proteínas e ácidos nucleicos, a regulação osmótica, a ativação enzimática, a produção e transferência de energia, e a formação das paredes celulares (Hawkesford et al., 2012; Barker & Pilbeam, 2015).

Os micronutrientes, embora requeridos em menores quantidades, são igualmente indispensáveis. Entre eles incluem-se: ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), Boro (B), molibdénio (Mo), cloro (Cl) e níquel (Ni). Estes elementos participam em reações de oxidorredução, processos enzimáticos, fotossíntese, respiração celular e no desenvolvimento reprodutivo das plantas (Jones, 2012; Hawkesford et al., 2012).

De acordo com Barker e Pilbeam (2015), a disponibilidade destes nutrientes no solo está intrinsecamente relacionada com as práticas de gestão da sua fertilidade. Uma gestão eficaz do solo é determinante, não apenas para garantir a saúde e o desenvolvimento das plantas, mas também para a produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2.2.2. Parâmetros de fertilidade do solo

Os parâmetros da fertilidade do solo correspondem a valores mensuráveis que permitem avaliar as condições físicas, químicas e biológicas determinantes para a capacidade do solo em sustentar o crescimento vegetal. Entre os mais relevantes destacam-se o pH, o teor de matéria orgânica, a capacidade de troca catiónica (CTC), a disponibilidade de nutrientes essenciais e de diversos indicadores biológicos, como a biomassa e a atividade microbiana (Havlin et al., 2014; Weil & Brady, 2017; Lal, 2020).

A monitorização sistemática destes parâmetros assume um papel central na caracterização da fertilidade do solo, uma vez que fornece informação integrada sobre a sua qualidade e a capacidade produtiva. Além disso, constitui uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de estratégias de gestão agrícola sustentável, permitindo identificar limitações específicas e orientar a adoção de práticas de manejo adequadas (Havlin et al., 2014; Weil & Brady, 2017; Lal, 2020).

2.2.2.1. Parâmetros físicos da fertilidade do solo

As propriedades físicas do solo influenciam diretamente a sua fertilidade, uma vez que condicionam a disponibilidade de água, oxigénio e nutrientes para as plantas. Entre as mais relevantes destacam-se a textura, a estrutura, a densidade aparente, a porosidade

e a estabilidade dos agregados. Estes atributos regulam processos fundamentais como a infiltração e retenção de água, o arejamento do perfil edáfico e o crescimento radicular (Weil & Brady, 2017).

As propriedades físicas do solo encontram-se estreitamente associada à sua capacidade produtiva. Propriedades como a textura e a estrutura determinam a proporção de macroporos e microporos, influenciando diretamente a circulação de ar e a retenção de humidade. Solos com boa estrutura e densidade aparente adequada favorecem o desenvolvimento radicular e a absorção eficiente de nutrientes. Em contrapartida, solos compactados ou excessivamente arenosos apresentam limitações significativas à produtividade agrícola (Weil & Brady, 2017).

2.2.2.2. Parâmetros químicos da fertilidade do solo

A fertilidade química do solo depende de um conjunto de fatores que determinam a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, sendo o pH um dos mais determinantes. Este parâmetro regula a solubilidade dos nutrientes e, conseqüentemente, a sua assimilação. Valores de pH fora da faixa considerada ideal (5,5 – 7,0) podem comprometer significativamente a nutrição das plantas. Em ambientes ácidos, ocorre uma elevada solubilização do alumínio (Al^{3+}), o que pode afetar negativamente o desenvolvimento vegetal (Ferrarezi et al., 2022; Barrow & Hartemink, 2023).

A matéria orgânica é outro elemento central, não apenas como fonte gradual de nutrientes, mas também como promotora da melhoria estrutural do solo e do aumento da capacidade de retenção de água. Além disso, está diretamente associada à CTC, a qual expressa a aptidão do solo para reter e disponibilizar cátions essenciais como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+), constituindo, por isso, um indicador direto da fertilidade química (Fageria, 2009).

Outro parâmetro de relevância é a condutividade elétrica (CE) do solo, frequentemente utilizada como indicador indireto de salinidade. Valores elevados de CE estão associados a excesso de sais, muitas vezes resultante de práticas de irrigação intensiva, o que compromete a absorção de água e nutrientes e reduz a produtividade agrícola (Fageria, 2009).

2.2.2.3. Parâmetros biológicos da fertilidade do solo

A fertilidade biológica do solo está associada à atividade e diversidade dos microrganismos, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pela ciclagem dos nutrientes. Um dos elementos centrais é a biomassa microbiana, que corresponde à fração viva da matéria orgânica do solo, constituída por bactérias, fungos, protozoários e outros organismos microscópicos. Este indicador é sensível a alterações de uso e manejo, refletindo de forma rápida a qualidade do solo (Anderson & Domsch, 2010).

Segundo Nannipieri et al. (2018), a atividade enzimática é um dos fatores da fertilidade biológica do solo essencial pois expressa a capacidade em catalisar reações bioquímicas relacionadas com a mineralização da matéria orgânica e a disponibilização de nutrientes. Os mesmos autores destacam que enzimas como fosfatase, urease e desidrogenase são frequentemente utilizadas como bioindicadores, uma vez que estão diretamente associadas aos ciclos de P, N e carbono (C).

A respiração do solo, constitui um indicador fiável da qualidade biológica do solo, na medida em que traduz diretamente a intensidade da atividade metabólica da comunidade microbiana. Variações, na respiração do solo permitem identificar processos de degradação ou de melhoria da qualidade do solo, estando intimamente relacionadas com a eficiência da decomposição da matéria orgânica e com o restabelecimento da disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (Lallaouna et al., 2023).

Finalizando, a presença de microrganismos simbióticos, como as micorrizas arbusculares e as bactérias fixadoras de N, constituem um indicador de elevada importância biológica. Estes organismos contribuem para o aumento da absorção de nutrientes e para a melhoria da estrutura do solo, reforçando a sua sustentabilidade agrícola (Smith & Read, 2008).

2.2.2.4. Técnicas de avaliação da fertilidade do solo

A avaliação da fertilidade do solo é um passo fundamental para o planeamento de práticas agrícolas sustentáveis, pois fornece informação sobre a disponibilidade de nutrientes e a capacidade do solo em suportar o crescimento das culturas. Trata-se de uma etapa amplamente reconhecida pela literatura como indispensável para a interpretação da qualidade do solo e a recomendação de fertilização. Essa avaliação da fertilidade do solo pode ser realizada através de abordagens químicas, biológicas e tecnológicas (Fageria,

2009; Havlin et al., 2014). Estas metodologias, quando utilizadas de forma integrada, permitem uma caracterização mais abrangente e robusta do estado nutricional do solo e da resposta das culturas, contribuindo para diagnósticos mais fiáveis e para a definição de estratégias de gestão sustentáveis.

A análise química do solo constitui o método de diagnóstico da fertilidade mais amplamente utilizada, servindo de base para a calibração de curvas de respostas das culturas e para a formação de recomendações de fertilização. Num estudo comprovativo realizado em 50 solos agrícolas da Europa Central, Wuenscher et al. (2015) avaliaram 14 métodos de extração de P, incluindo abordagens clássicas como Olsen, Mehlich-3 e Bray II. Os resultados mostraram que os diferentes extratores quantificam frações distintas de P e que a sua eficiência é fortemente condicionada por propriedades como o pH, o teor de carbonatos, a textura e a mineralogia dos óxidos de ferro (Fe_2O_3). Verificou-se ainda que métodos baseados em mecanismos de extração semelhantes tendem a apresentar maior correlação entre si. Estas evidências reforçam que nenhum método é universalmente aplicável, sublinhando a necessidade de calibrar a interpretação analítica às condições edafoclimáticas locais para garantir diagnósticos fiáveis e recomendações de fertilização mais consistentes.

A análise foliar constitui um método de diagnóstico consolidado na nutrição mineral de plantas, alicerçando no princípio ecofisiológico de que a concentração de nutrientes nos tecidos vegetais reflete a interação entre a disponibilidade edáfica e a capacidade de absorção e redistribuição pelas culturas. Este procedimento, desenvolvido há várias décadas, permanece como complemento indispensável à análise química do solo, uma vez que fornece uma avaliação direta da acumulação de nutrientes essenciais na planta. A fiabilidade do método depende de protocolos rigorosos de amostragem, que envolvem a seleção do órgão vegetal mais representativo, a definição do estágio fenológico adequado e a aplicação de procedimentos laboratoriais padronizadas. Embora fatores ambientais, a posição da folha e a variação sazonal possam introduzir limitações, estudos recentes demonstram que os níveis críticos de referência derivados da análise foliar apresentam correlação consistente com o desempenho produtivo e fisiológico das culturas (Hauer-Jákli & Tränkner, 2019; Tougaard et al., 2023).

A avaliação biológica da fertilidade do solo constitui uma abordagem emergente que complementa os métodos químicos tradicionais, incorporando o conceito mais amplo de qualidade do solo. Este enfoque baseia-se na premissa de que a atividade e a

diversidade microbiana desempenham papel central na ciclagem de nutrientes, na estabilização da matéria orgânica e na resiliência dos ecossistemas agrícolas. Entre os indicadores mais relevantes destacam-se a respiração basal, que expressa a libertação de dióxido de carbono (CO₂) resultante da decomposição microbiana da matéria orgânica, a biomassa microbiana do C, e N, estimada por métodos de fumigação-extração ou fumigação-incubação, que reflete o tamanho da comunidade microbiana ativa, e a atividade enzimática (fosfatases, desidrogenases, ureases), considerada um marcador funcional da dinâmica dos ciclos biogeoquímicos. Apesar do seu elevado potencial como descritores sensíveis de alterações na gestão agrícola, estes parâmetros apresentam grande variabilidade espacial e temporal, exigindo protocolos de amostragens e interpretação robustos. Em conjunto, os indicadores biológicos oferecem uma perspetiva indispensável para a avaliação integrada da fertilidade e constituem ferramentas estratégicas para a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis (Bünemann et al., 2018; Schloter et al., 2018).

Também as ferramentas modernas de avaliação da fertilidade do solo, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e médio (MIR), os sensores remotos (satélites e drones) e os sensores proximais, representam um avanço significativo na capacidade de monitorizar a variabilidade espacial e temporal dos atributos edáficos. Estas tecnologias permitem diagnósticos mais céleres e em larga escala, complementando as metodologias clássicas ao fornecerem dados de elevada resolução que podem ser integrados em sistemas de agricultura de precisão (Viscarra Rossel & Behrens, 2010; Mulla, 2013). Não obstante o seu potencial, a adoção destas ferramentas permanece condicionada por elevados encargos de implementação, pela necessidade de calibrações regionais e por limitações de acessibilidade tecnológica, sobretudo em contextos semiáridos e em países em desenvolvimento. Assim, o seu papel deve ser entendido como complementar, e não de substituição, às análises de solos e foliares, que continuam a constituir a base do diagnóstico da fertilidade do solo. Contudo, a tendência de evolução científica e tecnológica indica que estas metodologias emergentes poderão assumir crescente relevância em estratégias de gestão sustentável da fertilidade do solo (Adamchuk et al., 2004).

2.3. Aspectos da nutrição mineral em culturas tropicais

A nutrição mineral é determinante para a produtividade e qualidade das colheitas. Em ambientes tropicais e semiáridos como Cabo Verde, a limitação de matéria orgânica, a acidez e a baixa CTC condicionam o fornecimento de nutrientes e exigem estratégias de gestão particularmente criteriosas (Sanchez, 2019). Do ponto de vista fisiológico, a aquisição e a utilização de nutrientes pelas plantas requerem um equilíbrio entre oferta no solo e capacidade de transporte e redistribuição na planta, sob pena de surgirem défices que comprometem crescimento, desenvolvimento e qualidade do produto agrícola (White & Brown, 2010).

Em solos de regiões tropicais, um constrangimento recorrente é a baixa disponibilidade de P, resultante da fixação por óxidos de Fe e Al na rizosfera e, em contextos mais alcalinos, da precipitação pelo Ca, sendo que estes processos reduzem também a eficiência das adubações fosfatadas (Hinsinger, 2001). Em paralelo, deficiências de micronutrientes, designadamente Zn, Fe, Mn e B, são frequentes e, quando não diagnosticadas e corrigidas de forma integrada, comprometem a produtividade e a qualidade das culturas (Alloway, 2008a).

No contexto cabo-verdiano, as limitações edafoclimáticas, como baixos teores de matéria orgânica, acidez elevada e suscetibilidade à erosão, condicionam fortemente disponibilidade de nutrientes. Estudos recentes sublinham a importância da gestão integrada de água e nutrientes como estratégia fundamental para reduzir perdas por lixiviação e erosão, aumentando a eficiência do uso dos fertilizantes e a sustentabilidade da produção agrícola (Batista et al., 2015; Monteiro et al., 2020; Sequeira et al., 2025).

2.3.1. A cultura da bananeira

A bananeira é uma das culturas tropicais de maior importância. A planta apresenta elevadas exigências nutricionais, particularmente em K. Este elemento é determinante para a regulação osmótica, a translocação de fotoassimilados e o crescimento dos frutos, sendo também fundamental para a resistência a doenças e para a qualidade dos frutos. A deficiência em K resulta em frutos de menor calibre e com reduzida vida útil. O N e o Mg são igualmente relevantes. O N contribui para o crescimento vegetativo e para a acumulação de biomassa, enquanto o Mg desempenha papel central na integridade

fotossintética por integrar a molécula de clorofila (Moreira & Fageria, 2009; Hawkesford et al., 2012).

2.3.2. A cultura da papaieira

Na papaieira, a nutrição mineral apresenta-se como fator determinante para a produtividade e a qualidade dos frutos. O P é um nutriente crítico, pois participa na indução floral, no desenvolvimento radicular e na frutificação (Taiz et al., 2017).

Em solos tropicais fortemente meteorizados, a disponibilidade de P é frequentemente baixa, o que pode comprometer a formação de flores e frutos viáveis. O K, por sua vez, está intimamente relacionado com a firmeza dos frutos e a sua qualidade pós-colheita, sendo também essencial para aumentar a tolerância ao stresse hídrico e às condições adversas típicas de ambientes semiáridos (Lima, 2003).

2.3.3. A cultura da mangueira

Na mangueira, a nutrição equilibrada entre P e K é igualmente indispensável, embora os mecanismos de resposta da cultura apresentem especificidades próprias. O P desempenha um papel central no florescimento e na diferenciação reprodutiva, influenciando diretamente a regularidade das colheitas e a produtividade da cultura. O K, por outro lado, está associado ao desenvolvimento adequado dos frutos, contribuindo para características organolépticas como sabor e aroma, além de reforçar a resistência ao transporte e armazenamento. Em sistemas de produção em regiões tropicais e semiáridos, a disponibilidade adequada destes nutrientes torna-se essencial para assegurar colheitas estáveis e de elevada qualidade (Taiz et al., 2017).

2.3.4. A cultura da mandioca

A mandioca é uma cultura tropical de grande importância alimentar e económica, especialmente em regiões de clima quente e solos de média a baixa fertilidade. Apresenta moderadas exigências nutricionais, mas o equilíbrio dos nutrientes é essencial para o desenvolvimento radicular e a produtividade das raízes tuberosas. O K é o nutriente mais requerido, atuando na translocação de fotoassimilados, no crescimento das raízes e na tolerância ao stresse hídrico. O N é fundamental para o crescimento da parte aérea e para a síntese de proteínas, devendo ser fornecido em quantidades equilibradas para evitar excesso vegetativo em detrimento das raízes. O P tem papel

importante na formação e funcionamento das raízes e na acumulação de amido. O Mg, integrando a molécula de clorofila, é essencial para a fotossíntese e para a eficiência no uso da luz (Howeler, 2002).

2.3.5. A cultura de tomateiro

O tomateiro é uma das hortícolas mais cultivadas no mundo e caracteriza-se por uma elevada exigência em nutrientes, sobretudo N, P, e K. Um estudo recente realizado em Xinjiang, China, demonstrou que para produzir 1000 kg de frutos, a parte aérea do tomateiro absorve em média 1,95 kg de N, 0,33 kg de P e 2,28 kg de K, refletindo uma relação N:P:K de aproximadamente 1:0,17:1,17 (Yibati et al., 2025).

2.3.6. A cultura do Pimentão

Na cultura do pimentão a nutrição mineral é determinante para o desempenho agronómico, influenciando simultaneamente o rendimento e a qualidade nutricional dos frutos. Num estudo de Stoleru et al. (2023) verificou-se que diferentes regimes de fertilização (química, orgânica e biológica) conduziram a aumentos expressivos nos teores de macronutrientes, destacando-se incrementos de até 72% em P, 54% em Ca e 28% em K na cultivar Blancina, e de 51%, 32% e 43% na cultivar Brillant. Além disso, a fertilização química favoreceu maiores teores de Fe, enquanto a orgânica promoveu concentrações superiores de Cu, Mn e Zn. Estes resultados indicam que a gestão da fertilização, para além de aumentar a produtividade, pode melhorar o perfil mineral do fruto, reforçando o papel do pimentão como alimento de elevado valor funcional (Stoleru et al., 2023).

2.3.7. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância socioeconómica e fortemente dependente da disponibilidade de N e K no solo. O N é indispensável para o crescimento vegetativo e para a síntese de açúcares, enquanto o K favorece a acumulação de sacarose e regula o estado hídrico da planta (Moore & Botha, 2014). Em Cabo Verde, sistemas de produção irrigadas demonstram que a gestão da fertilização associada à qualidade da água influencia de forma significativa a fertilidade do solo e a produtividade da cana-de-açúcar (Palacios-Díaz et al., 2023).

2.4. Situação agrícola em Cabo Verde

Cabo Verde é um arquipélago insular de origem vulcânica, caracterizado por relevo maioritariamente acidentado e clima semiárido, o que impõe severas restrições ao desenvolvimento agrícola. A precipitação média anual é baixa, em grande parte não ultrapassa os 300 mm, e apresenta forte irregularidade espacial e temporal, com uma estação seca prolongada em uma estação chuvosa curta, concentrada em poucos meses (Madeira & Pinto, 2014).

Os solos do arquipélago permanecem relativamente com poucos estudos, com mapeamentos incompletos e caracterização química limitada. A informação disponível indica que muitos destes solos são rasos, pedregosos e com baixos teores de matéria orgânica, além de apresentarem elevada heterogeneidade entre e dentro das ilhas. Esta situação compromete a sua fertilidade natural e dificulta a aplicação direta de sistemas internacionais de classificação, como a World Reference Base for Soil Resources (WRB), pela falta de dados analíticos consistentes para enquadramento (Madeira & Pinto, 2014).

