



Faculdade de Ciências
Departamento de Ciências Biológicas
Licenciatura em Ecologia e Conservação da Biodiversidade Terrestre

Culminação de Estudos II
Trabalho de Investigação

Efeito do Crómio (Cr) no crescimento de Milho (*Zea mays*), e o seu risco ecológico.

Autora:
Palmira Jorge Leopoldo De Oliveira

Maputo, Fevereiro de 2025



Faculdade de Ciências
Departamento de Ciências Biológicas
Licenciatura em Ecologia e Conservação da Biodiversidade Terrestre

Culminação de Estudos II
Trabalho de Investigação

Efeito do Crómio (Cr) no crescimento de Milho (*Zea mays*), e o seu risco ecológico.

Autora:

Palmira Jorge Leopoldo De Oliveira

Supervisores

Professor Doutor Orlando Quilambo

Professora Doutora Célia Martins

Mestre Sónia Ventura Guilundo

Maputo, Fevereiro de 2025

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pela força que tem me dado até o dia de hoje, pois quando pensei em desistir ele segurou-me a mão e deu-me sabedoria para fazer o certo: lutar pela minha formação.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e compreensão durante esta jornada acadêmica. Este trabalho é dedicado a vocês, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus docentes e supervisores Mestre Sónia Guilundo, Professora Doutora Célia Martins e Professor Doutor Orlando Quilambo, pelo apoio e acompanhamento durante a elaboração deste trabalho, cujo conhecimento e orientação foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico.

Ao mestre Mário Machunguene Jr, pela orientação, compreensão, ensinamentos e pela valiosa oportunidade e amizade em todas as etapas de realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos Lacerda Teixeira, Jéssica Matucanduva, Ismail Mussa, Rosalino Victorino, Luís Fernando, Verónica Nhatave, Laiza Cumbi e a todos os colegas que fizeram parte da experiência, pela ajuda durante o longo percurso.

Ao licenciado José Matlombe pelo apoio concedido durante a análise laboratorial.

À todos que acreditaram em mim e me incentivaram, mesmo nos momentos mais difíceis.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Palmira Jorge Leopoldo De Oliveira, declaro pela minha honra que o presente trabalho de pesquisa em Licenciatura em Ecologia e Conservação da Biodiversidade Terrestre é da minha autoria, nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau acadêmico e os resultados aqui apresentados reflectem a realidade da minha investigação e das orientações dos meus supervisores, estando devidamente citadas no trabalho todas as fontes consultadas.

Palmira Jorge Leopoldo De Oliveira

Maputo, Fevereiro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Jorge Leopoldo De Oliveira e Clara Mário Jamula, meu querido padrasto Graciano Nevila, meus tios Abudo Baduro e Laura Leopoldo De Oliveira, aos meus irmãos e familiares que me ajudaram moralmente e financeiramente, e deram motivação para ir avante com os estudos.

RESUMO

O aumento populacional global tem levado a uma intensificação da produção industrial, com destaques para consumíveis cuja composição química inclui metais pesados, para responder a demanda dos mesmos. No entanto o descarte inadequado de resíduos permite a entrada de substâncias tóxicas no solo, o que afeta negativamente os padrões de crescimento das plantas, e consequentemente os animais e o Homem.

Altas concentrações de metais interferem nos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas, podendo retardar o ciclo produtivo, reduzir a biomassa, impedir a absorção e transferência de nutrientes ou mesmo causar a morte das plantas. No Homem, o acúmulo de metais pesados oriundo de plantas alimentares, naturalmente transferidos através da cadeia alimentar, pode causar sérios problemas de saúde como a toxicidade neurológica e doenças cancerígenas. Ademais, a contaminação de solos de importância agrícola por metais pesados pode ter consequências negativas na economia das comunidades afectadas.

O milho (*Zea mays*) é uma planta agrícola com potencial remediação de metais pesados como crómio.

Os resultados mostraram que o crómio está abaixo dos limites de referência segundo a legislação Sul Africana, e que o aumento da concentração de crómio no solo resultou em uma diminuição significativa na biomassa do milho ou seja, as plantas submetidas a maiores concentrações de crómio apresentaram crescimento baixo.

Palavras-chave: Crómio, crescimento vegetal, toxicidade de metais pesados, milho (*Zea mays*).

ACRÓNIMOS

DCB	Departamento de Ciências Biológicas
DQ	Departamento de Química
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
IIAM	Instituto de Investigação Agrária de Moçambique
Cr	Crómio
ICP	Plasma por Acoplamento Indutivo
CTC	Capacidade de troca catiónica
ANOVA	Análise de variância
IRE	Índice de Risco Ecológico
FT	Fator de translocação
FBA	Fator de Bioacumulação
BCF	Fator de bioconcentração

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Escala de Pratolongo (Costa et al., 2015).	7
Tabela 2. Classificação da capacidade de troca catiónica e das bases de troca (adaptado de Varennes, 2003).	7
Tabela 3. Classificação da matéria orgânica	8
Tabela 4: Material e equipamentos	22
Tabela 5. Desenho Experimental	23
Tabela 6. Nível de contaminação por metais pesados (Soleimani et al., 2023).....	27
Tabela 7. Nível de contaminação por metais pesados (Soleimani et al., 2023).....	28
Tabela 8. Característica físico-químico do solo dos tratamentos controle e com adição de 10 e 30 mg/kg de crómio.	30
Tabela 9. Factor de translocação, Bioconcentração e Bioacumulação nas plantas de Zea Mays contaminadas por crómio.	38
Tabela 10. Estatística de peso fresco e biomassa aérea e raiz da planta de milho em mg em solos contaminados por crómio 00 mg.kg ⁻¹ , 10 mg.kg ⁻¹ e 30 mg.kg ⁻¹ de concentração.	51
Tabela 11. Área estomática da planta de milho em mg em solos contaminados por crómio 00 mg.kg ⁻¹ , 10 mg.kg ⁻¹ e 30 mg.kg ⁻¹	51
Tabela 12. Estatística de Clorofila a (663 nm), clorofila b (647 nm) e betacarotenóide (470 nm).	51
Tabela 13. Estatística de Análises do Plasma por Acoplamento Indutivo(ICP) .Biomassa aérea da raiz e concentração de crómio no solo.	52
Tabela 14. De cima para baixo e da esquerda para direita temos: testes de normalidade para (a) peso fresco da parte aérea (1) e da raiz (2), (b) área estomática (3), (c) clorofilas a (4), clorofila b (5) e betacarotenóide (6), (d) peso fresco da parte aérea (7) e da raiz (8); (e) ICP para biomassa aérea (9), raiz (10) e solo (11).....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica do Campus principal da Universidade Eduardo Mondlane.	21
Figura 2. Sementes de Milho (<i>Zea mays</i>).	24
Figura 3. Efeito do crómio na concentração de (00 mg.kg-1, 10 mg.kg-1 e 30 mg.kg-1) do peso fresco da planta de milho na nona semana após a experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.	32
Figura 4. Efeito do crómio na concentração de (00 mg.kg-1, 10 mg.kg-1 e 30 mg.kg-1) da biomassa da planta de milho na nona semana após a experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.	33
Figura 5. Densidade estomática das folhas do milho em solos contaminados por Crómio a 0.00, 10.00 e 30.00 mg ap longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 folhas $\pm$ desvio padrão.	34
Figura 6. Concentrações de Clorofilas a, b e betacarotenoide nas folhas do milho em solos contaminados por Crómio a 00 mg.kg-1, 10 mg.kg-1 e 30 mg.kg-1 ao longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 folhas $\pm$ desvio padrão.	35
Figura 7. Concentração dos metais pesados nos tecidos da planta do <i>Zea mays</i> ao longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.	36
Figura 8. Concentração do crómio no solo dos tratamentos (00 mg.kg-1, 10 mg.kg-1 e 30 mg.kg1) no final da experiência . Os dados referem-se à média de 3 réplicas $\pm$ desvio padrão.	36
Figura 9. De cima para baixo e da esquerda para direita temos : a) Planta de milho uma semana após a sementeira; b) planta do milho em crescimento (5 semanas); c) Planta do milho 3 meses após a sementeira; d) Raiz, Folhas e Caúle da planta do milho; e) Preparação observação dos estômas das folhas de milho; f) Imagem da densidade estômática, observados com a objectiva de 10X.	56

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
DECLARAÇÃO DE HONRA	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
RESUMO	iv
ACRÓNIMOS	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. Problema.....	3
2.1. Justificação.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Milho.....	5
3.1.1. Classificação taxonómica, origem e importância	5
3.2. Características Fisiológicas de milho	5
3.3. Características físico-químicos dos solos para cultivo do milho	6
3.4. Textura do solo, pH e capacidade de troca catiónica	6
3.5. Percentagem de matéria orgânica, limo, areia grossa e areia fina.....	8
3.6. Vantagem do uso do milho em experiências com metais	9
4. Crómio: características, aplicação, contaminação ambiental e Efeitos do crómio na saúde.	9
4.1. Características	9
4.2. Aplicação e contaminação ambiental	9
4.3. Crómio em plantas.....	10
4.4. Fatores que influenciam a captação de metais pesados em plantas	11
4.5. Risco a saúde humana e ambiente por crómio.	12
4.6. Contaminação do solo e recursos hídricos em Moçambique por Crómio	13
4.7. Impacto dos metais pesados na qualidade do solo	14
5. Mecanismos de adaptação do milho a crómio.....	15
5.1. Factores externos que afectam o crescimento do milho	15
5.1.1. Água.....	15
5.1.2. Temperatura	15
5.1.3. Luz.....	16
6. Pigmentos fotossintéticos.....	16
6.1. Clorofila e Carotenóides.....	17

6.2. Fotossíntese e metais.....	17
6.3. Densidade Estomática.....	18
7. Estatística descritiva e testes de comparação múltipla (ANOVA e Krsukal-Wallis).	18
8. Índice de Risco Ecológico	19
8.1. Factor de bioacumulação	19
8.2. Factor de Bioconcentração	19
8.3. Factor de Translocação	19
9. Objectivos	20
9.1. Geral	20
9.2. Específicos.....	20
9.3. Hipóteses	20
11. Área de estudo.....	21
10.1. Material e Equipamentos.....	22
11. Colheita do solo	23
11.1. Preparação dos materiais.....	23
11.2. Desenho Experimental	23
11.3. Material vegetal	24
11.4. Determinação da Densidade estomática	25
11.5. Determinação de Clorofila a, b e Caratenóides.....	25
11.6. Digestão e leitura dos metais pesados.....	26
12. Caracterização físico-química do solo	26
12.1. Índice de poluição ecológica	27
12.2. Factor de Translocação, Bioconcentração e Bioacumulação.....	27
12.3. Potencial risco ecológico	28
13. Análise estatística	29
14. RESULTADOS	30
14.1. Características físico-químicas do solo.....	30
14.2. Efeito do crómio no peso fresco e biomassa do <i>Zea mays</i>	32
15. Densidade estomática.....	33
15.1. Concentrações de Clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> e betacarotenóides.	34
16. Análise da concentração de crómio na biomassa dos vegetais da planta do <i>Zea mays</i> e no solo por Espectrometria de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP).....	35

16.1. Concentração do crómio na biomassa do <i>Zea mays</i>	35
16.2. Concentração do crómio no solo.	36
17. Índice ecológico	37
17.1. Índice de poluição ecológica.	37
17.1.1. Potencial risco ecológico	37
18. DISCUSSÃO.....	39
19. CONCLUSÃO.....	42
20. LIMITAÇÕES	43
21. RECOMENDAÇÕES	44
22. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
23. APÊNDICES 1	51
24. APÊNDICES 2	56

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de solos por metais pesados é uma preocupação ambiental a nível mundial (Chen *et al.*, 2019). A contaminação por metais pesados ocorre, sobretudo em zonas industriais e de mineração, devido ao intenso tráfego de veículos, esgoto e pilhas de rejeitos. Pilhas de rejeitos contendo rochas fragmentadas, por exemplo, são depositadas ao ar livre, sendo expostas ao ambiente oxidante e à ação do intemperismo. Os impactos de poluentes na saúde humana por meio de inalação e ingestão de metais pesados, via alimentação e água para consumo são frequentemente manifestados a longo prazo e de várias formas. Por exemplo, problemas mentais, perda do controle motor, disfunção crítica dos órgãos, câncer, mal-estar crônico e até a morte são registrados (Siegel., 2020).