A produção agrícola nacional é estruturalmente insuficiente para responder às necessidades da população, resultando numa forte dependência externa. Estima-se que cerca de 80% dos alimentos consumidos sejam importados. Esta dependência torna o setor agrícola particularmente vulnerável às oscilações climáticas e aos custos crescentes dos insumos, dificultando também a adoção de práticas de fertilização e de gestão em explorações de pequena escala (Monteiro et al., 2020; FAO, 2022).

Em resposta a estes desafios, organismos nacionais e parceiros internacionais tem vindo a sublinhar a necessidade de reforçar a gestão sustentável da fertilidade do solo, a promoção de práticas de agricultura inteligente, a conservação dos recursos edáficos e hídricos e o estímulo à cooperação técnica. Contudo, persistem lacunas críticas, como a escassez de dados analíticos contínuos, a baixa cobertura cartográfica dos solos em várias ilhas, a limitada evidência empírica sobre a resposta das culturas à fertilização e as barreiras tecnológicas que ainda afetam grande parte das zonas rurais (Madeira & Pinto, 2014; FAO, 2022).

2.4.1. Caracterização dos solos

A base edáfica de Cabo Verde é predominantemente de origem vulcânica, resultando em solos jovens e com forte heterogeneidade intra- e inter-ilhas. Os estudos

de Madeira e Pinto (2014) mostraram que estes solos são, em geral, rasos, pedregosos, com reduzida profundidade efetiva e baixa capacidade de retenção de água, o que os torna particularmente vulneráveis à erosão hídrica e eólica. Essa vulnerabilidade é acentuada pela distribuição irregular da precipitação, muitas vezes concentrada em curtos períodos, provocando escorrência superficial e arrastamento de partículas férteis.

Um dos problemas estruturais mais recorrentes é o baixo teor em matéria orgânica, consequência da reduzida cobertura vegetal e da intensa mineralização em condições semiáridas. Essa limitação compromete a CTC, restringindo a retenção e disponibilização de macronutrientes essenciais como Ca, Mg e K (Monteiro et al., 2020). O baixo teor de matéria orgânica, associado ao fraco aporte de resíduos vegetais, explica a baixa fertilidade natural observada na maioria das áreas agrícolas do arquipélago.

Outro aspecto crítico é a fixação do P, fenómeno comum em solos de origem vulcânica com elevada concentração de óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Essa fixação reduz significativamente a fração assimilável do nutriente, afetando diretamente processos fisiológicos como o crescimento radicular e a frutificação. Madeira e Pinto (2014) sublinham que esta limitação é particularmente evidente em Santiago, ilha onde à intensificação agrícola em perímetros irrigados, como o de Pedra Badejo, coloca maior pressão sobre a gestão da fertilização fosfatada.

Por fim, a literatura destaca a insuficiência de cartografia edáfica sistemática. Apesar dos avanços no conhecimento local, a ausência de levantamentos analíticos contínuos dificulta o enquadramento consistente destes solos nos sistemas internacionais de classificação, como WRB, e limita a definição de recomendações de fertilização adaptadas às condições locais (Madeira & Pinto, 2014).

2.4.2. Sistema de produção agrícola

O sistema agrícola cabo-verdiano caracteriza-se por uma marcada dualidade entre a agricultura de sequeiro, dominante, e a agricultura irrigada, mais restrita. Segundo Monteiro et al. (2020), aproximadamente 81,9% da área cultivada corresponde a sequeiro, onde predominam culturas de subsistência como o milho (*Zea mays*) e o feijão (*Phaseolus vulgaris*), frequentemente em regime consociado. Estas culturas apresentam baixos rendimentos médios, fortemente condicionados pela variabilidade pluviométrica, e destinam-se sobretudo ao autoconsumo familiar.

Em contraste, a agricultura irrigada, que representa cerca de 16,8% da área cultivada, é praticada maioritariamente em perímetros hidroagrícolas e áreas costeiras, onde se produzem culturas de maior valor comercial, como a cana-de-açúcar, tomateiro e diversas outras hortícolas e frutícolas tropicais (bananeira, papaeira, mangueira). A ilha de Santiago assume destaque neste contexto, concentrando cerca de 52,5% da área agrícola nacional, com forte expressão na região de Pedra Badejo, onde o perímetro irrigado de Ribeira dos Picos tem permitido alguma diversificação produtiva (Monteiro et al., 2020).

Apesar do potencial produtivo, a agricultura irrigada enfrenta limitações relacionadas com a disponibilidade e a qualidade da água de rega. Estudos hidrogeológicos mostraram que em Santiago a exploração intensiva de aquíferos, sobretudo em zonas costeiras, tem levado ao aumento da CE das águas subterrâneas utilizadas na rega, associado ao avanço da intrusão salina. Esta situação representa um risco de salinização dos solos irrigados e pode comprometer a produtividade das culturas sensíveis à salinidade, levando, assim, a um condicionamento na eficiência da absorção de nutrientes (Shahidian et al., 2014). Para mitigar este efeito, recomenda-se a adoção de estratégias como rega gota-a-gota, a monitorização contínua da CE do solo e a integração de práticas de lixiviação controlada (Ayers & Westcot, 1985).

Em termos gerais, agricultura em Cabo Verde continua a ser marcada por um forte domínio do setor de sequeiro e por rendimentos limitados. Contudo, a expansão da irrigação localizada e a introdução de práticas de agricultura de precisão em perímetros como o de Colonato, em Santiago, apontam para caminhos de maior eficiência no uso da água e dos nutrientes, criando oportunidades para melhorar a fertilidade do solo e a nutrição mineral das plantas em condições semiáridas (Tavares, 2019).

2.4.3. Principais limitações agrícolas em Cabo Verde

Em Cabo Verde o sector agrícola tem limitações de natureza climática, edáfica e socioeconómica. Do ponto de vista climático, o arquipélago está sujeito a uma forte irregularidade da precipitação, alternando entre secas prolongadas e chuvas torrenciais, frequentemente concentrados em curtos períodos. Estes fenómenos, que se devem ao relevo acidentado da ilha, levam à formação de solos poucos desenvolvidos com profundidade efetiva reduzida, condicionando a capacidade produtiva e a disponibilidade de nutrientes para as culturas (Madeira & Pinto, 2014; Monteiro et al., 2020).

A nível edáfico, os solos são predominantemente de origem vulcânica, e são caracterizados por um fraco desenvolvimento, com uma profundidade efetiva reduzida e grande suscetibilidade à erosão hídrica, factores esses que interferem negativamente a capacidade produtiva das culturas (Madeira e Pinto, 2014). Em sistemas onde se faz irrigação, com a utilização de águas subterrâneas com salinidade elevada, pode aumentar o risco de salinização do solo, limitando a produtividade das culturas (Ayers & Westcot, 1985; Shahidian et al., 2014).

A dimensão socioeconómica da agricultura constitui um fator adicional de vulnerabilidade em Cabo Verde. A predominância de explorações de pequena escala, associada à elevada dependência de importações alimentares, que ultrapassam 80% das necessidades alimentares do país, acaba por condicionara capacidade de investimentos dos produtores e torna difícil a adoção de práticas modernas de gestão de fertilização. Em conjunto com as outras limitações acima referidas, estes fatores acabam por levar a rendimentos médios baixos, constituindo uma barreira na construção de sistemas agrícolas com mais sustentabilidade e resiliência em Cabo Verde (Monteiro et al., 2020; FAO, 2022).

2.4.4. Situação agrícola em Ribeira dos Picos (Chã da Silva)

A localidade de Chã da Silva, integrada na Ribeira dos Picos (município de Santa Cruz, ilha de Santiago, freguesia de Santiago Maior), constitui uma área de expressão agrícola significativa, onde predomina a agricultura familiar de pequena escala, praticada sobretudo em regime de sequeiro (Câmara Municipal de Santa Cruz, 2012). As culturas tradicionais de milho e feijão continuam a garantir a subsistência alimentar das famílias rurais, ao passo que hortícolas e fruteiras tropicais, como bananeira e coqueiro (*Cocos nucifera*), representam alternativas de rendimento para abastecimento dos mercados locais e regionais (Monteiro et al., 2020).

Historicamente, a Ribeira dos picos foi considerada uma das zonas agrícolas mais importantes de Cabo Verde, mas o isolamento infraestrutural dificultava o escoamento da produção. Esta limitação foi parcialmente superada com a reabilitação da estrada rural em 2022, ação que permitiu reforçar a ligação entre os agricultores locais e os principais centros de comercialização, como Pedra Badejo e Praia (World Bank, 2021; Governo de Cabo Verde, 2022; Inforpress, 2022).

Chã da Silva caracteriza-se pelo predomínio de explorações familiares, baixo acesso a insumos modernos e dependência acentuada das oscilações climáticas. Esta vulnerabilidade local reflete a realidade nacional. Cabo verde importa mais de 80% dos alimentos consumidos, revelando fragilidades estruturais do setor e a necessidade de fortalecer estratégias de resiliência agrícola, com foco na fertilidade do solo e na nutrição mineral das culturas (FAO, 2022).

2.4.5. Caracterização da fertilização, desafios e perspectivas

A fertilização agrícola tem evoluído de forma gradual em Cabo Verde, sendo dominada pelo uso de fertilizantes minerais, com destaque para compostos azotados, dada a sua eficácia no incremento da produtividade de algumas culturas da região. Os fertilizantes mais utilizados no arquipélago incluem a ureia, o sulfato de amónio e fertilizantes fosfatados, aplicados sobretudo em sistemas de pequena escala nas zonas de regadio. A escolha dos fertilizantes é condicionada pela cultura em causa, pela acessibilidade financeira e pelas campanhas de distribuição organizada pelas autoridades públicas. Em muitos contextos, a aplicação ocorre de forma empírica, sem suporte de análise de solo, o que compromete a eficiência agronómica da fertilização e pode conduzir a desequilíbrios nutricionais. Estas práticas, associadas à fragilidade da base edáfica e a elevada suscetibilidade à degradação, demonstra a maior necessidade de práticas de gestão da fertilidade do solo integradas em estratégias de conservação do solo e da água, no contexto da mitigação da desertificação em Cabo Verde (Santos, 2016; Monteiro et al., 2020; FAO, 2022).

Paralelamente, como fertilização orgânica faz-se a aplicação de estrumes de animais, resíduos vegetais e matérias compostadas, como forma de reposição parcial da matéria orgânica no solo. Entretanto, nos solos frágeis e sujeitos a degradação, a incorporação da matéria orgânica nem sempre ocorre em quantidade suficiente para compensar a perda de nutrientes e melhorar de forma duradoura a capacidade de retenção do solo. Atendendo ao contexto, vem sendo salientada a importância de estratégias integradas na gestão da fertilidade do solo, interligando fontes orgânicas e minerais e práticas de conservação do solo, como via para o aumento da eficiência do uso de nutrientes, promovendo assim a sustentabilidade agrícola em Cabo verde (Madeira & Pinto, 2014; Santos, 2016;).

3. Materiais e métodos

3.1. Enquadramento geográfico e descrição do estudo

O trabalho foi desenvolvido na localidade de Chã da Silva, situada em Ribeira dos Picos, localizado no concelho de Santa Cruz, cidade de Pedra Badejo, freguesia de Santiago Maior, ilha de Santiago, Cabo Verde. Chã da Silva é conhecida pela sua relevância agrícola, sendo uma das principais regiões de produção agrícola do país. Os produtos provenientes da região abastecem todos os mercados da região da ilha de Santiago e das outras ilhas (Figura 1).

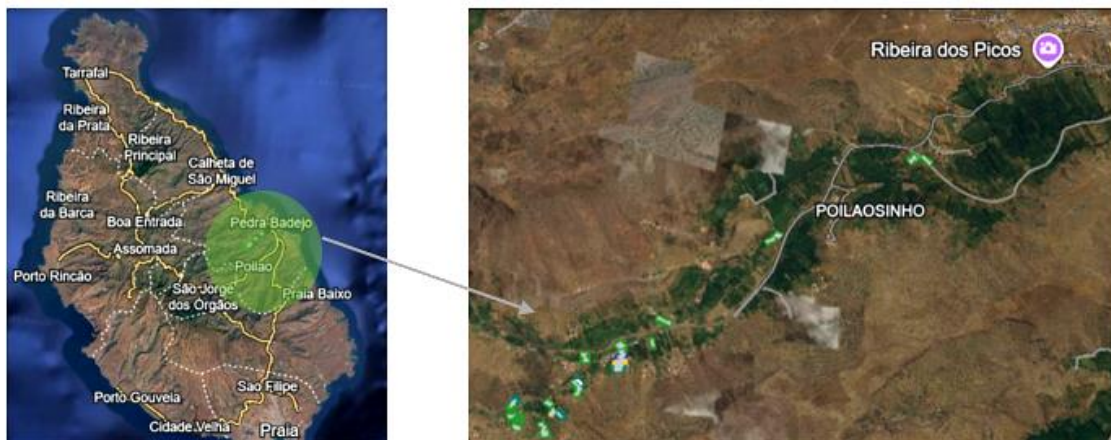


Figura 1- Localização geográfica da zona de estudo.

A região destaca-se pelas temperaturas médias mensais que se mantêm relativamente elevadas e estáveis, oscilando entre 22°C em janeiro e fevereiro e 27°C nos meses mais quentes, de agosto a outubro.

As temperaturas máximas atingem valores próximos de 30 a 31°C no final do verão, enquanto as mínimas raramente descem abaixo de 19°C, verificando-se uma amplitude térmica anual reduzida, típica de climas tropicais insulares.

No que respeita à precipitação, constata-se um regime pluviométrico fortemente irregular e concentrado. Entre janeiro e junho, a pluviosidade é praticamente inexistente, registando valores residuais inferiores a 5 mm. A estação chuvosa inicia-se em junho, atingindo o seu pico em setembro. Este padrão confirma a predominância de um clima semiárido quente (BSh, segundo a classificação de Köppen-Geiger), caracterizado por uma estação seca prolongada e uma estação húmida curta, associada a precipitações concentradas em poucos episódios (Figura 2).

A análise conjunta dos parâmetros evidencia a elevada pressão hídrica a que a região está sujeita, uma vez que a maior parte do ano decorre sem precipitação significativa, enquanto as temperaturas permanecem elevadas. Esta combinação de fatores condiciona fortemente as atividades agrícolas e a gestão dos recursos hídricos, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação ao défice hídrico estrutural da região.

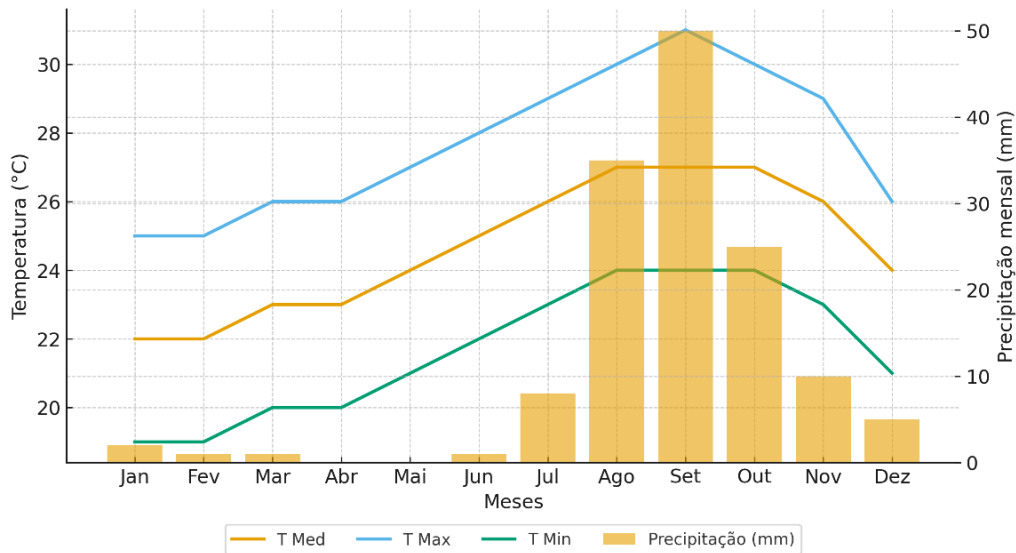


Figura 2-Temperaturas médias, máximas e mínimas e precipitação mensal em Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo verde). Dados adaptados de Weather Spark (s.d.) e Weather Atlas (s.d.).

3.2. Descrição das áreas cultivadas e dos compassos de plantação

Os campos onde foi conduzido o estudo pertencem a diferentes proprietários, cada um com o seu próprio sistema de plantação e condução das culturas, sendo que os compassos agrícolas utilizados em cada área já estavam previamente estabelecidos pelos respetivos proprietários, de acordo com as suas práticas de cultivo.

Entre as culturas analisadas, a bananeira foi a mais representada, estando presente em 16 das 26 amostras retiradas. Todos os campos dedicados a esta cultura seguem o modo de produção convencional, com predomínio do sistema de rega gota-a-gota, com exceção de dois casos onde se verificou o uso de rega tradicional por alagamento. As áreas de cultivo das amostras variam entre os 424 m² e 1500 m², com compassos predominantemente de 2 m × 2 m, em exceção de Banana Sérgio 01 – Amostra 01, que tem um compasso de 1,5 m × 1,5 m e Banana Tuni 01 - Amostra 01 e Banana Beba 01 -

Amostra 01 que não têm registos de compassos. Em termos de fertilização, em todas as culturas são aplicados fertilizantes químicos. Os terrenos são na sua maioria planos, com exceção do terreno onde se encontram as culturas identificadas como Banana Nelo João Touro Encosta desde a amostra 02 a 04 (Quadro 1).

Quadro 1- Caracterização da cultura da bananeira (produção convencional, com fertilização) nas 16 amostras de terrenos agrícolas estudados na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.

Número da amostra	Cultura	Área (m ²)	Compasso	Rega	Declive
13	Banana Nelo João Touro Encosta 01- Amostra 01	1115,96	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
2	Banana Nelo João Touro Encosta 01- Amostra 02	1327,03	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Moderado
1	Banana Nelo João Touro Encosta 01- Amostra 03	1481,12	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Acentuado
4	Banana Nelo João Touro Encosta 01- Amostra 04	898,86	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Moderado
24	Banana Nelo João Touro Ribeira 01- Amostra 01	1085,32	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
25	Banana Nelo Chã de Casa Ribeira 01- Amostra 01	1226,92	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
12	Banana Nelo Gueta Ribeira 01 - Amostra 01	978,96	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
14	Banana Nelo Gueta Ribeira 02 - Amostra 01	586,08	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
9	Banana Mena 01 - Amostra 01	876,05	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
7	Banana João 01 - Amostra 01	525,44	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
20	Banana Sérgio 01 - Amostra 01	583,24	1,5 m × 1,5 m	Alagamento	Nivelado
17	Banana Di 01 - Amostra 01	666,50	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
19	Banana Tuni 01 - Amostra 01	423,77	...	Alagamento	Nivelado
11	Banana Beba 01 - Amostra 01	1500,51	...	Alagamento	Nivelado
6	Banana Ângelo 01 - Amostra 01	863,33	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado
23	Banana Ângelo 02 - Amostra 01	1396,77	2 m × 2 m	Gota-a-gota	Nivelado

Na cultura da papaveira foram retiradas três amostras, sendo a produção do tipo convencional, com utilização de adubos e produtos fitossanitários. A rega é assegurada por meio de sistema gota-a-gota, o compasso de plantação observado nos terrenos foi de 2,5 m × 2,5 m. As áreas de cultivo das amostras situam-se entre 702 m² e 1417 m². Quanto ao relevo, identificaram-se situações com declive acentuado, moderado e nivelado (Quadro 2).

Quadro 2- Caracterização da cultura da papaeira (produção convencional, com fertilização) nas 3 amostras de terrenos agrícolas realizadas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.

Número da amostra	Cultura	Área (m ²)	Compasso	Rega	Declive
10	Papaia Nelo Chã de Casa Ribeira 01 - Amostra 01	1416,92	2,5 m × 2,5 m	Gota-a-gota	Acentuado
22	Papaia Nelo Chã de Casa Encosta 01 - Amostra 01	773,8	2,5 m × 2,5 m	Gota-a-gota	Nivelado
15	Papaia Gueta Di 01- Amostra 01	701,86	...	Gota-a-gota	Moderado

Nas culturas hortícolas (pimentão e tomateiro) foram retiradas quatro amostras. Na cultura do pimentão foram retiradas 3 amostras e uma amostra na cultura do tomateiro. Todas com o modo de produção convencional, com recurso a adubo e produtos fitossanitários e um sistema de rega gota-a-gota. No caso do pimentão, o compasso de plantação observado foi de 0,4 m × 0,7 m, enquanto no tomateiro foi registado um compasso de 0,65 m × 2 m. Essa distância das entrelinhas deve-se à construção de patamares por causa da inclinação do terreno. As áreas cultivadas onde foram retiradas as amostras de pimentão variam entre 138 m² e 206 m², sendo a do tomateiro de 1967 m² (Quadro 3).

Quadro 3- Caracterização das culturas hortícolas - pimentão e tomateiro - (produção convencional, com fertilização) nas quatro amostras retiradas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, rega e declive.

Número da amostra	Cultura	Área (m ²)	Compasso	Rega	Declive
21	Pimentão Nelo Sarradona 01 - Amostra 01	174,53	0,4 m × 0,7 m	Gota-a-gota	Moderado
3	Pimentão Nelo Sarradona 01 - Amostra 02	205,52	0,4 m × 0,7 m	Gota-a-gota	Moderado
5	Pimentão Nelo Sarradona 01 - Amostra 03	137,87	0,4 m × 0,7 m	Gota-a-gota	Moderado
18	Tomate Nelo Sarrado 01- Amostra 01	1967,24	0,65 m × 2 m	Gota-a-gota	Acentuado (Socalco)

As restantes culturas correspondem à mangueira, mandioqueira e cana-de-açúcar. A mangueira é feita em modo convencional com fertilizantes. A mandioqueira com fertilizantes orgânicos e a cana-de-açúcar sem fertilizantes. As três culturas estão instaladas em áreas e compassos de plantação diferentes, com sistema de rega gota-a-gota, com exceção da cultura da mangueira. Em relação ao relevo a mandioqueira

encontra-se localizada em um terreno plano e a cana-de-açúcar e a mangueira em terrenos com declive moderado (Quadro 4).

Quadro 4- Caracterização das culturas de mangueira, cana-de-açúcar e mandiocqueira (produção convencional) amostradas na localidade de Chã da Silva, Ribeira dos Picos (Cabo Verde), em relação ao compasso, fertilização, rega e declive.

Número da amostra	Cultura	Área (m ²)	Compasso	Fertilização	Rega	Declive
16	Mangueira Nelo 01 - Amostra 01	771,91	4 m × 5 m	Sequeiro	Gosta-a-gota	Moderado
8	Mandioca Meno 01 - Amostra 01	506,15	...	Gota-a-gota	Gosta-a-gota	Nivelado
26	Cana Gueta Bilau 01- Amostra 01	1186,56	0,9 m × 1 m	Alagamento	Gosta-a-gota	Moderado

Após a identificação e sistematização dos quadros representativos das parcelas de terreno onde foi desenvolvido o trabalho, procedeu-se à utilização de uma imagem de satélite obtida através da plataforma Google Earth (Figura 3). Esta imagem constitui uma ferramenta cartográfica essencial, uma vez que permite não apenas a localização espacial das parcelas, mas também a visualização das suas delimitações, dimensões relativas e enquadramento no território envolvente.

A representação gráfica das parcelas em imagem de satélite oferece uma visão panorâmica que possibilita compreender a organização espacial da área em estudo. Para além de facilitar a percepção da distribuição das culturas e da sua inserção no espaço agrícola, a imagem permite ainda observar a relação das parcelas com infraestruturas locais, tais como estradas, zonas habitacionais e áreas de vegetação natural. Desta forma, a análise visual complementa a informação descritiva, criando uma base sólida para a compreensão do contexto geográfica.

A utilização deste recurso acrescenta ainda uma dimensão prática à investigação, na medida em que contribui para a verificação da coerência entre os dados recolhidos no terreno e a sua localização real. Permite igualmente identificar eventuais condicionantes físicas, como declives, áreas de difícil acesso, que podem influenciar o uso agrícola do solo e a dinâmica da sua produção.



Figura 3-Delimitações da área de estudo com destaques para as parcelas agrícolas em imagem de satélite (Google Earth).

Em termos metodológicos essa abordagem revela-se particularmente útil, pois confere transparência e rigor ao processo de caracterização da área estudada. A integração da cartografia por satélite com descrição das parcelas reforça a credibilidade científica do trabalho, ao proporcionar evidência visual que sustenta as observações.

Na figura 4 encontram-se representados alguns terrenos agrícolas onde foram realizadas as recolhas de amostras de solo e de folhas das culturas. A inclusão destas fotografias tem como objetivo proporcionar uma contextualização visual dos locais de amostragem, permitindo não apenas a contextualização da realidade agrícola observada, mas também a identificação dos habitats e condições edafoclimáticas em que as culturas se encontram inseridas.

Este registo visual contribui para a análise mais aprofundada, ao evidenciar fatores como a disposição espacial da cultura, o estado fitossanitário das plantas, a cobertura do solo e a diversidade estrutural da paisagem envolvente. A associação entre os dados laboratoriais obtidos e a observação direta do meio onde as culturas se desenvolvem permite uma compreensão mais abrangente dos sistemas de produção, favorecendo uma interpretação crítica e fundamentada dos resultados.

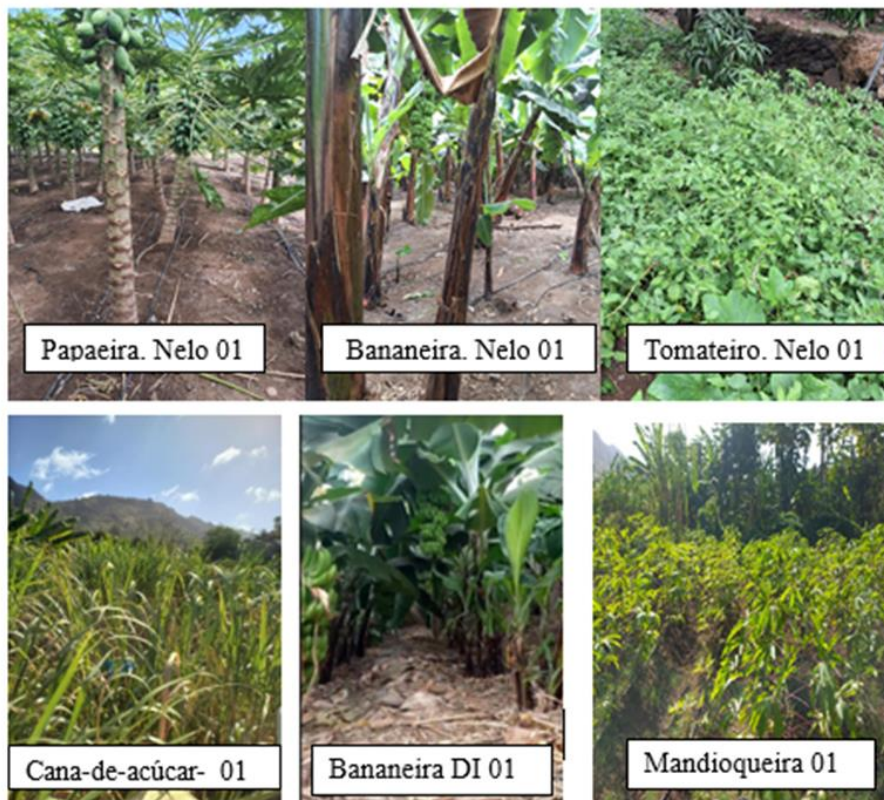


Figura 4- Registos fotográficos dos pontos de amostragem dos locais de recolha das amostras de solo e de folhas das culturas em estudo.

Figura 5- Materiais utilizados na colheita das amostras de solo.

A profundidade de colheita das amostras foi determinada com auxílio a uma régua, onde a profundidade tomada para a colheita foi de 20 cm, tendo assim em conta as recomendações de Veloso et al. (2022).

A colheita de folhas realizou-se manualmente, sendo estas introduzidas nos saquinhos de plásticos devidamente identificados, com as exigências similares às das colheitas dos solos.

3.4. Colheita das amostras de solos e folhas

Anteriormente foi explicado de uma forma genérica os procedimentos utilizados para colheita das amostras. Na figura 6 mostra-se a técnica em ziguezague habitualmente usada nestes procedimentos.

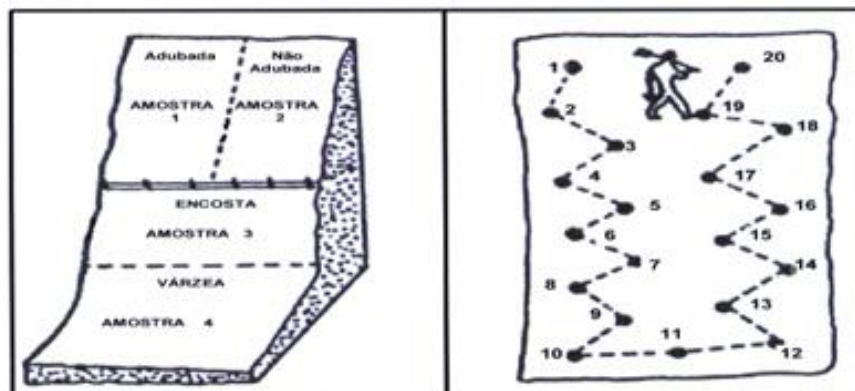


Figura 6- Esquema de recolha de amostras de solo em ziguezague e por zonas homogéneas. Retirado de Veloso et al. (2022).

3.4.1. Colheita de amostras de solos

A bananeira constituiu a cultura mais representada neste estudo, com 16 amostras em 13 terrenos distintos. A colheita seguiu o procedimento padrão. A colheita do solo em cada terreno foi feita sob a copa da planta, a uma distância de 50 cm do tronco. As subamostras obtiveram-se em 4 pontos ao pé de cada bananeira, dando uma volta completa à planta (Figura 7). Cada amostra foi, assim, composta de 4 subamostras, obtidas nos 4 pontos de colheita diferentes. Cada amostra continha 50 a 70 g de solo. Nas papaeiras, os procedimentos de colheita das amostras foram iguais aos da bananeira, sendo a colheita feita em 3 terrenos diferentes. Na mangueira amostrou-se um só terreno, sendo colhidas 5 subamostras para constituir uma única amostra. Na mandioqueira, sendo

uma cultura diferente em relação ao compasso de plantação, a colheita de solo foi feita a 10 cm de distância da planta, no sulco que é feito para o sustento das raízes. A amostra também continha 50 a 70 g de solo, resultado de 9 pontos de amostragem. A colheita da amostra no tomateiro foi estabelecida em 10 pontos diferentes junto ao pé de um tomateiro, usando 10 subamostras para compor a amostra.

Na amostragem da cultura do pimentão, o terreno foi dividido em 3 partes, devido à diversidade do relevo, resultando em três amostras diferentes, compostas de sete subamostras. Em uma das parcelas, designada de Pimentão Nelo Saradona 01- Amostra 01, fizeram-se apenas cinco pontos de colheita (cinco subamostras).



Figura 7- Exemplo da colheita de solos na bananeira feitas em quatro pontos, dando uma volta completa à planta.

3.4.2. Colheita das amostras de folhas

No mesmo ponto onde foram colhidas as amostras dos solos, foram colhidas as amostras das folhas, em relação às culturas arbóreas (bananeira, papaeira, mangueira). No momento da recolha das amostras, as plantas encontravam-se predominantemente em estágio de desenvolvimento vegetativo, correspondente à fase de desenvolvimento foliar da escala BBCH (BBCH 10-19), caracterizada pela presença de folhas completamente expandidas e metabolicamente ativas (Meier, 2018). Contudo, observou-se também a presença de frutos em desenvolvimento, particularmente nas culturas da bananeira e da papaeira, correspondendo aos estádios de desenvolvimento dos frutos (BBCH 70-79) (Meier, 2018). Esta coexistência de crescimento vegetativo e reprodutivo é frequentemente observado em culturas tropicais de crescimento contínuo (Nakasone &

Paul,1998). As folhas foram colhidas dando a volta completa às plantas, colhendo em todos os quadrantes (Figura 8). Foram colhidas folhas jovens adultas, com o limbo completamente expandido. Na bananeira, papaieira e mangueira foram retirados pedaços de folha em quatro folhas distintas, em que a parte colhida foi o terço médio da folha.



Figura 8- Exemplo da colheita de cada subamostra feita à volta da copa das culturas perenes.

Na cultura da mandiocueira, a colheita seguiu o padrão de colheita das amostras do solo. Foram retiradas cinco folhas nos nove pontos de colheita, originando uma amostra. Na cultura do pimentão, seguiu-se o mesmo padrão que a colheita dos solos. Sendo as plantas jovens, colheram-se quatro folhas por amostra em cada uma das três parcelas de terreno dividido, dando assim origem a três amostras diferentes. Na cultura do tomateiro, a colheita de folhas seguiu também o padrão da colheita de solos. Colheram-se seis folhas de tomateiro, em diferentes pontos do terreno, no terço médio da copa.

3.5. Armazenamento e cuidado com as amostras

Depois de colhidas, as amostras de solo e de folhas foram colocadas em um ambiente aberto, exposto ao sol, para uma adequada secagem (Figura 9).



Figura 9- Local de secagem das amostras de solos e folhas.

Após nove dias de exposição solar, e confirmada a completa secagem das amostras, estas foram devidamente acondicionadas: as amostras de solo em sacos distintos das amostras foliares, sendo posteriormente reunidas num único invólucro, hermeticamente selado com fita adesiva para impedir a entrada de ar. O conjunto foi colocado numa mala de transporte e encaminhado para Portugal, com destino ao Laboratório de Solos do Instituto Politécnico de Bragança.

3.6. Procedimentos para análises dos solos e tecidos vegetais

Chegadas ao laboratório de solos, as amostras foram colocadas em uma estufa de ventilação forçada regulada a 70°C durante dois dias (Figura 10).



Figura 10- Amostras em processo de secagem estufa de ventilação forçada.

Após secagem, as amostras foliares foram submetidas a moagem no moinho Cyclotec™ (Foss), de modo a obter uma granulometria fina e homogénea (diâmetro das partículas de 1 mm), adequada à execução das análises químicas previstas (Figura 11).



Figura 11- Preparação das amostras para análise.

Após este processo de preparação, as amostras encontravam-se prontas para as análises laboratoriais. No caso das amostras de solo, foram realizadas determinações de i) matéria orgânica, ii) pH em água, iii) P e K extraíveis, iv) CE do solo, v) Ca, Mg, K e Na e acidez de troca e calculada a CTC efetiva, e vi) micronutrientes B, Fe, Zn, Cu e Mn. Relativamente às amostras foliares, procedeu-se à determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Cu e Mn, permitindo avaliar o estado nutricional das plantas e estabelecer a relação com a disponibilidade de nutrientes no solo.

3.7. Análises de solos

Foram usados os métodos analíticos em vigor no Laboratório de Análises de Solos e Plantas da Escola Superior Agrária.

3.7.1. Matéria orgânica

A matéria orgânica do solo foi determinada pelo método de oxidação húmica de Walklev-Black, amplamente utilizado devido à sua simplicidade e aplicabilidade em solos tropicais. O teor de carbono orgânico é calculado a partir da quantidade de ião crómio formado a partir de dicromato de potássio, utilizando um método de titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal (Van Reeuwijk, 2002).

No procedimento, 1 g de solo seco foi colocado em erlenmeyer de 250 ml, ao qual se adicionaram 10 ml de solução de dicromato de potássio e 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após 30 minutos de reação, foram adicionados 200 mL de água destilada e três gotas de indicador fenantrolina, procedendo-se de seguida à titulação com solução 0,5 M de sulfato de ferro amoniacal até à mudança de cor. Foi acrescentado um ensaio em branco.

Determinou-se o teor de carbono facilmente oxidável (%C) a partir da titulação usando a expressão:

$$\%C = \frac{(B-S) * 0,5 M * 12}{1g * 4000} * 100$$

Onde:

B = ml de sulfato de ferro amoniacal usados na titulação do branco

S = ml de sulfato de ferro amoniacal usados na titulação da amostra

0,5 M = Concentração da solução de sulfato de ferro amoniacal

1g = massa da amostra

$\frac{12}{4000}$ = peso de um miliequivalente de carbono

O teor de matéria orgânica do solo (%) foi determinado, multiplicando %C pelo fator 1,724, correspondente à suposição de que a matéria orgânica contém, em média, 58% de C (Van Reeuwijk, 2002).