Os metais pesados liberados no ambiente se acumulam nos organismos, percorrendo as cadeias tróficas, a partir da acumulação em plantas e destas passando aos herbívoros e carnívoros, inclusive os humanos. Estes também, permanecem no ecossistema em concentrações perigosas por um longo período, sobretudo nos sedimentos (Larcher *et al.*, 2018).

O crómio (Cr) está entre os metais pesados que contaminam o meio ambiente e é o sétimo elemento químico mais abundante na Terra (Lozi. 2019; Jaishankar *et al.*, 2021). Uma vez em altas concentrações, o crómio causa graves consequências quando entra em contato com o organismo humano. Os seus efeitos podem levar a quadros graves de dermatites e induzir ação cancerígena. A ingestão acidental de altas doses de compostos de crómio, pode causar falência renal aguda, caracterizada por perda de proteínas e sangue na urina. (Jaishankar *et al.*, 2021). Tendo em conta a magnitude dos efeitos destes metais, a correcção ou descontaminação dos solos é crucial sob ponto de vista ambiental e saúde pública (Souza *et al.*, 2022).

A correcção de solos contaminados por crómio pode ocorrer por meio de métodos químicos, que compreendem o uso de substâncias químicas como solventes eutéticos profundos à base de cloreto de colina e moagens de bolas (Huang *et al.*, 2023), e por métodos biológicos, em particular o uso da fitorremediação, uma técnica que compreende o uso de plantas que toleram altas concentrações de metais pesados, o que possibilita a sua descontaminação. Os metais pesados são incorporados nos órgãos vegetativos sem causar altos níveis de intoxicação à planta (Souza *et al.*, 2018).

Em Moçambique o milho é a cultura mais importante, comparativamente a outros cereais, constituindo, deste modo, principal fonte de alimentação e de renda, sobretudo para as comunidades que residem no meio rural (Cangela *et al.*, 2021). Actualmente, as pequenas e

médias explorações ocupam cerca de 2.2 milhões de hectares para o cultivo de milho (Mader, 2020). Referente a sua biologia, a planta do milho é de fácil cultivo, possui ciclo de vida curto e apresenta órgãos vegetais distintos podendo ser cultivado uma ou duas vezes por época, dependendo da natureza da irrigação, o que torna a planta potencial corrector de solos contaminados por metais pesados (Ma *et al.*, 2022).

Entretanto, sendo que plantas submetidas a diferentes concentrações de metais pesados (condição de stress) tendem apresentar mudanças ou adaptações (hipótese a ser testada) medidas através de índices de crescimento (Grochowska-Niedworok *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2022), questionam-se os efeitos do crómio no crescimento de milho (*Zea mays*). Em relação ao crómio, vários ensaios foram realizados com culturas agrícolas como amendoim (*Arachis hypogaea* L), feijoeiro (*Vigna unguiculata*) e planta de milho (*Zea mays*), com vista a identificar os níveis de tolerância a esses metais, e consequentemente minimizar os seus efeitos nefastos sobre o ecossistema e saúde pública. Essas plantas são de fácil acesso, possuem ciclo de vida curto e apresentam órgãos vegetais distintos, o que permite analisar como a presença do crómio afecta o crescimento da planta de milho (Haq *et al.*, 2018; Piotto *et al.*, 2018; Grochowska-Niedworok *et al.*, 2020; Romero-Estévez *et al.*, 2020; Asadullah *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2022).

2. Problema

O crómio é um metal altamente tóxico para as plantas, provocando efeitos negativos no crescimento das raízes, caules e folhas, que podem afetar a produção e o rendimento total de matéria seca de uma planta. O crómio causa também efeitos deletérios nos processos fisiológicos das plantas, como fotossíntese, relações hídricas e nutrição mineral. Concentrações elevadas de metais pesados resultam em fitotoxicidade, levando à disfunções, devido à habilidade dos iões ligarem-se fortemente a átomos de oxigénio, nitrogénio e enxofre que são abundantes em sistemas biológicos (Shanker, 2020).

Segundo Julia Roberts (2021) a população de uma cidade americana teve graves problemas de câncer e contaminação ambiental desenvolvidas pelo crómio. Infelizmente, ainda hoje o crómio VI, metal de alta toxicidade e prejudicial à saúde humana é amplamente empregado na indústria automobilística, na metalurgia, eletrônica e aeronáutica. Pesquisadores da Escola de Engenharia de Lorena (EEL) da USP e da University of Surrey-UK, Inglaterra, uniram-se para buscar alternativas para eliminar sua utilização.

A expansão industrial está situada próxima a áreas densamente povoadas. Assim, as comunidades tendem a se deslocar para essas áreas devido à oferta de emprego e à disponibilidade de bens e serviços (Bernardo, 2023). Em Moçambique, O Parque Industrial de Beluluane, por exemplo, apresenta concentrações elevadas de crómio no solo, o que representa sérios riscos para a saúde pública, já que, as populações locais dependem da agricultura para sua sobrevivência. Isso representa um desafio significativo, pois metais pesados podem se acumular em tecidos de colheitas e, posteriormente, transferidos para humanos por meio do consumo, representando sérios riscos à saúde. Esse acúmulo pode levar a uma série de problemas de saúde, como câncer de pele, mama, cérebro, distúrbios renais, doenças cardiovasculares, doenças ósseas, malformações em recém-nascidos e neurodistúrbios (Machunguene Jr *et al.*, 2024). O presente estudo pretende avaliar o efeito do crómio no crescimento de milho (*Zea mays*) e seu risco ecológico.