Figura 12- Determinação da matéria orgânica pelo método Walkley-Black.

3.7.2. pH

O pH do solo é uma medida da acidez ou alcalinidade do solo. Foi determinado o pH em água, com uma relação solo : água de 1 : 2,5 (p/v). Para tal, pesaram-se 10 g de solo seco, às quais se adicionou 25 mL de água destilada. A suspensão foi agitada durante

2 horas. A leitura de pH foi realizada utilizando um potenciômetro Mettler Toledo previamente calibrado (Van Reeuwijk, 2002).



Figura 13- Leitura do pH (Potenciômetro Mettler Toledo)

3.7.3. Fósforo e potássio

A determinação do P e do K disponível para as plantas foi realizado de acordo com o método de Égner-Riehm. Para o efeito, pesaram-se 2 g de solo, às quais se adicionaram 40 mL de solução extrativa, constituída por lactato de amónio e ácido acético. As suspensões foram submetidas a agitação durante 2 horas e, posteriormente, filtradas. O P disponível foi quantificado por espectrofotometria molecular a 882 nm (GENESYS 6), enquanto o K disponível foi determinado por fotometria de chama num fotómetro JENWAY PFP7 (Van Reeuwijk, 2002).

3.7.4. Condutividade elétrica

Para determinação da CE, pesaram-se 10 g de solo seco ao ar, transferidos para frascos de agitação, adicionando-se 100 mL de água desionizada. As suspensões foram agitadas durante 60 minutos e filtrados de seguida. A CE do extrato foi medida num condutivímetro previamente calibrado com solução padrão KCl 0,01 M ($1413 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C) (Van Reeuwijk, 2002).

3.7.5. Complexo de troca

A caracterização do complexo de troca consiste na avaliação das concentrações em Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ e Na^+ , expressas em $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ às quais, por vezes acresce as

concentrações dos iões H^+ e Al^{3+} . A determinação prévia do pH indicou não ser necessária a avaliação da acidez de troca por estar ausente em valores de pH como os dos solos deste trabalho. Para determinação das bases de troca, pesaram-se 2,5 gramas de solo, às quais se adicionou uma solução de acetato de amónio tamponizada a pH 7,0, procedimento clássico e amplamente validado para a extração de catiões trocáveis em análises de fertilidade do solo (Van Reeuwijk, 2002). A suspensão foi submetida a agitação durante 30 minutos para garantir a saturação completa dos sítios de troca do complexo coloidal, sendo posteriormente filtrada. Os catiões Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ e Na^+ foram quantificados por espectrofotometria de absorção atómica (PERKIN ELMER).

3.7.6. Micronutrientes

3.7.6.1. Boro

Para determinação do B disponível, pesaram-se 10 g de solo em sacos plásticos, aos quais se adicionaram 20 mL de solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$). Os sacos foram hermeticamente selados e colocados em banho de água fervente durante 10 minutos. Após esse período, foram retirados, deixados a arrefecer e o conteúdo foi posteriormente filtrado para frascos de polietileno, com o auxílio de papel de filtro.

A determinação da concentração de B foi realizada após o desenvolvimento de cor pela reação do reagente azometina-H, sendo a leitura efetuada em espectrofotómetro de absorção molecular a 420 nm (Van Reeuwijk, 2002).

3.7.6.2. Cobre, ferro, zinco e manganês

Os micronutrientes foram determinados segundo o método clássico descrito por Lindsay e Norvell (1978), que utiliza o agente quelante DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético) como extrator eficiente para avaliar a fração biodisponível de elementos no solo. Para a análise, pesaram-se 10 gramas de solo, que foram misturados com a solução de DTPA e submetidos à agitação contínua durante 2 horas, assegurando adequada complexação dos catiões metálicos com o quelante. Após este período, a suspensão foi filtrada, e os catiões extraídos foram quantificados por espectrofotometria de absorção atómica.

3.8. Análises dos tecidos vegetais

Nos tecidos vegetais foi determinada a concentração dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Zn e Mn seguindo as metodologias em vigor no Laboratório de Análises de Solos e Plantas da Escola Superior Agrária e descritos por Temminghoff e Houba (2004).

3.8.1. Azoto

A concentração de N total foi determinada através do método Kjeldahl, o qual se baseia na digestão sulfúrica da amostra na presença de um catalisador de cobre, seguida de destilação a vapor e titulação para quantificação do ião amónio (NH_4^+) em ácido bórico com indicador misto.

Para a análise, aproximadamente 1 g de matéria seca foi pesada e colocada num frasco de digestão. Adicionaram-se 15 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), concentrado e duas pastilhas de catalisador, com o objetivo de acelerar a taxa de oxidação da matéria orgânica. O frasco foi colocado num bloco de digestão de alumínio e mantido a 420°C durante 1 hora 20 minutos. Após a digestão e arrefecimento, o N amoniacal foi determinado por destilação. A amónia formada foi arrastada pela corrente de vapor e titulada com ácido clorídrico em recipiente contendo solução de ácido bórico e os indicadores verde de bromocresol e vermelho metilo.



Figura 14- Equipamento utilizados no processo de determinação de azoto.

3.8.2. Boro

Na determinação do B nos tecidos vegetais procedeu-se da seguinte forma: inicialmente, pesou-se 1 g de matéria seca, transferida para cadinhos de porcelanas, aos

quais foram adicionados 0,10 g de óxido de cálcio (CaO), cuidadosamente misturados até completa homogeneização. Em seguida, os cadinhos foram colocados em mufla a aproximadamente 500°C, durante 1 hora e 50 minutos, promovendo a incineração da amostra e consequente eliminação da matéria orgânica. Após o arrefecimento, adicionaram-se 10 mL de H₂SO₄, deixando a mistura em repouso por 30 minutos, com agitações periódicas, e seguida de filtração para obtenção do extrato claro.

Do filtrado, pipetou-se 1 mL, ao qual foram adicionados 2 mL de solução tampão de acetato de amônio com EDTA de sódio e 2 mL de solução de azometina-H. Após agitação, as amostras permaneceram em repouso por 30 minutos para o completo desenvolvimento da cor amarelada característica do complexo formado. A quantificação foi realizada em espectrofotómetro de absorção molecular a 420 nm.

3.8.3. Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês

A quantificação dos macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Cu, Fe, Zn e Mn) foi realizada a partir da digestão de 0,25 g de material vegetal seco e moído em forno de micro-ondas (MARS, CEM Corporation), utilizando ácido nítrico (HNO₃) concentrado. O extrato obtido foi diluído para um volume final de 50 mL.

O P foi determinado por espectrofotometria UV/VIS, com base no desenvolvimento da coloração azul de molibdénio, em que o ácido ascórbico atuou como agente redutor. A intensidade da cor foi medida num espectrofotómetro a 882 nm, correspondendo ao complexo fosfomolibdato de amónio.

O K foi determinado por fotometria de chama, enquanto os elementos Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atómica.

4. Resultados

4.1. Propriedades do solo

4.1.1. Matéria orgânica

A matéria orgânica do solo variou com as culturas e terrenos amostrados (Figura 15). No caso da bananeira, os valores situaram-se maioritariamente na classe baixa (< 1,5 %), observando-se apenas uma amostra na zona classificada com teor médio de matéria orgânica. A papaeira seguiu a mesma tendência, com as três amostras a surgirem com teores baixos de matéria orgânica. O pimentão, em três amostras, registou uma na zona alta, outra na zona média e uma na zona baixa, mas muito próxima do limite com a zona média. As amostras de mandioqueira e mangueira mostraram teores baixos de matéria orgânica e as de tomateiro e cana-de-açúcar teores médios.

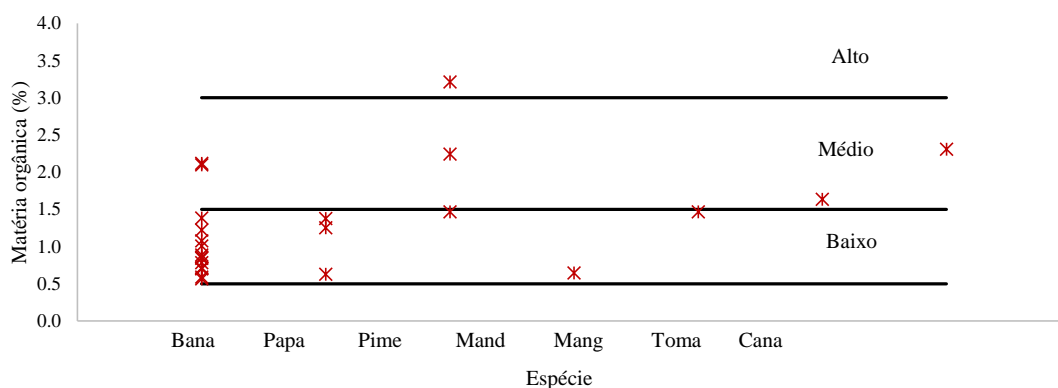


Figura 15- Matéria orgânica nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.2. Fósforo extraível

Todas as amostras analisadas mostraram teores de P no solo classificados como muito altos, isto é, acima de 200 mg kg^{-1} de fósforo expresso em P_2O_5 (Figura 16). Talvez seja de destacar as amostras provenientes da cultura do pimentão, em que todas se encontraram acima de $1000 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$.

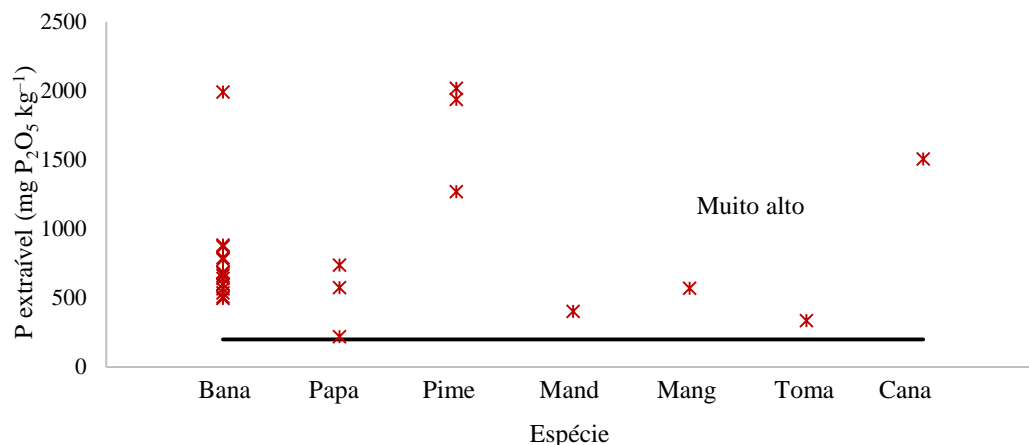


Figura 16- Fósforo (P) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.3. Potássio extraível

Todos os solos das culturas analisadas apresentaram valores de K extraível acima de 200 mg kg⁻¹, valor a partir do qual se estabelece a classificação “muito alto”. Os solos do pimentão apresentaram valores particularmente elevados, ultrapassando 1000 mg K₂O kg⁻¹. Esta distribuição mostrou uma disponibilidade muito elevada de K no solo em todas as culturas analisadas, indicando que nestes solos não será necessária a aplicação deste elemento.

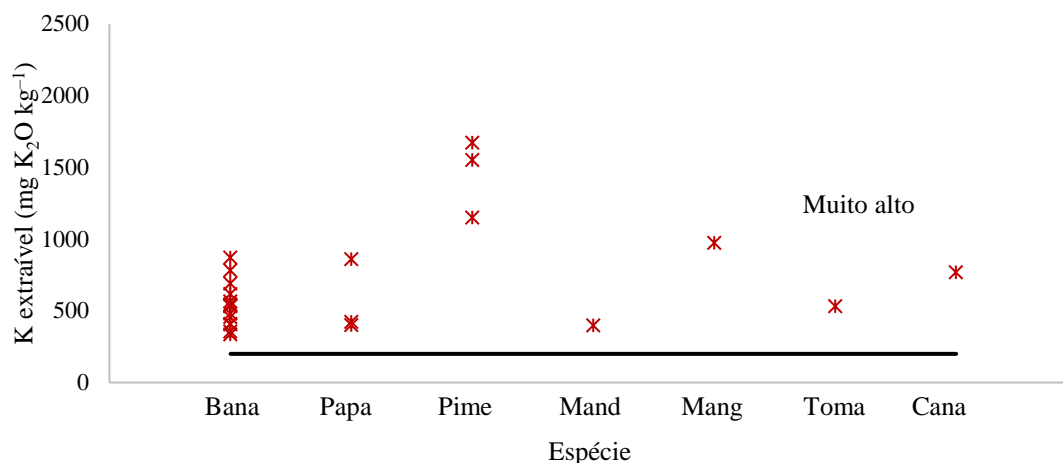


Figura 17- Potássio (K) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.4. Reação do solo

Todos os solos avaliados apresentaram pH alcalino, com valores superiores a 7,5. Esta condição foi observada em todas as culturas, com exceção de uma amostra da cultura de bananeira, em que o pH ficou ligeiramente abaixo de 7,5. Alguns solos cultivados com bananeira, papaeira e mandiogueira aproximaram-se de 8,5. Nenhuma amostra registou pH inferior a 7,0.

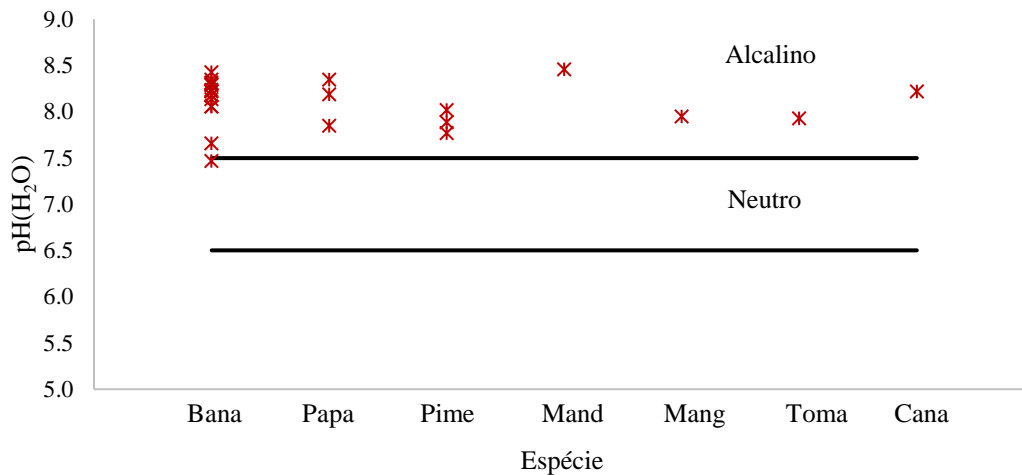


Figura 18- Valores de pH em água nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandiogueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.5. Cálcio de troca

A maioria dos solos avaliados apresentou níveis muito baixos de Ca trocável, com concentrações abaixo de 2,0 cmol_c kg⁻¹. Esta tendência foi observada nos solos de todas as culturas, com exceção de um na cultura de bananeira e um no pimentão, que tiveram valores na faixa baixa.

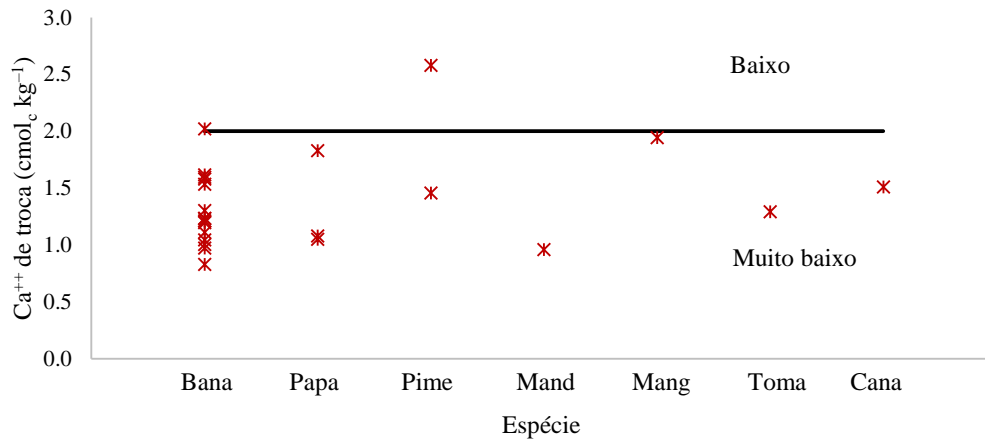


Figura 19- Cálcio (Ca⁺⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.6. Magnésio de troca

A maioria dos solos avaliados apresentou teores de Mg trocável classificados como médios, com concentrações entre 1,0 e 2,5 cmol_c kg⁻¹ (Figura 20). As culturas da papaeira, pimentão, mandioqueira, mangueira, tomate e bananeira apresentaram valores nesta faixa. Um solo de bananeira e o de cana-de-açúcar tiveram valores de Mg de troca baixos (< 1,0 cmol_c kg⁻¹). Nenhuma das amostras atingiu a faixa alta (> 2,5 cmol_c kg⁻¹).

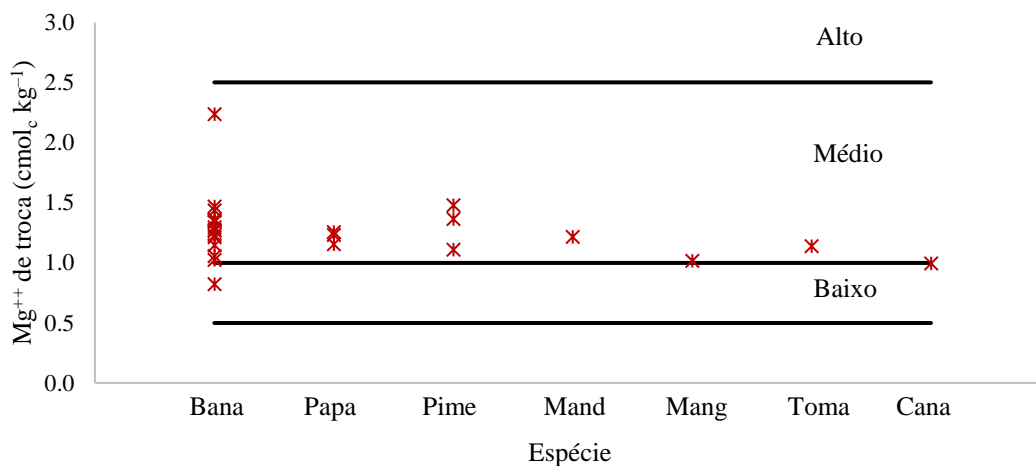


Figura 20- Magnésio (Mg⁺⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.7. Potássio de troca

Todos os solos avaliados apresentaram teores de K trocável muito altos, conforme indicado pela linha de referência da figura 21 colocada em $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Os valores oscilaram entre aproximadamente 15 e $50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Os solos da bananeira, papaeira e pimentão concentraram a maioria das amostras, com destaque para bananeira, que apresentou grande número de valores agrupados na faixa de 25 a $35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Nenhuma amostra se situou abaixo do limite que define a faixa “Muito alto”.

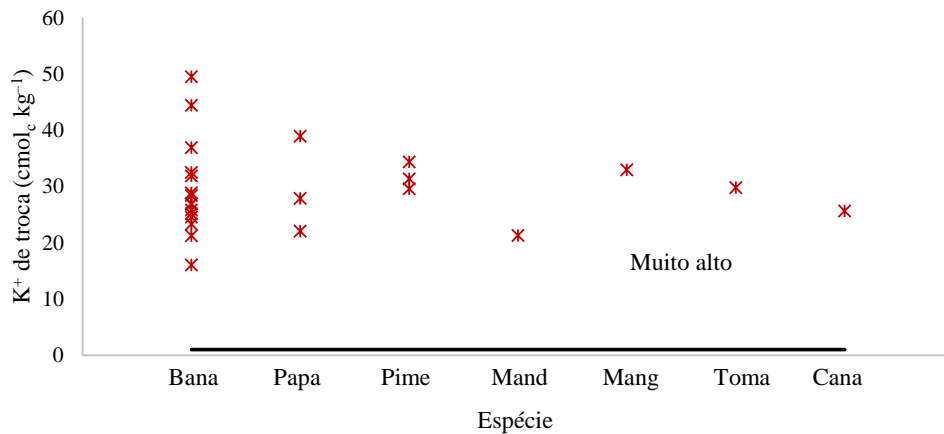


Figura 21- Potássio (K⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.8. Sódio de troca

Todos os solos avaliados apresentaram teores de Na trocável classificados como “Muito altos”, de acordo a linha de referência de $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ apresentada na figura 22. Os valores variam entre aproximadamente 13 e $25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Em nenhum solo se observaram valores abaixo do limite que define a classe “Muito alto”.

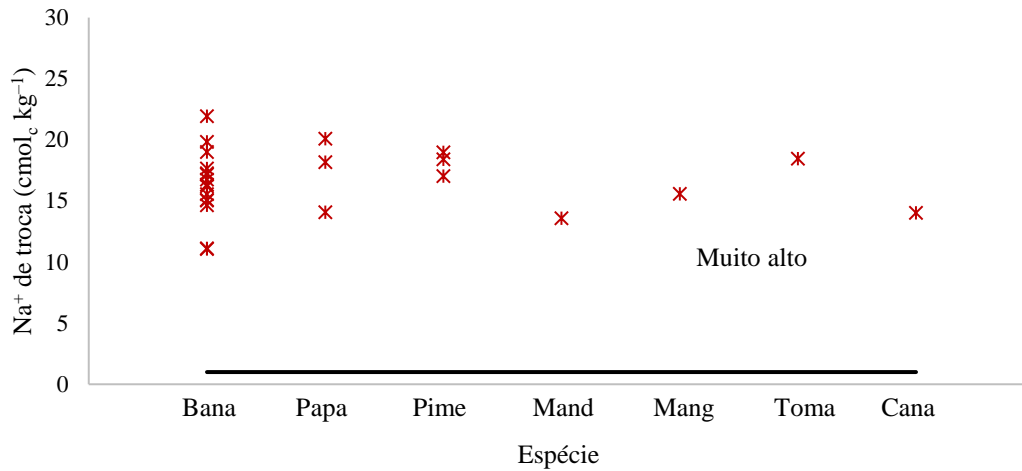


Figura 22- Sódio (Na⁺) de troca nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.9. Capacidade de troca catiónica

A maioria dos solos avaliados apresentou CTC muito alta, com valores superiores a 40 cmol_c kg⁻¹. Na faixa alta foram observados solos cultivados com bananeira, papaeira e mandioqueira. A cultura da bananeira destacou-se por apresentar o maior número de amostras e maior amplitude de variação. Nenhum dos solos apresentou valores inferiores a 20 cmol kg⁻¹.

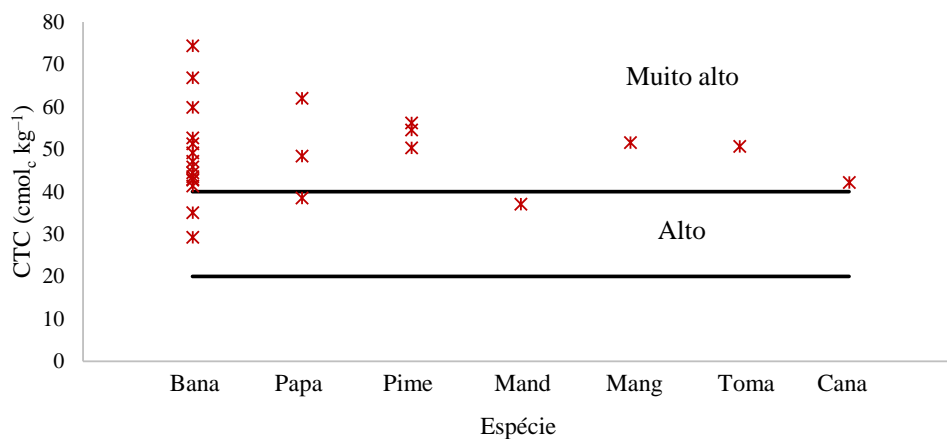


Figura 23- Capacidade de troca catiónica (CTC) nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.10. Ferro extraível

Os solos avaliados apresentaram teores de Fe extraível nas faixas “Alto” e “Muito alto”, conforme os limites indicados na figura 24. Os resultados da maioria dos solos das culturas de bananeira, pimentão e mandioca situaram-se na classe muito alta ($> 80 \text{ mg kg}^{-1}$). Os solos das culturas de mangueira, tomateiro e cana-de-açúcar apresentaram teores de Fe extraível dentro da faixa alta (entre 40 e 80 mg kg^{-1}). Nenhum dos solos registou valores abaixo do limite inferior da faixa alta.

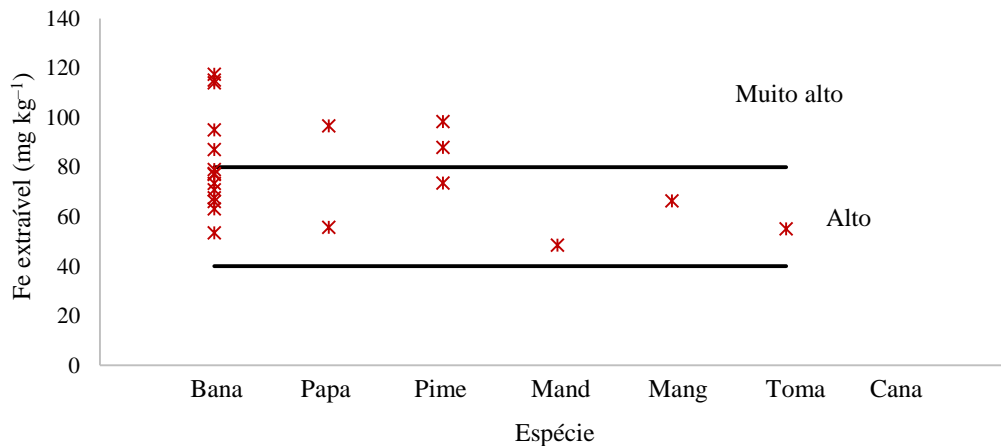


Figura 24- Ferro (Fe) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papoeira (Papa), pimentão (Pime), mandioca (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.11. Boro extraível

A maioria dos solos avaliados apresentou teores de B extraível na faixa média (entre $0,4$ e $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$), conforme indicado na figura 25. Este padrão foi verificado principalmente nos solos das culturas de bananeira, papoeira, mandioca, mangueira e tomateiro. Teores classificados como altos (entre $1,0$ e $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$) foram registados nos solos das culturas de pimentão e cana-de-açúcar. Um dos solos da cultura do pimentão foi o único que apresentou teor muito alto de B extraível ($> 2,5 \text{ mg kg}^{-1}$). Nenhum solo teve resultados abaixo da faixa média.

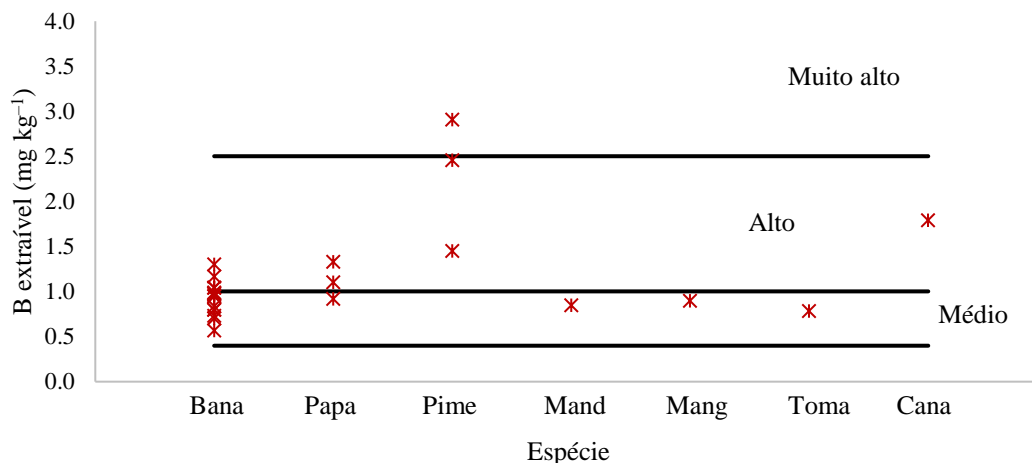


Figura 25- Boro (B) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana)

4.1.12. Cobre extraível

A maioria dos solos avaliados apresentou teores médios de Cu extraível (entre 0,9 e 7 mg kg⁻¹), conforme indicado na figura 26. Este padrão foi observado nos solos de bananeira, papaeira, mandioqueira, mangueira, tomateiro e cana-de-açúcar. Os solos do pimentão foram os que registaram maiores teores de Cu extraível (> 15 mg kg⁻¹).

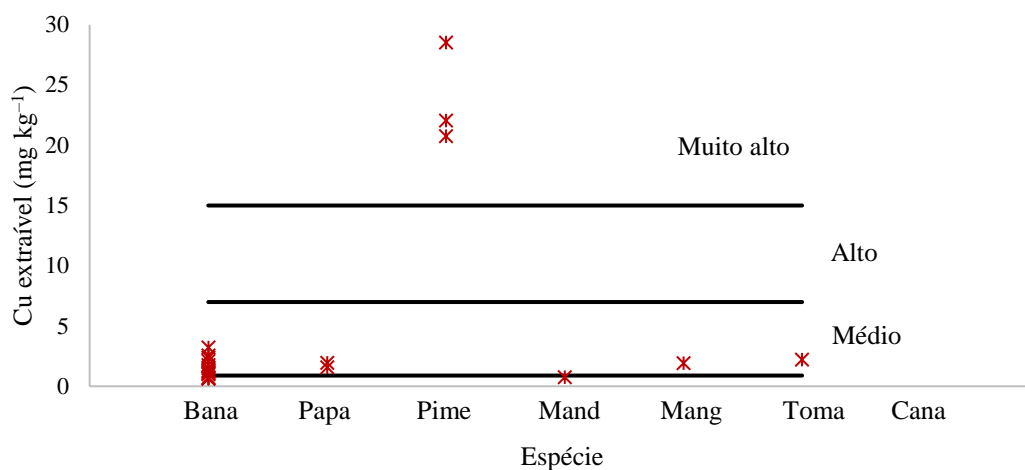


Figura 26- Cobre (Cu) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.13. Zinco extraível

A maior concentração de Zn extraível no solo foi observada nas culturas da bananeira e do pimentão ($> 10 \text{ mg kg}^{-1}$). Os solos da bananeira apresentaram concentração de Zn extraível também nos intervalos médio (1,5 a 3,5 mg kg^{-1}) e alto (3,5 a 10 mg kg^{-1}). Nos solos da cultura do pimentão observaram-se concentrações de Zn extraível no intervalo de classificação alto. A maioria dos solos das culturas apresentaram teores médio de Zn extraível, resultados observados nos solos da papaeira, mandioqueira e tomateiro. No solo da mangueira observou-se concentração média de Zn extraível.

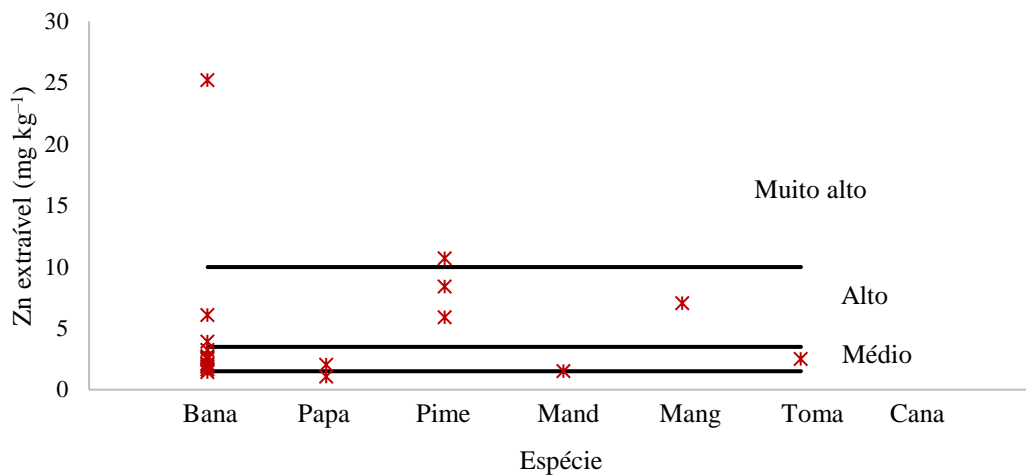


Figura 27- Zinco (Zn) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.14. Manganês extraível

A concentração de Mn extraível foi muito alta ($> 100 \text{ mg kg}^{-1}$) em todos os solos. Os solos do pimentão apresentaram valores particularmente elevados de Mn extraível (entre 283 e 342 mg kg^{-1}). Os solos com bananeira tiveram uma dispersão considerável em relação à concentração de Mn extraível no solo.

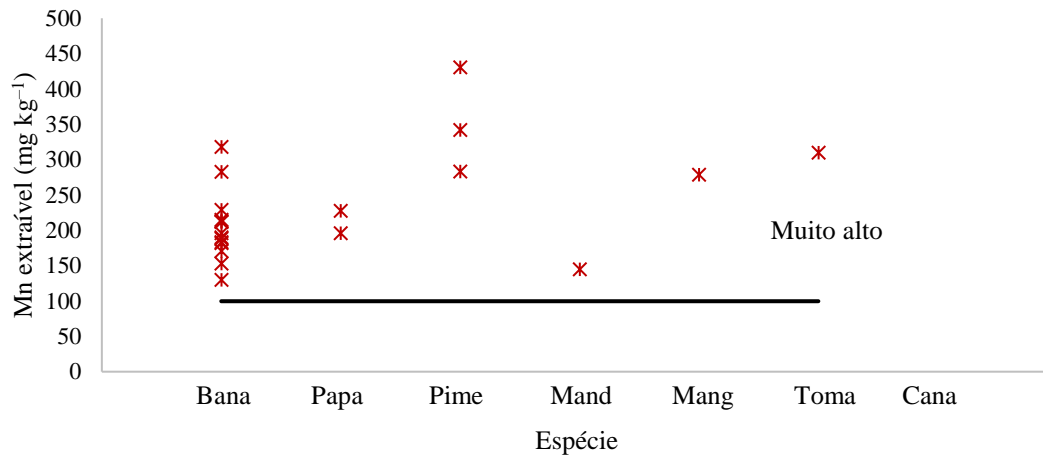


Figura 28- Manganês (Mn) extraível nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana).

4.1.15. Condutividade elétrica do solo

A maioria dos solos avaliados apresentou CE na faixa adequada (0,12 – 0,35 mS/cm⁻¹). Em relação à CE “boa para muitas culturas” observou-se em solos com pimentão, com duas amostras. A cultura da bananeira teve destaque em apresentar um solo com valor elevado de CE. Nenhum solo apresentou valor de CE baixa.

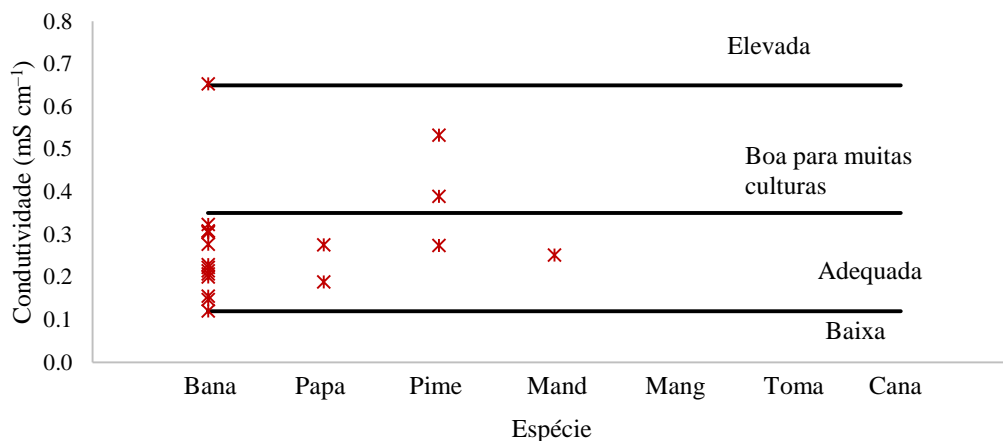


Figura 29- Condutividade elétrica nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand).

4.1.16. Razão de adsorção de sódio

A razão de adsorção de sódio nos solos avaliados apresentou valores maioritariamente enquadradas na classe “Média” ou valores muito próximos desta classe.