A questão da investigação é: Será que o Milho (*Zea mays*) tolera os efeitos da exposição à solos contaminados por crómio?

2.1. Justificação

Nos últimos anos, tem-se intensificado a atenção internacional sobre os impactos ambientais provocados pelas atividades industriais nos países da África Subsaariana. Organizações não-governamentais, centros de pesquisa e instituições multilaterais vêm pressionando por uma maior regulamentação das emissões industriais, em consonância com os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela ONU, especialmente aqueles ligados à saúde ambiental e uso sustentável dos recursos naturais (UNEP, 2020; UNDP, 2022). Em países como Moçambique, o avanço da industrialização tem contribuído para o aumento da poluição atmosférica e terrestre, incluindo a liberação de poluentes como compostos orgânicos voláteis, óxidos e metais pesados como o crómio (Mabaso *et al.*, 2021; Nhantumbo *et al.*, 2023).

Essa realidade impõe sérios desafios à saúde humana e à integridade dos ecossistemas, exigindo políticas públicas baseadas em evidências científicas. Países que enfrentam essas mesmas problemáticas têm desenvolvido normas ambientais apoiadas em estudos de risco ecológico, com base nos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (WHO *et al.*, 2021). Considerando o potencial tóxico do crómio e sua capacidade de se acumular em organismos vegetais, torna-se essencial compreender o seu comportamento no ambiente, especialmente em culturas alimentares como o *Zea mays*. O conhecimento gerado pode subsidiar ações de gestão ambiental e estratégias de mitigação do risco socioambiental no contexto moçambicano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Milho

3.1.1. Classificação taxonómica, origem e importância

O milho apresenta a seguinte classificação taxonómica:

Nome científico: *Zea mays*

Classe: Liliopsida

Ordem: Poales

Família: Poaceae

Género: *Zea*

Nomes comuns: Nomes moçambicanos: (Ronga); Gwere, bobore (Sofala, Manica, Tete, Zambézia); Cimanga (Tete).

Nomes internacionais: Milho, milho (Português), Maize (Inglês).

De acordo com United States Agency for International Development (USAID 2011), O milho (*Zea mays*), é uma gramínea originária de capim chamado teosinte no sul do México, é considerado terceiro cereal mais produzido a nível mundial, depois do arroz e trigo em termos de área cultivada e a produção total. A mesma fonte refere que em Moçambique, o milho faz parte do grupo de três culturas mais básicas em termos de segurança alimentar e ocupa mais de 1/3 da terra arável, sendo cultivado por mais de 3/4 das famílias dos 2.5 milhões de agregados familiares.

3.2. Características Fisiológicas de milho

O milho (*Zea mays*) é uma gramínea com um só caule (colmo), erecta e que apresenta de 12 a 20 folhas, com sistema radicular fasciculado de peso por hectare que varia de 30 a 40 toneladas. O milho apresenta flores masculinas e femininas na mesma planta, mas separadas em pontos diferentes. As flores femininas desenvolvem-se no terço médio da planta, nas axilas das folhas e estão agrupadas em espiga. As flores masculinas aparecem na extremidade superior do caule formando panícula. A polinização faz-se por acção do vento, provocando a queda do pólen da panícula sobre as sedas da espiga, quer as da própria planta, quer as de plantas próximas (até 500 metros). Entretanto, o milho é uma cultura basicamente de polinização cruzada. Cada uma

das sedas (ou barbas) faz parte de uma flor, na base da qual se irá desenvolver um grão de milho, depois de se dar a polinização (Braz, 2023).

3.3. Características físico-químicos dos solos para cultivo do milho

O cultivo do milho (*Zea mays*) depende muito das características físico-químicas do solo, pois, essas características influenciam diretamente no crescimento, desenvolvimento e saúde da planta do milho determinando a disponibilidade de água, nutrientes e a capacidade das raízes de se desenvolverem de forma adequada.

3.4. Textura do solo, pH e capacidade de troca catiónica

O termo textura do solo refere-se à proporção de partículas de diferentes dimensões na terra fina (Varennnes, 2019). A terra fina corresponde ao material com diâmetro inferior a 2 mm, sendo a principal responsável pelas propriedades químicas do solo. De acordo com a União Internacional de Ciências do Solo, as partículas de terra fina podem ser subdivididas em: areia grossa (2 – 0,2 mm), areia fina (0,2 – 0,02 mm), limo (0,02 – 0,002 mm) e argila (<0,002 mm) (Costa, 2004). Por outro lado, as partículas de dimensões superiores a 2 mm são designadas por elementos grosseiros. Estes elementos apresentam fraca reatividade e a sua presença no solo reduz a quantidade de água e de nutrientes que o solo poderá reter (Varennnes, 2019).

O pH do solo é uma medida representativa da acidez ou alcalinidade do solo, sendo expressa em unidades de pH ($\text{pH} = -\log \text{H}^+$). Considera-se, dois tipos de acidez no solo: acidez potencial e acidez ativa. A acidez potencial define-se pela quantidade de hidrogeniões acídicos que se encontram adsorvidos e imobilizados nas estruturas dos constituintes do solo e que, em certas condições, podem entrar em solução tornando-se assim ativos (Madeira, 2011). E, por outro lado, a acidez ativa é definida pela concentração dos iões H^+ livres existentes na solução do solo, esta é a acidez coincidente com o conceito de pH do solo. Portanto, o pH do solo exprime a sua acidez ativa, sendo que segundo a escala de Pratolongo pode ser categorizado nos seguintes intervalos (Costa, 2015).