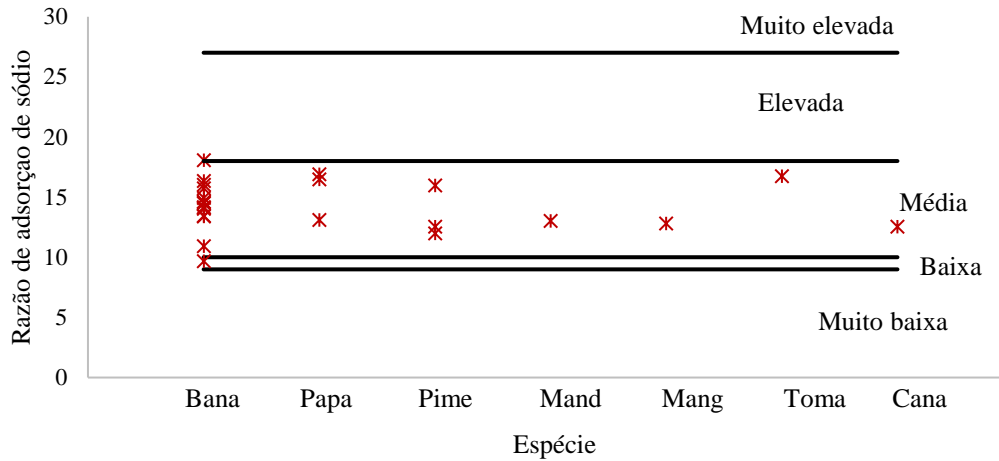


Figura 30- Razão de adsorção de sódio nos solos associados às culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand).

4.2. Concentrações de nutrientes nas folhas

4.2.1. Concentrações de nutrientes nas folhas das bananeiras

Os resultados da concentração de nutrientes nas folhas da bananeira foram apresentados em uma figura por se dispor de número mais elevado de amostras, o que permitiu uma análise mais detalhada. Para as restantes culturas, os resultados foram organizados em quadros interpretativos, tendo em conta o número reduzido de observações, o que possibilitou uma leitura adequada, ainda que mais concisa, dos dados obtidos.

4.2.1.1. Azoto

As concentrações de N nas folhas das bananeiras analisadas encontraram-se maioritariamente abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência ($< 35 \text{ g kg}^{-1}$). Apenas duas amostras apresentaram concentrações dentro do intervalo de suficiência ($35 - 45 \text{ g kg}^{-1}$).

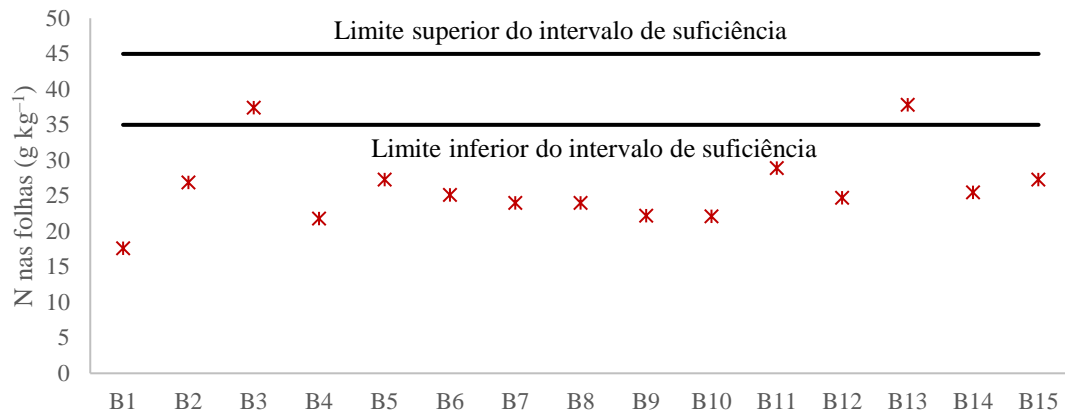


Figura 31- Concentração de azoto (N) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).

4.2.1.2. Fósforo

As concentrações de P nas folhas das bananeiras analisadas foram baixas, sendo que a maioria esmagadora apresentou resultados abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência para o P ($< 2 \text{ g kg}^{-1}$). Apenas uma amostra apresentou concentração de P dentro do intervalo de suficiência (2 a 4 g kg^{-1}).

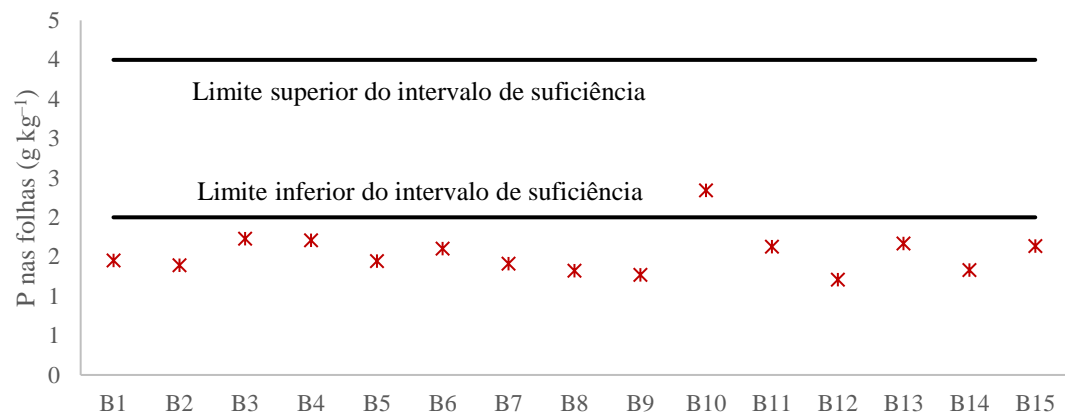


Figura 32- Concentração de fósforo (P) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).

4.2.1.3. Potássio

As concentrações de K nas folhas das bananeiras analisadas também são baixas, uma vez que todas as culturas apresentaram resultados abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência para o K ($< 38 \text{ g kg}^{-1}$). Ainda assim, observaram-se oscilações consideráveis, com valores a variar entre 8,6 e $37,6 \text{ g kg}^{-1}$.

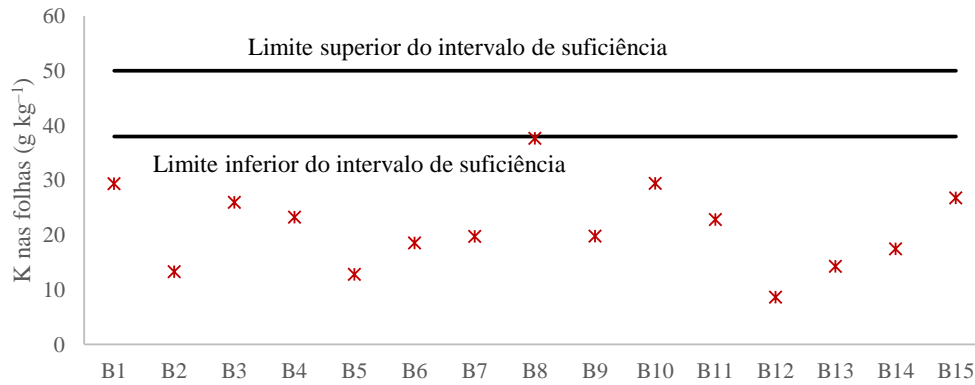


Figura 33- Concentração de potássio (K) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.4. Cálcio

As concentrações de Ca nas folhas da bananeira encontraram-se acima do limite inferior do intervalo de suficiência (8 g kg^{-1}). Três amostras estiveram mesmo acima do limite superior do intervalo de suficiência (15 g kg^{-1}), situação que tende a ser interpretada como excesso.

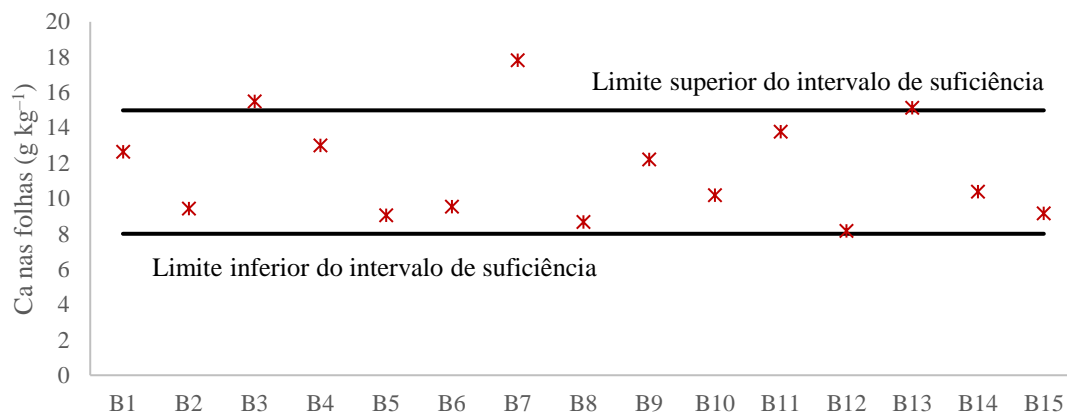


Figura 34- Concentração de cálcio (Ca) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.5. Magnésio

A maioria das amostras da cultura da bananeira apresentou concentração de Mg dentro do intervalo de suficiência ($2,5$ a $8,0 \text{ g kg}^{-1}$). Duas amostras apresentaram concentração de Mg acima do limite superior do intervalo de suficiência ($> 8 \text{ g kg}^{-1}$).

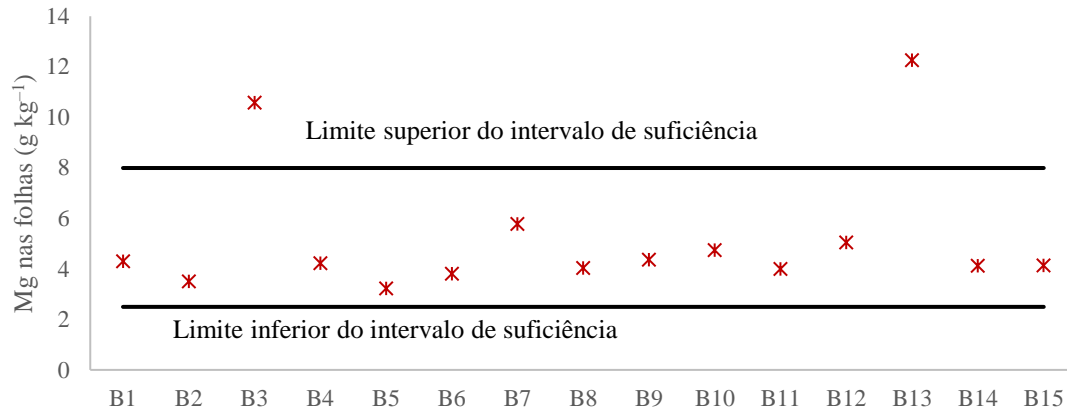


Figura 35- Concentração de magnésio (Mg) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.6. Boro

As concentrações de B nas folhas de bananeira encontraram-se dentro do intervalo de suficiência (10 a 50 mg kg⁻¹), com exceção da amostra B14 (bananeira 14) que apresentou um teor de B de 60,9 mg kg⁻¹.

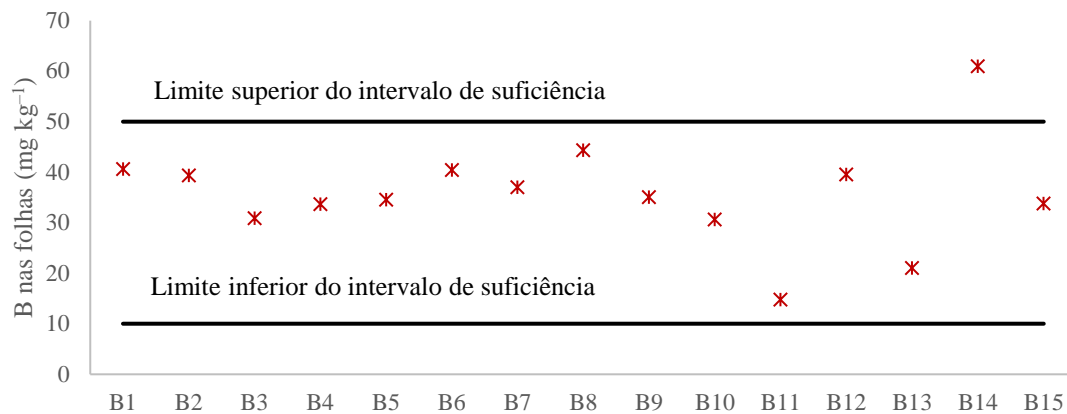


Figura 36- Concentração de boro (B) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.7. Ferro

A maioria das amostras de folhas de bananeira teve concentração de Fe dentro do intervalo de suficiência (75 a 300 mg kg⁻¹) ou acima deste (> 300 mg kg⁻¹). A amostra B12 teve um resultado particularmente elevado, atingindo 6206 mg kg⁻¹.

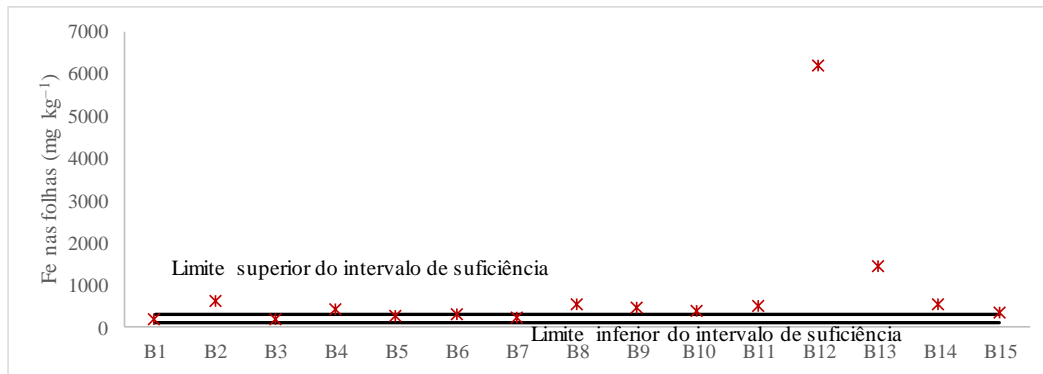


Figura 37- Concentração de ferro (Fe) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15).

4.2.1.8. Manganês

As bananeiras apresentaram concentrações de Mn maioritariamente dentro do intervalo de suficiência (100 a 1000 mg kg⁻¹). A amostra B13 teve a concentração de Mn mais elevada com um valor de 1125 mg kg⁻¹).

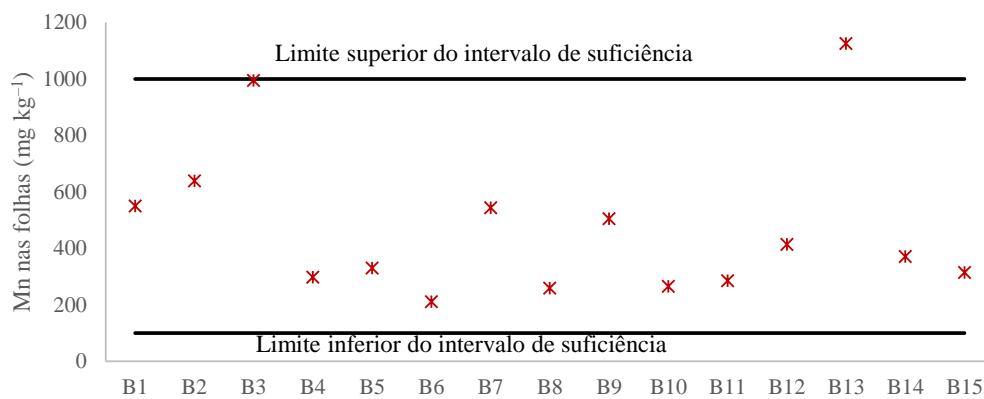


Figura 38- Concentração de manganês (Mn) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.9. Zinco

As concentrações de Zn nas amostras de bananeira encontraram-se abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência (< 20 mg kg⁻¹), o que normalmente configura situações de deficiência.

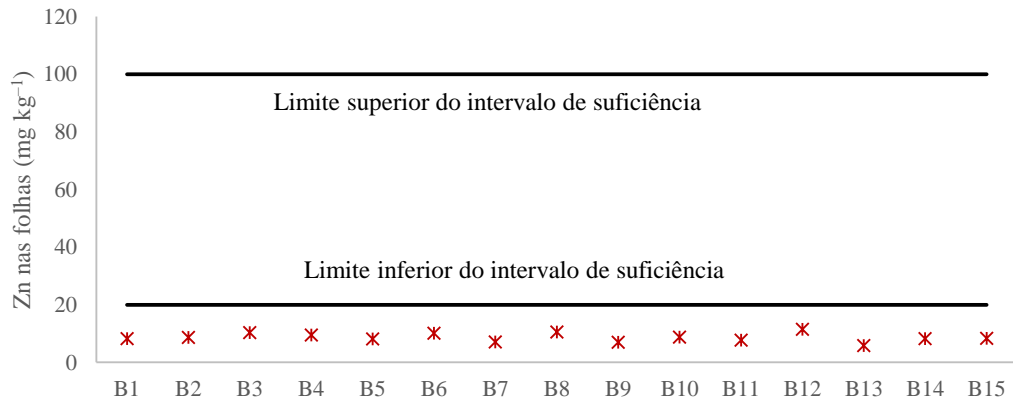


Figura 39- Concentração de zinco (Zn) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.1.10. Cobre

As concentrações de Cu nas amostras de folhas de bananeira encontraram-se próximas do limite inferior do intervalo de suficiência (6 mg kg^{-1}), embora a maioria se encontrasse abaixo daquele limite.

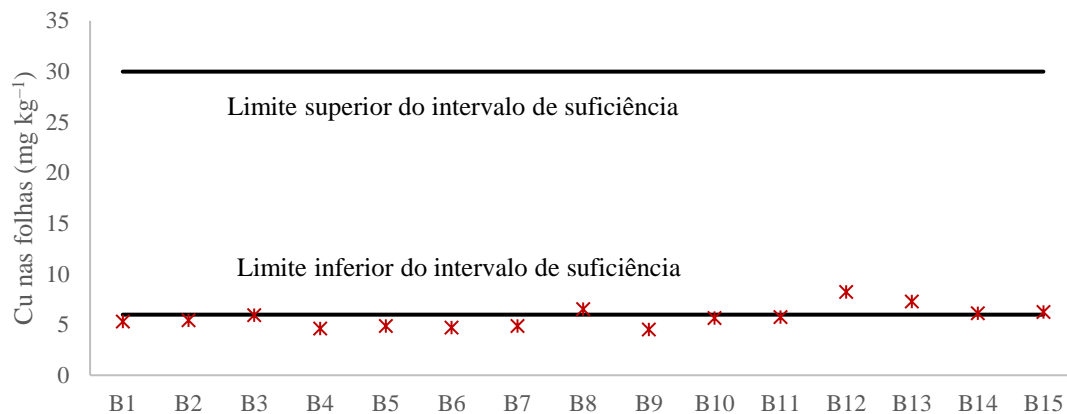


Figura 40- Concentração de cobre (Cu) nas folhas de bananeira nas 15 amostras analisadas (B1, ..., B15)

4.2.2. Concentração de nutrientes nas folhas das restantes culturas

4.2.2.1. Concentração de macronutrientes nas folhas

A concentração de macronutrientes nas folhas revelou variações entre as culturas analisadas. De forma geral, a maioria das culturas apresentou níveis adequados de Ca e Mg, com exceções pontuais. Em relação ao N, a maioria das culturas apresentaram concentrações dentro da faixa de suficiência, com exceção da papaveira, pimentão 3 e

mangueira, que registaram valores acima do intervalo de suficiência. Para o P, todas as culturas exibiram concentrações dentro do padrão do intervalo de suficiência, com exceção de algumas que tiveram valores acima do intervalo de suficiência, mais com pouca relevância. No que diz respeito ao K, observaram-se concentrações abaixo do intervalo de suficiência nas culturas da papaveira, mandiocueira e tomateiro, enquanto nas demais os valores mantiveram-se dentro do intervalo de suficiência, com exceção para o pimentão, que apresentou resultados acima do intervalo de suficiência. O Ca apresentou de forma geral, concentrações dentro dos intervalos de suficiência em todas as culturas analisadas, com exceções para a cana-de-açúcar que teve um valor muito acima do intervalo de suficiência. Finalizando, o Mg apresentou maioritariamente resultados dentro do intervalo de suficiência, com exceções para a papaveira 2, pimentão 2, mandiocueira e tomateiro com valores acima do intervalo de suficiência.

Quadro 5- Concentrações foliares de macronutrientes nas diferentes culturas e respetivos intervalos de suficiência.

Espécie	Azoto	Fósforo	Potássio g kg⁻¹	Cálcio	Magnésio
Papaia 1	40,3	3,4	17,4	21,4	11,6
Papaia 2	44,5	3,6	13,4	21,4	15,4
Papaia 3	40,1	3,7	17,7	21,1	10,6
Intervalo de suficiência	10,1-25,0	2,2 -4,0	33-55	10-30	4-12
Pimentão 1	42,8	2,6	49,4	18,4	9,1
Pimentão 2	43,7	3,2	52,8	18,8	10,2
Pimentão 3	49,6	3,4	55,6	16,2	10,8
Intervalo de suficiência	32-48	3,5-11,0	27-40	15-28	3,5-10
Mandioca	38,9	3,4	7,1	21,8	6,7
Intervalo de suficiência	50-60	3-5	12-20	6-15	2,5-5
Mangueira	18,1	1,2	6,8	13,3	2,2
Intervalo de suficiência	10-15	0,8-2,5	4-17	20-50	2-6
Tomate	42,3	3,6	24,7	24,2	12,1
Intervalo de suficiência	40-60	2,5-8,0	25-50	10-30	4-9
Cana-de-açúcar	22,4	1,7	11,4	15,1	2,9
Intervalo de suficiência	20-26	1,8-3,0	10-18	2-5	1-3,5

4.2.2.2. Concentração de micronutrientes nas folhas

As concentrações de micronutrientes apresentaram variações significativas entre as culturas analisadas. De forma geral, as concentrações de Fe situaram-se acima dos limites de suficiência na maioria das espécies, enquanto os outros nutrientes mostraram concentrações com comportamentos contrastantes consoante as culturas. Relativamente ao B, níveis excessivos foram registados sobretudo na papaveira e mandioca, excedendo amplamente o limite de suficiência. Em relação ao Zn os níveis abaixo do intervalo de suficiência observaram-se na mangueira, tomateiro e cana-de-açúcar. No caso do Fe, as concentrações mantiveram-se dentro ou acima da suficiência em todas as culturas, destacando-se a amostra 3 do pimentão, com concentração muito elevada. Quanto ao Mn, observou-se uma tendência geral para valores dentro do intervalo de suficiência, com exceção da cana-de-açúcar e tomateiro, onde observou valores superiores ao limite do intervalo de suficiência. Por fim, as concentrações de Cu de uma forma geral estiveram dentro dos limites adequados em todas as culturas, com exceções para a papaveira 1, com valor acima do intervalo de suficiência e mangueira com valor abaixo do intervalo de suficiência.

Quadro 6- Concentrações foliares de micronutrientes nas diferentes culturas e respetivos intervalos de suficiência.

Espécie	Boro	Ferro	Manganês	Zinco	Cobre
	mg kg ⁻¹				
Papaia 1	64,8	917,8	56,3	21,2	16,0
Papaia 2	104,4	186,6	42,6	12,7	6,4
Papaia 3	72,5	326,3	38,8	5,3	5,1
Intervalo de suficiência	20-30	25-100	25-150	15-40	4-10
Pimentão 1	35,3	782,0	72,5	16,9	7,3
Pimentão 2	37,6	1529,1	106,2	10,6	16,9
Pimentão 3	35,2	2000,7	143,5	20,3	17,9
Intervalo de suficiência	25-65	42-350	50-250	25-45	10-25
Mandioca	75,8	251,6	92,6	42,7	7,6
Intervalo de suficiência	15-20	60-200	40-70	40-100	7-15
Mangueira	44,6	553,5	50,1	7,1	4,8
Intervalo de suficiência	25-150	50-250	50-250	20-100	7-35
Tomate	44,9	1225,0	137,5	13,6	8,3
Intervalo de suficiência	25-50	40-80	40-100	20-50	5-20
Cana-de-açúcar	9,8	649,3	71,8	8,4	7,4
Intervalo de suficiência	4-30	40-250	25-400	20-100	5-15

4.2.3. Concentração de sódio nas folhas

Não é conhecida uma classificação de suficiência para a concentração de sódio nas folhas uma vez que não se trata de um nutriente essencial às plantas superiores. Assim, os resultados são interpretados comparando as diferentes culturas. A Papeira foi a cultura com maior concentração de sódio nos tecidos, com valores de 1700 mg kg^{-1} . O tomateiro apresentou um valor também muito elevado, próximo de 1300 mg kg^{-1} . Os valores mais baixos foram observados na bananeira e na cana-de-açúcar.

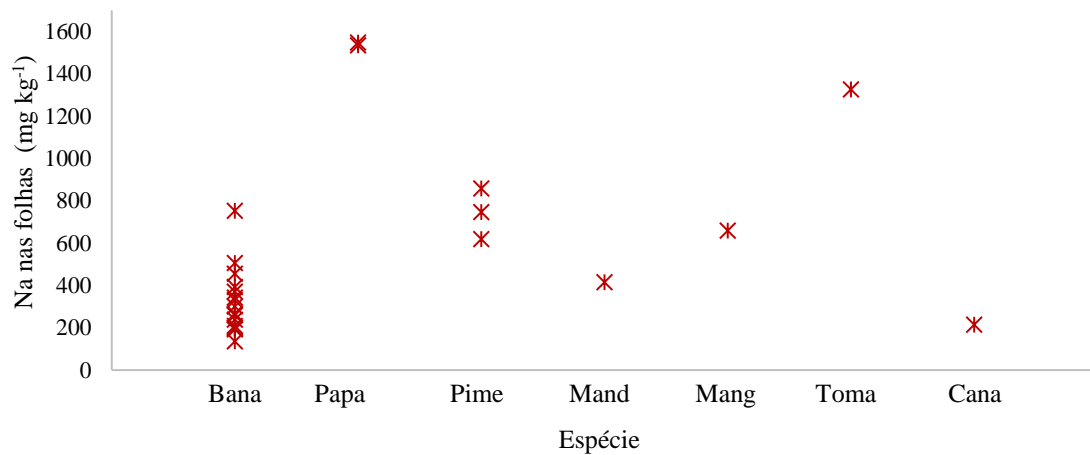


Figura 41- Concentração de sódio (Na) nas culturas de bananeira (Bana), papaeira (Papa), pimentão (Pime), mandioqueira (Mand), mangueira (Mang), tomateiro (Toma) e cana-de-açúcar (Cana)

5. Discussão dos resultados

5.1. Estado nutricional azotada das culturas

Na maioria das culturas observou-se uma concentração em N nas folhas dentro do intervalo de suficiência estabelecido para cada cultura. Contudo, na bananeira, que representa quase a metade dos campos estudados, a concentração de N nas folhas encontrou-se maioritariamente abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência estabelecido para a cultura. O resultado pode permitir inferir que, nas condições em que a bananeira é cultivada na Ribeira dos Picos não disponibilizam N em quantidades adequadas ao desenvolvimento da bananeira.

As condições ambientais de Cabo Verde, considerada uma região semiárida, conduzem a teores de matéria orgânica nos solos baixos (Plaza et al., 2018), facto também confirmado pelos resultados das análises de solos em Ribeira dos Picos efetuadas neste estudo. A matéria orgânica do solo influencia diretamente a disponibilidade de N para as culturas, em resultado da sua mineralização. Segundo Dias et al. (2014), a disponibilidade de N no solo está também intimamente relacionada com a mineralização dos resíduos orgânicos incorporados no solo. Por outro lado, em clima semiárido, como o de Cabo Verde, a atividade microbiana resultante da mineralização da matéria orgânica é baixa, fazendo com que haja uma baixa disponibilidade de N no solo para as culturas (Robertson & Groffman, 2015).

É também de realçar que, em diversas culturas, a concentração de N nas folhas esteve acima do intervalo de suficiência, mesmo tendo o solo baixo teor de matéria orgânica. Isso verificou-se nas culturas da papaieira e da mangueira. Nestas culturas, a prática da rega e aplicação de fertilização é regular. No caso da mangueira, na época de colheita das amostras, o terreno encontrava-se cultivado com cebola, onde frequentemente se aplicam fertilizantes, tendo essa prática beneficiado a nutrição da mangueira. Assim, em climas semiáridos, se as culturas forem regadas e receberem fertilizantes, o seu estado nutricional azotado pode ser elevado, mesmo que o teor de matéria orgânica no solo seja baixo (Orozco-Romero & Pérez-Zamora, 2006).

5.2. Estado nutricional em fósforo das culturas

As concentrações foliares de P encontraram-se dentro do intervalo de suficiência na maioria das culturas. Estes resultados podem refletir os elevados teores de P no solo

observados também neste estudo. As regiões com solos basálticos, de origem vulcânica, têm habitualmente teores elevados de P (Bi et al., 2024), e será isso que está na base dos resultados. Contudo, a bananeira e o pimentão mostraram teores de P nas folhas abaixo do limite inferior do intervalo de suficiência. É sabido que em muitos ecossistemas os solos podem ter teores elevados de P, mas este não estar disponível para as plantas, podendo estas necessitar de suplementação com fertilizantes fosfatados para otimizar a produção (Aguiar et al., 2025).

Carreira et al. (2006) referem que em solos de climas semiáridos os teores de P encontram-se retidos em forma não disponíveis, provavelmente devido à presença de calcário e ao seu pH elevado. Os solos analisados neste estudo mostraram pH alcalino e, nessas condições, o P tende a precipitar, fazendo com que a sua disponibilidade seja reduzida mesmo quando seus teores no solo são elevados. Esta pode ser a principal explicação para os resultados obtidos.

5.3. Macronutrientes catiões

As concentrações de K nas folhas estiveram abaixo dos intervalos de suficiência em culturas como bananeira, papaia e mandioca. Nas culturas de manga, tomate e cana-de-açúcar, os valores estiveram dentro dos intervalos de suficiência estabelecidos. Na cultura do pimentão a concentração de K nas folhas esteve acima do intervalo de suficiência. Tendo em conta que os teores de K no solo foram elevados, parece que haverá outras variáveis agroambientais para além do K no solo a influenciar a absorção do nutriente pelas plantas.

A origem vulcânica dos solos faz com que eles sejam ricos em feldspatos potássicos e outros minerais primários que contêm muito K na sua composição (Volf et al., 2023). Por outro lado, climas semiáridos, com temperatura elevadas, baixa precipitação, elevada evapotranspiração e baixa lixiviação, os solos tendem a acumular K (Poozesh Shirazi et al., 2024).

Com exceção da cultura do pimentão, a teores elevados de K nos solos não correspondem teores elevados de K nos tecidos. Esse fenómeno foi também reportado em um estudo realizado por Espinoza et al. (2025), onde os altos teores de K no solo não coincidiam com a concentração do nutriente nas folhas das culturas.

Um dos fatores que pode dificultar a absorção de K é a falta de humidade do solo, uma vez que os fluxos de massa e difusão são restringidos (Weil & Brady, 2017). Esta pode ser uma explicação plausível em climas semiáridos em que os solos permanecem secos grande parte do ano. O facto de nas culturas cultivadas em ambiente mais seco os teores de K tenderem a ser menores valida a justificação apresentada.

Os resultados das análises dos solos onde se encontram instaladas as culturas apresentaram uma concentração de Na muito elevada. Na absorção de catiões tende a existir antagonismo iónico, em que a elevada presença de um pode dificultar a absorção de outro. É também explicação plausível, que os elevados teores de Na no solo tenham dificultado a absorção de K. Em concordância, Chérel et al. (2014) observaram que a absorção de K foi negativamente afetada pelo elevado teor de Na no solo.

Em relação ao Ca no solo, verificou-se um baixo teor em todos os solos incluídos neste estudo. Teores de Ca baixos são normalmente encontrados em solos ácidos (Warke & Warkgari, 2024), em que o Ca é facilmente lixiviado devido à competição no complexo de troca com iões H^+ e Al^{3+} . Nestes solos, o pH elevado é devido sobretudo ao Na e não ao Ca. Contudo, o Ca tendeu a estar nas folhas em níveis adequados ao desenvolvimento das culturas.

Apesar dos solos apresentarem teores muito baixos de Ca, a maioria das culturas apresentaram uma concentração média e outras até muito alta de Ca nas folhas. Segundo Pina (2009), as águas subterrâneas da ilha de Santiago possuem elevadas concentrações em Ca, devido à origem vulcânica das ilhas, possuindo materiais basálticos com Ca na sua constituição. A presença de Ca nas águas subterrâneas ocorre devido à interação das rochas com a água das chuvas. Esta água, ao ser extraída de poços e furos para ser utilizada para a rega, como é feito em Ribeira dos Picos, acaba por introduzir Ca no sistema, podendo ser mais facilmente absorvido pelas raízes das culturas. Desta forma, estará Ca disponível que não é detetado nos resultados das análises dos solos.

Segundo White e Broadley (2003), o Ca absorvido da solução do solo pelo sistema radicular é transportado para a parte aérea através do xilema, sendo a absorção e transporte influenciados diretamente pela transpiração. O Ca vai-se acumulando nas folhas adultas, devido a sua baixa mobilidade nos tecidos. Como as taxas de crescimento são baixas, sobretudo nas culturas de sequeiro, os níveis de Ca atingem concentrações

adequadas. Nas espécies regadas, com taxas de crescimento mais elevadas, será a água de rega a fornecer uma parte importante do Ca que as culturas absorvem.

Cana-de-açúcar e mandioca foram as culturas que apresentaram teores mais elevados de Ca nas folhas. Parte da explicação também pode ser devida à eficiência fisiológica destas espécies na absorção do nutriente. Segundo White e Broadley (2003) as diferenças na acumulação de Ca em espécies vegetais são, em grande parte, consequência de diferenças na taxa de transpiração e na capacidade de absorção radicular. Cana-de-açúcar é caracterizada por ter uma elevada taxa de transpiração e ter uma forte dependência do fluxo no xilema para o transporte de nutrientes (Silva et al., 2007). Fermont e Benson (2011) afirmam que a cultura da mandioca é capaz de manter uma nutrição mineral adequada em condições de baixa fertilidade do solo. A mandioca possui um sistema radicular bem desenvolvido e extenso, o que permite uma absorção eficiente de Ca e Mg mesmo em solos com baixos teores trocáveis desses nutrientes (Howeler, 2002).

Em relação ao Mg, a maioria das culturas apresentou teores dentro do intervalo de suficiência ou até ligeiramente acima. Contudo, os teores de Mg no solo não foram elevados, mas também não foram baixos. Segundo Kobayashi e Tanoi (2015), as plantas podem sofrer alterações na regulação no sistema de transporte de alta afinidade, que funciona com baixas concentrações externas de Mg, fazendo ajustes da sua absorção e mantendo os teores de Mg dentro do intervalo de suficiência. A maioria das culturas apresentou concentrações de Mg dentro do intervalo de suficiência, parecendo estar de acordo com os teores de Mg nos solos. Os solos incluídos neste estudo são alcalinos, mas por conterem teores elevados de Na e não Ca ou Mg, o que pode acontecer sobretudo em climas áridos e semiáridos (FAO, 2000).

Segundo Chaudhry et al. (2021), a absorção do Mg é fortemente influenciada pelas interações com outros cátions, em particular K e Ca. O excesso de Na na zona radicular pode também perturbar o equilíbrio entre o Mg e outros cátions. Em conjunto estas interações podem justificar o resultado. Por outro lado, a deficiência de Mg nas culturas está frequentemente relacionada com desequilíbrios nutricionais e não com uma baixa disponibilidade total de Mg no solo (Gransee & Führs, 2013).

5.4. Micronutrientes aniões

A maioria dos solos onde estão instaladas as culturas apresenta um teor médio de B. Nos solos com pimentão e cana-de-açúcar observaram-se teores elevados e mesmo muito elevados, como se verificou em um dos solos cultivados com pimentão. O estado nutricional das culturas também se encontrou maioritariamente dentro do intervalo de suficiência e, por vezes, acima do limite superior daquele intervalo, como ocorreu, por exemplo, nas culturas da papaeira e mandioqueira.

Segundo Nable et al. (1997), para o B o intervalo entre o limite de deficiência e de toxicidade é o mais estreito de entre os nutrientes essenciais às plantas. O B está presente na solução do solo principalmente sob forma de ácido bórico, sendo uma forma de elevada mobilidade no solo. Em climas áridos e semiáridos, os teores de B no solo tendem a ser elevados, havendo condições para surgirem inclusive riscos de toxicidade nas plantas (Weil & Brady, 2017).