Tabela 1. Escala de Pratolongo (Costa et al., 2015).

pH do solo	Designação
4,5 ou menor	Hiperácido
4,6 a 5,5	Ácido
5,6 a 6,5	Subácido
6,6 a 7,5	Neutro
7,6 a 8,5	Subalcalino
8,6 a 9,5	Alcalino
9,6 ou maior	Hiperalcalino

A capacidade de troca catiónica do solo é uma medida que representa a totalidade de cargas positivas, dos catiões, que um solo pode adsorver e trocar a determinado pH. Esta medida relaciona-se não só com a textura do solo, mas também com o tipo de argila existente, a quantidade de matéria orgânica e com o pH do solo (Varennnes, 2019). A troca catiónica, processo que designa a troca entre os catiões adsorvidos à superfície dos coloides e os existentes na solução do solo, tem um significado elevado, uma vez que influencia a quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas e a sua retenção no solo.

Os catiões de troca que normalmente existem no solo são Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , H^{+} e Al^{3+} , sendo possível quantificá-los individualmente exprimindo os valores, geralmente, em centimoles de carga por quilograma de terra fina (cmol (+) kg^{-1}) (Madeira, 2022). Os primeiros quatro catiões correspondem às bases de troca, enquanto os últimos dois correspondem à acidez de troca. A CTC do solo e as quantidades individuais das bases de troca podem ser classificadas de forma qualitativa numa gama de Muito baixa a Muito alta, conforme o quadro a seguir:

Tabela 2. Classificação da capacidade de troca catiónica e das bases de troca (adaptado de Varennnes, 2003).

Classificação	CTC	Bases de troca (kg^{-1})			
	(cmol (+) kg^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}
Muito baixa	<5,0	<2,0	<0,5	<0,1	<0,1
Baixa	5,0-10,0	2,0-5,0	0,5-1,0	0,1-0,25	0,1-0,25
Média	10,1-20,0	5,1-10,0	1,1-2,5	0,26-0,50	0,26-0,50
Alta	20,1-40,0	10,1-20,0	2,6-5,0	0,51-1,0	0,51-1,0
Muito alta	>40,0	>20,0	>5,0	>1,0	>1,0

3.5. Percentagem de matéria orgânica, limo, areia grossa e areia fina

A matéria orgânica do solo, é um dos componentes mais essenciais para a qualidade e a resiliência do solo, inclui uma grande variedade de substâncias, incluindo seres vivos, tecidos mortos vegetais e animais em vários estágios de decomposição e uma mistura complexa de material orgânico já decomposto e modificado ou sintetizado de novo, designada por húmus. Esta mistura representa normalmente 60-80% da matéria orgânica total dos solos.

Percentagem da areia grossa: Partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 0,20 mm. areia Fina: Partículas com diâmetro entre 0,20 mm e 0,05 mm e Limo: Partículas com diâmetro entre 0,05 mm e 0,002 mm (Varennnes, 2003).

O teor de matéria orgânica no solo depende de vários fatores, como a cultura, o clima, o solo, as práticas culturais e a adição de fertilizantes orgânicos. o teor de matéria orgânica é mais elevado nos solos de textura fina do que nos de textura grosseira, por se estabelecerem complexos argilo-húmicos nos primeiros. As práticas culturais, como a correção de acidez ou a aplicação de fertilizantes, vão determinar a produção vegetal e logo a quantidade e qualidade dos resíduos presentes. Por outro lado, outros fatores, produções elevadas e aplicações de fertilizantes orgânicos traduzem-se em maior quantidade de matéria orgânica (Madeira, 2022).

A matéria orgânica apresenta diversos benefícios para o solo (Varennnes, 2019):

- ❖ Melhora o arejamento do solo, através do aumento da porosidade.
- ❖ Confere cor mais escura ao solo, o que permite um aquecimento mais rápido das camadas superficiais.
- ❖ Aumenta a capacidade do solo para reter água e nutrientes.
- ❖ Contribui para a formação e a estabilização dos agregados do solo, através da interação com as partículas de argila.

A matéria orgânica pode ser classificada como baixa, media ou alta em relação a sua percentagem na solução do solo:

Tabela 3. Classificação da matéria orgânica

Classificação	Matéria orgânica
Baixa	< 2.5
Média	2.5 - 5
Alta	> 5

3.6. Vantagem do uso do milho em experiências com metais

O milho é a principal cultura alimentar em Moçambique e é fundamental para a dieta diária da população. É consumido principalmente na forma de farinha de milho, que é utilizada para preparar o xima, um prato tradicional que acompanha várias refeições.

Sendo rico em carboidratos, o milho fornece uma fonte essencial de energia. No entanto, uma dieta baseada predominantemente em milho pode levar à desnutrição, especialmente à deficiência de niacina, conhecida como pelagra, se não for complementada com outras fontes de nutrientes.

O milho é cultivado em quase todas as províncias de Moçambique, sendo uma cultura de subsistência crucial para muitas famílias rurais. Ele ocupa uma grande área de terras agrícolas e é plantado tanto em pequenas propriedades quanto em grandes explorações comerciais.

A produção de milho gera empregos ao longo de sua cadeia de valor, desde o plantio até a colheita, o processamento e a comercialização. Isso inclui atividades como a produção de farinha e a fabricação de ração animal.

4. Crómio: características, aplicação, contaminação ambiental e Efeitos do crómio na saúde.

4.1. Características

O crómio (Cr) é o sétimo elemento químico mais abundante na Terra, tendo número atômico 24 e estando em estado sólido na temperatura ambiente. Trata-se de um metal descoberto em 1797 por Louis Nicolas Vauquelin no mineral crocoíta, na Rússia (Lozi *et al.*, 2019).

O crómio é um metal de transição, duro, frágil, de coloração cinza semelhante ao aço. É muito resistente à corrosão. A forma oxidada trivalente é natural no meio ambiente, enquanto que as formas 0 e +6 são geralmente produzidas por processos industriais, principalmente na fabricação de ligas metálicas.

Seu maior estado de oxidação é +6 (hexavalente), ainda que estes compostos sejam muito oxidantes. O estado mais estável é +3 (trivalente) sob condições de redução.

4.2. Aplicação e contaminação ambiental

Os compostos de crómio são usados na produção de ferrocromo, eletroplatina, produção de pigmentos e curtimento. Os principais produtos de crómio (sais, óxidos, metal, ligas) são

obtidos através do mineral cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) em um processo que envolve a redução desse mineral com alumínio, carbono ou silício, seguido de sua purificação (Seiler e Siegel, 1988). Historicamente, o crômio já era usado em 1820, sob a forma de dicromato de potássio, como pigmento na indústria têxtil e, desde 1879, a mineral cromita era rotineiramente utilizado na fabricação de refratários (Arfsten *et al.*, 2023).

Os compostos de crômio, produzidos pelas indústrias químicas, além de serem utilizados em indústrias de tratamentos superficiais como ligas metálicas, galvanização e cromação, são utilizados na manufatura de pigmentos, curtumes, com o intuito de endurecer a pele, garantindo a preservação do produto final; para impedir o apodrecimento no tratamento de madeiras, mantendo-as limpas e secas, não emitindo odores; tratamento de água e fabricação de alguns fertilizantes como os nitrogenados, fosfatados, superfosfatados (Giannetti, 2018).

Entre as fontes naturais de contaminação ambiental estão os incêndios florestais e erupções vulcânicas. Em áreas onde ocorrem depósitos significativos de crômio, as fontes de água podem apresentar concentrações superiores a $50 \mu\text{g/L}$, valores estes que ultrapassam os padrões internacionais para água potável. As principais atividades humanas na qual o crômio e seus compostos são liberados para o meio ambiente, são: emissões decorrentes da fabricação de cimento, construção civil, devido aos resíduos provenientes do cimento, soldagem de ligas metálicas, minas e fundições, manufatura de aço e ligas, indústrias de galvanoplastia, lâmpadas, lixos urbano e industrial, incineração de lixo, cinzas de carvão e curtumes e fertilizantes (Who, 2021).

4.3. Crômio em plantas

A absorção de crômio pelas plantas está associada às características da cultura e do meio onde a planta se desenvolve. Na forma hexavalente, o crômio apresenta-se como cromato, é solúvel, penetra facilmente através da membrana celular e apresenta uma ação tóxica aguda por ser um forte agente oxidante. O Cr (III), por sua vez, é solúvel somente a valores de pH menores que 5 ou quando complexado com moléculas orgânicas de baixo peso molecular e que têm pouca mobilidade através da membrana celular (Martines *et al.*, 2020).

O crômio pode ser absorvido pelas plantas tanto nas formas trivalente como hexavalente. Entretanto a toxicidade para as plantas é rara, devido a maior ocorrência natural do crômio na forma trivalente, caracterizada como de baixa mobilidade no solo e por restrito movimento

através da membrana celular. A reação do Cr (III) com proteínas e outros coloides forma compostos com alto peso molecular, que possuem baixa permeabilidade em membranas, razão pela qual mais de 85% do Cr (III) permanecem à distância de 1 mm da superfície da raiz (Quadro, 2019).

Na maioria das plantas, o crômio é absorvido e acumulado pelas raízes juntamente com o Fe (III), sendo pouco translocado para a parte aérea. A concentração de crômio na parte aérea das plantas é cem vezes menor que nas raízes, independentemente da espécie de crômio. Na raiz, preferencialmente, há a possibilidade de ocorrer a oxidação de Cr (III) para Cr (VI) (Martins, 2020).

O crômio parece ser mais tóxico para as raízes do que para a parte aérea, resultando em intensa redução do crescimento radicular. Os sintomas iniciais de toxidez são: murchamento severo e clorose nas folhas novas. O excesso de crômio nas plantas pode provocar inibição no crescimento da planta e da raiz, clorose nas folhas, desequilíbrio nutricional, indução de estresse oxidativo pela produção de espécies ativas de oxigênio, alterações na germinação das sementes, inibição enzimática e mutagênese, afetando seu crescimento e desenvolvimento, sendo esses processos essenciais à vida e à propagação da espécie (Shanker *et al.*, 2018).

4.4. Fatores que influenciam a captação de metais pesados em plantas

A toxicidade de um metal ou de seu composto num sistema biológico, depende de diferentes fatores: a dose de metal; toxicidade intrínseca; a capacidade vinculativa do metal; a especificidade do sistema biológico para o transporte do metal através de um órgão alvo; biotransformação de um metal em formas derivadas e por vezes mais tóxicos; e a capacidade do organismo vivo para sequestrar ou secretar o metal, etc. A solubilidade de certos metais ou dos seus compostos em água ou em meio lipídico pode influenciar a sua própria acumulação de um sistema biológico e conseqüentemente, o seu efeito tóxico (Zatta, *et al.*, 2021). Os metais pesados interferem nos processos fisiológicos, tais como troca gasosa, fixação de CO₂, respiração e absorção de nutrientes. Sua absorção não é linear em resposta às concentrações crescentes, muitos fatores a influenciam, como: temperatura, pH do solo, aeração do solo, fertilização, a concorrência entre as espécies de plantas, o tipo de planta, seu tamanho, o sistema radicular, a disponibilidade dos elementos nos depósitos de solo ou foliares, o tipo de folhas, umidade do solo e de fornecimento de energia da planta para as raízes e folhas (Kozłowski, 2018).

O estudo de organismos como monitores de poluentes, apresenta uma série de vantagens em relação as análises químicas de compartimentos abióticos, estes organismos somente acumulam formas biologicamente disponíveis, para os poluentes e que estão sempre presentes no ambiente, permitindo assim a monitorização em contínuo dos poluentes. Pois esses organismos integram flutuações da concentração de poluentes através do tempo e da ampliação proporcionada pela bioacumulação, podendo ser vantajoso, quanto à exatidão e detrimento da análise de poluentes vestigiais próximos aos limites da detecção analítica (Marcovecchio, 2023).