Shorrocks (1997) refere que as análises de B nas amostras de solo nem sempre permitem prever de forma fiável o estado nutricional em B das plantas. Contudo, neste estudo parece haver coincidência entre teores de B no solo e nos tecidos das plantas. Neste estudo, verificou-se que nem todas as culturas têm os mesmos níveis de B no solo. Reid (2010) referem que as espécies vegetais diferem amplamente na sua tolerância ao B e na sua capacidade regular e acumular B, podendo isto explicar os níveis particularmente elevados de B observados na papeira e mandioqueira.

Uma prática cultural utilizada com frequência nas culturas em Ribeira dos Picos é a utilização de estrume de bovino. Esta prática tem sido usada nas culturas incluídas neste estudo. É sabido que os estrumes contêm B que pode ser libertado para as plantas à medida que aqueles se mineralizam (Gupta, 1984). Para além do clima semiárido, esta pode também ser uma explicação para os teores elevados de B nos tecidos.

Ribeira dos Picos é uma região agrícola irrigada, onde a rega é feita com água subterrânea proveniente de poços e furos. O B é altamente solúvel em água, sendo espectável que a água usada na rega contenha níveis elevados de B. Em concordância, Alloway (2008b) constatou que, em sistemas irrigados, o B pode acumular-se na zona radicular sendo facilmente absorvido pelas plantas.

5.5. Micronutrientes catiões

Em relação aos micronutrientes catiões, verificaram-se concentrações adequadas de Fe, Mn e Cu, mas níveis baixos de Zn. Esta situação pode ser associada a diferenças fisiológicas das culturas, situação explicada por Rengel (2015), quando refere que as espécies vegetais diferem marcadamente na sua capacidade de mobilizar micronutrientes na rizosfera.

A razão pelo qual se observaram teores baixos de Zn nas folhas, apesar dos teores no solo serem médios a altos, poderá estar relacionada com o pH, que é um dos principais fatores que controla a disponibilidade dos micronutrientes catiões. Em relação ao Zn, Alloway (2009a) refere que valores de pH do solo elevados é um dos principais fatores que controlam a disponibilidade de Zn, provocando a sua precipitação ou a sua forte adsorção.

Os teores de Mn nos solos foram muito elevados. Contudo, o mesmo não ocorreu com os teores de Mn nas folhas. Fageria e Baligar (2008) referem que a disponibilidade de Mn diminui acentuadamente com o aumento do pH do solo, devido à sua oxidação em formas menos solúveis.

Ribeira dos picos é uma região em que os solos apresentam baixos teores de matéria orgânica, como comprovado pelas análises efetuadas no âmbito deste estudo. Segundo Weil & Brady (2017), teores baixos de matéria orgânica também reduzem a disponibilidade dos micronutrientes catiões, em particularidade Zn e Cu, sendo estes que se encontraram nas concentrações nos tecidos mais baixas.

O Zn, em particular, foi o nutriente que se encontrou em situação mais crítica para as culturas, levando em consideração o solo alcalino da região. Cakmak (2008) afirma que a deficiência de Zn é generalizada em solos calcários e alcalinos. Kabata-Pendias (2011) afirmaram também que a deficiência de Cu é menos frequente do que a deficiência de Zn em solo alcalino.

6. Conclusões

A nutrição azotada das culturas mostrou resultados dispares entre as diferentes espécies analisadas. Em algumas culturas, o N apresentou níveis adequados nas folhas, sobretudo naquelas cultivadas com rega e fertilização. No caso da bananeira, a espécie mais amostrada, os valores foram baixos, revelando problemas de acesso ao N por esta cultura.

A maioria das espécies apresentou teores adequados de P nos tecidos, provavelmente em resultado do facto de os solos serem de origem vulcânica, com boa disponibilidade de P, e de algumas culturas receberem fertilizantes, sobretudo estrumes de animais. Contudo, as amostras de bananeira apresentaram teores baixos de P nos tecidos. Os solos alcalinos tendem a imobilizar P, sendo esta uma explicação plausível para o resultado, sobretudo porque esta espécie tende a não ser fertilizada.

Algumas espécies apresentaram teores elevados de K nos tecidos. Os solos vulcânicos contêm feldspatos potássicos, podendo disponibilizar quantidades significativas de K para as culturas. Contudo, amostras de diversas outras espécies mostraram teores baixos de K nos tecidos. Dada a quantidade elevada de Na nos solos, é provável que ocorra antagonismo iónico na absorção entre Na e K, reduzindo a concentração deste nos tecidos.

O Ca apresentou-se baixo no complexo de troca, mas em níveis adequados nas folhas. Com base em estudos anteriores, foi levantada a hipótese de que a água de rega seja rica em Ca, compensando a reduzida quantidade presente nos solos.

O Mg parece não ser um problema nutricional na ilha, na medida em que a generalidade das culturas apresentou teores adequados nos tecidos.

O B apresentou-se em níveis elevados a muito elevados nos tecidos das plantas, sendo o risco de toxicidade mais provável do que o de deficiência. Este é um padrão típico das regiões áridas e difícil de corrigir com práticas agrícolas.

Entre os micronutrientes catiónicos, o Zn pode constituir um problema nutricional relevante. Neste estudo, apresentou-se em níveis baixos em muitas culturas, provavelmente devido à reduzida biodisponibilidade do nutriente em ambientes de pH alcalino.

Este estudo preliminar levanta mais questões do que resolve. A gestão da fertilidade do solo e da nutrição das plantas parece complexa, recomendando-se que estudos suplementares, que incluam também a resposta das plantas à aplicação de fertilizantes, venham a ser implementados.

7. Referências bibliográficas

- Adamchuk, V. L., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71-91.
- Aguiar, P., Arrobas, M., & Rodrigues, M. Â. (2025). Increased uptake and accumulation of phosphorus and other nutrients by legumes enhance their bioavailability for non-legume species. *Plant, Soil and Environment*, 71(6), 409-425.
- Alloway, B. J. (2008b). *Boron in soils and crop nutrition*. International fertilizer Industry Association (IFA) & International Zinc Association (IZA).
- Alloway, B. J. (2008a). Micronutrients and crop production: An introduction. In B. J. Alloway (Ed.), *Micronutrient deficiencies in global crop production* (pp. 1-39). Springer.
- Alloway, B. J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5), 537-548.
- Anderson, T.-H., & Domsch, K. H. (2010). Soil microbial biomass: The ecophysiological approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2039-2043.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29). FAO.
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (Eds.). (2015). *Handbook of Plant nutrition* (2nd ed.). CRC Press.
- Barrow, N. J., & Hartemink, A. E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487(1), 21-37.
- Batista, I., Geissen, V., Querido, A., Ferreira, A. J. D., & Ritsema, C. (2015). Sustainable land management strategies in the Ribeira Seca watershed, Santiago Island, Cape Verde. *Land Degradation & Development*, 26(5), 456-564.
- Bi, R., Fu, W., & Fu, X. (2024). Phosphorus dynamics in volcanic soils of Weizhou Island, China: *Implications for environmental and agricultural applications*. *Environmental Geochemistry and Health*, 46, 458.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1-2), 1-17.
- Câmara Municipal de Santa Cruz. (2012). *Plano Diretor Municipal de Santa Cruz (PDM)*. Câmara Municipal de Santa Cruz, Cabo Verde.
- Carreira, J. A., Vinegla, B., & Lajtha, K. (2006). Secondary CaCO₃ and precipitation of P-Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 64(3), 460-473.

- Chaudhry, U. K., Goyal, A., Iqbal, M., & Wani, S. H. (2021). Magnesium and plant nutrition: The role of magnesium in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 1819.
- Chérel, I., Lefoulon, C., Boeglin, M., & Sentenac, H. (2014). *Molecular mechanisms involved in plant adaptation to low K⁺ availability*. *Journal of Experimental Botany*, 65(3), 833-848.
- Dias, D., Aguiar, C. F., Arrobas, M., & Rodrigues, M.A. (2014). Nitrogen Mineralized during sorghum growth after soil incorporation of different winter cover crops. In C. M. S. Cordovil (Ed.), *Proceedings of the 18th Nitrogen Workshop* (pp. 500-501). ISA Press.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives* (2.^a ed.). Sinauer Associates.
- Espinoza, N., Lessl, J., & Rubio Ames, Z. (2025). High soil potassium levels do not increase leaf potassium concentration in rabbiteye or southern highbush blueberry. *HortScience*, 60(1), 152 -161.
- Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press.
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming. *Advances in Agronomy*, 99, 345-399.
- Ferrarezi, R.S., Lin, X., González Neira, A. C., Tabay Zambon, F., Hu, H., Wang, X., Huang, J. H., & Fan, G. (2022). Substrate pH influences the nutrient absorption and rhizosphere microbiome of huanglongbing-affected grapefruit plants. *Frontiers in plant science*, 13, 85693.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2000). *Sodic soils and their management*. (FAO Soils Bulletin No. 39). FAO.
- Fermont, A. M., & Benson, T. (2011). Estimating yield response of cassava to nutrient inputs. *Food Policy*, 36(5), 646-655.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Cape Verde: *Country profile*. FAO. <https://www.fao.org/countryprofiles/index/en/?iso3=CPV>.
- Foth, H. D., & Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility* (2nd ed.). Lewis CRC Press.
- Governo de Cabo Verde. (2022). *Comunicado sobre a reabilitação da estrada Ribeira dos Picos*. <https://www.governo.cv/governo-entrega-estrada-asfaltada-aos-agricultores-da-ribeira-dos-picos/>
- Gransee, A., & Führs, H. (2013). Magnesium mobility in soils as a challenge soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions, *Plant and Soil*, 368, 5-21.
- Gupta, U. C., & Cutcliffe, J. A. (1984). Effects of soil and foliar applications of boron on the yield and boron concentration of crops. *Plant and Soil*, 82(3), 287-295.
- Hag Husein, H., Lucke, B., Bäuml, R., & Sahwan, W. (2021). A Contribution to soil fertility assessment for arid and semi-arid lands. *Soil Systems*, 5(3), 42.

- Hauer-Jákli, M., & Tränkner, M. (2019). Critical leaf magnesium thresholds and the impact of Mg on photosynthesis, carbohydrate partitioning and plant growth: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, 766.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of macronutrients, In P. Marschner (Ed.), *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed., pp. 135-189). Academic Press.
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic phosphorus in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195.
- Howeler, R. H. (2002). Cassava mineral nutrition and fertilization. In R. J. Hillocks, J. M. Thresh & A. C. Bellotti (Eds.), *Cassava: Biology, production and utilization* (pp. 115 – 147). CABI Publishing.
- Inforpress. (2022). *Reabilitação da estrada da Ribeira dos Picos Melhora acesso aos mercados*. <https://opais.cv/criadas-outras-oportunidades-em-ribeira-dos-picos/30/10/2022/>
- Jones, J. B. (2012). *Plant nutrition and soil fertility manual* (2nd ed.). CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
- Kardol, P., Bezemer, T. M., & van de Putten, W. H. (2006). Temporal variation in plant-soil feedback controls succession. *Ecology Letters*, 9(9), 1080-1088.
- Kobayashi, N. I., & Tanoi, K. (2015). Critical issues in the study of magnesium transport systems and magnesium deficiency symptoms in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 23076-23093.
- Lal, R. (2020). Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and plant Nutrition*, 66(1), 1-9.
- Lallaouna, R., Ababsa, N., Dellaa, Y., & Boudjabi, S. (2023). Soil respiration as an indicator of quality under agrochemical treatment in a semi-arid area of southern Mediterranean. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 531.
- Lima, J. F. de (Ed.). (2003). *Mamão: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Embrapa Informação Tecnológica..
- Lindsay, W. L. (1978). Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant and Soil*, 130(1-2), 27-34.
- Madeira, M. A. V., & Pinto, M.A. (2014). Os solos da República de Cabo Verde: Considerações gerais sobre o seu conhecimento. In F. C. Pinto (Ed.), *Cabo Verde – Agronomia e recursos Naturais* (pp. 201- 216). ISA Press.
- Monteiro, F., Fortes, A. R., Ferreira, V. A. D. S., Pereira, A., Gomes, I., Correia, A. M., & Romeiras, M. M. (2020). Current status and trends in Cabo Verde agriculture. *Agronomy*, 10(1), 74.

- Moore, P. H., & Botha, F.C. (Eds.). (2014). *Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology*. Wiley-Blackwell.
- Moreira, A., & Fageria, N. K. (2009). Yield, vigor, and nutrient concentrations in leaf tissue of Cavendish banana under different nitrogen fertilization rates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(15-16), 2548-2560.
- Mulla, D.J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- Meier, U. (2018). *Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph*. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>.
- Nable, R. O., Bañuelos, G. S., & Paull, J. G. (1997). Boron Toxicity. *Plant and Soil*, 193(1-2), 181-198.
- Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., & Dick, R. P. (2018). Soil enzyme activity: A brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 11-19.
- Nwachokor, M. A., Ozu, F.O., & Molindo, W. A. (2009). Variations in physicochemical properties and productivity implications for soils in the derived savannah of southern Nigeria. *American-Eurasian Journal of Agronomy*, 2(3), 124-129.
- Nakasone, H. Y., & Paull, R. E. (1998). *Tropical fruits* (Crop Production Science in Horticulture No. 7) CAB International. ISBN 978-0851992549.
- Orozco-Romero, J., & Pérez-Zamora, O. (2006). Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*Musa AAA Simmonds*) cv. Gran Enano. *Agrociencia*, 40(2), 149-162.
- Palacios-Díaz, M. d. P., Fernández-Vera, J. R., Hernández-Moreno, J. M., Amorós, R., & Mendoza-Grimón, V. (2023). *Effect of irrigation management and water quality on soil and Sorghum bicolor Payenne yield in Cape Verde*. *Agriculture*, 13, 192.
- Patzel, N., Sticher, H., & Karlen, D. L. (2000). Soil fertility – Phenomenon and concept. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55(2), 129- 142.
- Pina, A. F. L. de. (2009). *Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago – Cabo Verde* (Tese de doutoramento). Universidade de Aveiro.
- Plaza, C., Zaccone, C., Sawicka, K., Méndez, A. M., Tarquis, A., Gascó, G., Heuvelink, G. B. M., Schuur, E.A. G., & Maestre, F. T. (2018). Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. *Scientific Reports*, 8, 13788.
- Poozesh Shirazi, M., Enjavinezhad, S. M., & Moosavi, A. A. (2024). Chemical fractions of potassium in arid regions calcareous soils: The impact of microclimates and physiographic variability. *PLoS ONE*, 19(11), e034239.
- Reid, R. (2010). Can we really increase yields by making crops tolerant to boron toxicity? *Pant Science*, 178(1), 9-11.
- Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 397-409.

- Robertson, G. P., & Groffman, P. M (2015). Nitrogen transformations. In E. A. Paul (Ed.), *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (4th ed., pp. 421-446). Academic Press.
- Sanchez, P. A. (2019). *Properties and management of soils in tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Santos, L.S.D. (2016). *Ações de gestão ambiental na mitigação da desertificação em Cabo Verde: Análise de técnicas de conservação do solo e da água* (Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Coimbra).
- Schloter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S. J., & Van Elsas, J.D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 1-10.
- Sequeira, E., Leão de Sousa, P., Correia, A. M., & Rolim, J. (2025). The current status of irrigated agriculture in Cape Verde and its link to water scarcity. *Agronomy*, 15(7), 165.
- Shahidian, S., Serralheiro, R. P., Serrano, J., & Sousa, A. (2014). O desafio dos recursos hídricos em Cabo Verde. In F. C. Pinto (Ed.), *Cabo Verde – Agronomia e Recursos Naturais*. ISA Press.
- Shorrocks, V. M. (1997). The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, 193(1-2), 121-148.
- Silva, M. A., Jifon, J. L., Da Silva, J. A. G., & Sharma, V. (2007). Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(12), 857 – 864.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Stoleru, V., Mangalagiu, I., Amăriucăi-Mantu, D., Teliban, G.-C., Cojocaru, A., Rusu, O.-R., Burducea, M., Mihalache, G., Rosca, M., Caruso, G., Sekara, A., & Jitoreanu, G. (2023). Enhancing the nutritional value of sweet pepper through sustainable fertilization management. *Frontiers in Nutrition*, 10, Article 1264999.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6^a ed.). Artmed.
- Tavares, E. O. M. (2019). *Implementação da agricultura de precisão no perímetro agrícola de Colonato* (Dissertação de mestrado, Universidade de Cabo Verde). <https://ciencia.cv/handle/123456789/292>
- Tougaard, S. L., Szameitat, A., Møs, P., Liu, F., Liu, X., Zhu, Y., & Olesen, J. E. (2023). Leaf age and light stress affect the ability to diagnose P status in field-grown potatoes. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1100318.
- Viscarra Rossel, R.A., & Behrens, T. (2010). Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158(1-2), 46-54.
- Volf, M. R., Benites, V. M., Azevedo, A. C. de Moraes, M. F., Tiritan, C. S., & Rosolem, C. A (2023). Soil mineralogy and K reserves in soils from the Araguaia River Valley, Brazil. *Geoderma regional*, 33, e00650.

- Veloso, A., Sempiterno, C., Calouro, F., Rebelo, F., Pedra, F., Castro, I. V., Gonçalves, M. C., Marcelo, M. E., Pereira, P., Fareleira, P., Jordão, P., Mano, R., & Fernandes, R. (2022). *Manual de fertilização das culturas* (3ª ed.). Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV).
- Van Reeuwijk, L. P. (2002). *Procedures for soil analysis* (6th ed., Technical Paper 9). ISRIC-FAO.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed., Global ed.). Pearson Education Limited.
- Warke, A. T., & Wakgari, T. (2024). A review on the impact of soil acidification on plant nutrient availability, crop productivity, and management options in the Ethiopian Highlands. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 13(2), 31 – 45.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487 – 511.
- White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7), 1073-1080.
- World Bank. (2021, November 16). Cabo Verde: *From a past of isolation to a present of hope in Ribeira dos Picos*. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/11/16/cabo-verde-from-a-past-of-isolation-to-a-present-of-hope-in-ribeira-dos-picos>
- Wuenschel, R., Unterfrauner, H., Peticzka, R., & Zehetner, F. (2015). A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant, Soil and Environment*, 61(2), 86-96.
- Yibati, H., Gao, J., Zhang, Y., Li, Q., Xu, X., He, P., & Yin, X. (2025). Estimation of processing tomato nutrient uptake based on the QUEFTS model in Xinjiang. *Agronomy*, 15(2), 274.