4.5. Risco a saúde humana e ambiente por crómio.

A toxicidade do crómio depende da forma como ele se apresenta, sendo a forma hexavalente mais tóxica do que a trivalente, para humanos. Mas ambas as formas de crómio podem ser potencialmente tóxicas em grandes concentrações (Jordão *et al.*, 2022). Sétóres industriais tais como produção de ligas resistentes à corrosão, mineração, cromagem eletrolítica, adição de crómio a tijolos refratários, produção de óleos lubrificantes, curtimento de couro, e produção de pigmentos de crómio, são algumas das fontes de exposição e contaminação. Entretanto, a contaminação por crómio não é um problema que se restringe apenas aos limites industriais ou aos que trabalham diretamente com os compostos, mas é também um problema ambiental, por ser acumulativo nos organismos vivos e em toda a cadeia alimentar (Ferreira, 2022).

A toxicidade pode ocorrer com apenas uma única dose ou exposição, seja após contato oral, nasal ou dermal. Praticamente todos os compostos de Cr (VI) apresentam grande poder mutagênico, ou seja, são capazes de causar mutação nas células, devido ao seu acesso direto e por ser um grande oxidante. Nesse caso, pode causar coceiras, espirros e úlceras. Vale destacar que, quando ingerido em grandes quantidades, o crómio pode provocar também danos aos rins, náuseas, irritações gastrointestinais, úlceras estomacais, convulsões e morte. Em contato com a pele, pode causar úlceras na região dérmica e reações alérgicas diversas, pois é um metal altamente alergênico (Pellerin *et al.*, 2018).

Existem diversas opiniões contrárias em relação aos efeitos do Cr (VI) para a saúde humana, uma vez que há várias rotas de exposição à forma hexavalente. Segundo a Agência Internacional para a Pesquisa do câncer, o Cr (VI), quando ingerido, é largamente convertido a Cr (III) no estômago. Estudos realizados por Flora (2014) apresentam estimativas da capacidade de vários órgãos humanos, populações de células e fluidos em reduzir o Cr (VI). Costa (2021) constatou que, em seres humanos, até 10% de Cr (VI) pode ser absorvido pela

exposição oral. Além disso, demonstrou que pessoas expostas ao Cr (VI) permaneceram com o elemento metálico no organismo, mesmo após cinco anos de exposição. Por possuir alta semelhança estrutural com o fosfato, o Cr é absorvido e transportado por todos os tipos de células do organismo humano. Uma vez na célula, o Cr (VI) é transformado quimicamente em Cr (III), uma forma considerada mais estável. Porém, não significa que a célula esteja completamente livre dos efeitos adversos desse metal.

Um dos principais argumentos para classificar o Cr (III) como sendo de baixa toxicidade baseia-se no fato de possuir uma baixa capacidade de penetrar na célula, diferentemente do Cr (VI). Porém, no interior da célula, o Cr (VI) pode provocar mutações no DNA, uma vez que pode substituir e mimetizar os fosfatos dessa macromolécula. Nesse caso, um indivíduo exposto ao Cr (VI), mesmo após sua absorção e redução a Cr (III) em nível celular, poderá desenvolver câncer, em virtude dessas mutações. Uma vez no corpo humano, o Cr pode ser encontrado na urina, no plasma e no sangue. A determinação da concentração de metais tóxicos é realizada comumente no sangue e urina (Pellerin *et al.*, 2018).

Atualmente, o Cr (III) é reconhecido como um elemento essencial ao metabolismo de carboidratos e de lipídeos em seres humanos. A sua atividade biológica está relacionada com a potencialização dos efeitos da insulina na conversão de glicose em CO₂ ou em lipídeos (Ferreira, 2019). A maioria dos efeitos tóxicos causados pelo Cr ocorre no trato respiratório. Os efeitos ocupacionais em indivíduos expostos a elevados níveis de Cr incluem ulceração e perfuração do septo nasal, irritações respiratórias, possíveis efeitos cardiovasculares, gastrointestinais, hepatológicos, entre outros (Silva, 2019). Os níveis máximos tolerados para o Cr no ambiente geral são, no ar urbano, 50 mg/m³ ; para água em rios, 10 mg/m³ ; água marinha, 5 mg/m³ ; solo, 125 mg kg⁻¹ , em média na alimentação, a ingestão diária não deve exceder 0,03 – 0,1 mg dia⁻¹ (Demi, 2020).

4.6. Contaminação do solo e recursos hídricos em Moçambique por Crómio

A contaminação do solo e águas por crómio tem ocorrido frequentemente em áreas industriais e em suas proximidades, muitas vezes devido a acidentes e, também, ao mal gerenciamento de seus resíduos.

Em Moçambique, onde a mineração é uma atividade significativa em várias regiões do país, a contaminação por crómio pode ser especialmente prevalente em áreas próximas a minas e instalações industriais. A contaminação do solo por crómio pode ocorrer devido ao depósito de resíduos de mineração ou descarte inadequado de produtos químicos contendo crómio.

Da mesma forma, os recursos hídricos podem ser contaminados pelo escoamento de águas pluviais que carregam o crômio do solo contaminado, bem como pelo descarte direto de resíduos líquidos industriais.

4.7. Impacto dos metais pesados na qualidade do solo

O solo é parte integrante do ecossistema (Nyikae *et al.*, 2020) e um dos recursos cruciais necessários para sustentar o ambiente, a vida e o bem-estar dos seres humanos e de outros organismos através da produção e fornecimento de alimentos (Miller *et al.*, 2020).

Os solos são altamente suscetíveis ao acúmulo de metais pesados (Nyikae *et al.* 2020) e são considerados o sumidouro definitivo para metais pesados que são descartados no meio ambiente através de aterros e outras atividades relacionadas (Nyikae *et al.*, 2020) avaliaram a contaminação por metais pesados no solo devido à migração de lixiviados de um lixão aberto de Ariyamangalam em Tiruchirappalli, Índia, e descobriram que as concentrações de vários metais pesados no solo excediam os limites padrão aceitáveis (Vandanae, 2020) também avaliou a contaminação por metais pesados (Ni, Cu, Zn, Pb, Cr e As) no solo, perto do local de eliminação de resíduos perigosos em Hyderabad, na Índia. Os resultados mostraram altas concentrações de todos os metais avaliados no solo e todos ultrapassaram os limites padrão (Vandanae *et al.*, 2020), sugerindo as probabilidades de migração de lixiviados ou escoamento contaminado do aterro para o solo. Geralmente, os solos são capazes de decompor naturalmente a maioria dos compostos orgânicos encontrados nos resíduos e convertê-los em substâncias inofensivas, no entanto, com os compostos inorgânicos e a sua incapacidade de se decompor, estes subsequentemente acumulam-se no solo ao longo do tempo (Liue *et al.*, 2023).

Os metais pesados podem estar naturalmente presentes nos solos, uma vez que alguns metais fazem parte do solo, mas a um nível ótimo; no entanto, as suas concentrações excessivas podem ser consideradas tóxicas e susceptíveis de representar uma ameaça significativa para o solo em particular (Osmanie *et al.*, 2023).

A contaminação do solo pode ser definida pela presença de concentrações químicas ou de quaisquer substâncias relacionadas no solo que estejam deslocadas em um nível superior à existência natural, com a perspectiva de exercer efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente (Rodríguez *et al.*, 2018). O solo é a via mais comum de contaminação por metais pesados para as plantas e, eventualmente, para os seres humanos através da cadeia alimentar (Rodríguez *et al.*, 2018).

5. Mecanismos de adaptação do milho a crómio

O milho pode reduzir a absorção de crómio pelas raízes através de alterações na permeabilidade da membrana celular. As raízes do milho exsudam compostos como ácidos orgânicos que formam complexos com o crómio no solo, diminuindo sua disponibilidade e, consequentemente, sua absorção pelas plantas (Shanker *et al.*, 2018).

As plantas de milho também desenvolvem tolerância fisiológica ao crómio. Isso inclui a ativação de sistemas antioxidantes que mitigam os danos oxidativos causados pelo estresse de crómio. Enzimas como superóxido dismutase, catalase e peroxidase desempenham papéis cruciais na desintoxicação de espécies reativas de oxigênio geradas pela presença de crómio (Shanker *et al.*, 2018).

5.1. Factores externos que afectam o crescimento do milho

5.1.1.Água

A água é factor imprescindível, pois é com a absorção de água por embebição que se inicia o processo da germinação para que isso aconteça, há necessidade de que a semente alcance um nível adequado de hidratação, a qual permita a reativação dos processos metabólicos. A humidade adequada é variável entre as espécies. A água influi na germinação, atuando no tegumento amolecendo-o favorecendo a penetração do oxigênio, e permitindo a transferência de nutrientes solúveis para as diversas partes da semente (Toledo & Marcos Filho, 2020). A absorção de água é maior em certas espécies, quando a temperatura é mais alta, podendo haver variações no tempo de embebição, de minutos a horas, ou até de vários dias (Ching, 2019).

5.1.2.Temperatura

A germinação é um resultado de uma série de reações bioquímicas, observa-se a existência de estreita dependência da temperatura. Como em qualquer reação química, existe uma temperatura ótima na qual o processo se realiza mais rápida e eficientemente, e as temperaturas máximas e mínimas, ultrapassadas as quais, a germinação é zero. Esta faixa de temperatura é variável entre as diferentes espécies. Acima e abaixo dos limites, máximo e mínimo, respectivamente, pode ocorrer a morte das sementes ou termo dormência. A faixa de 20 a 30°C mostra-se adequada para a germinação de grande número de espécies subtropicais e tropicais.

5.1.3. Luz

No tocante ao comportamento germinativo de espécies sensíveis à luz, encontram-se sementes que germinam após rápida exposição à luz, outras que necessitam de período relativamente longo de luz e outras em que a germinação é desencadeada somente no escuro (Vidaver., 1980). Além disso, existem as sementes que são indiferentes à luz, germinando em qualquer ambiente luminoso (Vazquezayanes *et al.*, 2023).

Na germinação de sementes sensíveis à luz, deve-se levar em conta, também que a sensibilidade das sementes ao regime luminoso pode ser alterada por vários factores como, temperatura, idade das sementes, condição de armazenamento, tratamento para superação de dormência e condição de cultivo da planta (Ferreira *et al.*, 2022).

5.1.4. Oxigênio

Existem sementes cujos tegumentos são tidos como impermeáveis ao oxigênio ou ao gás carbônico e, não havendo trocas gasosas, as sementes não conseguem germinar. O oxigênio é necessário para a promoção de reações metabólicas importantes na semente, especialmente a respiração.

6. Pigmentos fotossintéticos

Nos tecidos vegetais, as clorofilas são os pigmentos naturais mais abundantes e, juntamente com os carotenoides, exercem importante função no processo fotossintético (Taiz *et al.*, 2019).

De acordo com Félix (2020), os pigmentos fotossintéticos que se encontram nas plantas são as clorofilas *a* e *b*, respectivamente de cor verde intensa e verde- amarelada, e os carotenoides que incluem os carotenos e xantofilas, respectivamente de cor laranja e amarela. A clorofila *a* é de ocorrência generalizada em todas as células fotossintetizadoras, e desempenha um papel fundamental no processo de bioconversão de energia, enquanto que os outros pigmentos são chamados pigmentos acessórios. A concentração dos pigmentos cloroplastídicos em folhas auxilia no entendimento do processo de captação de energia pelas plantas. Dependendo de diversos fatores, como o estado de desenvolvimento da planta, luminosidade, cultura, condição nutricional da planta, os teores dos pigmentos fotossintéticos apresentam variações e a sua quantificação requer o uso de métodos que se baseiam em leituras de absorbância.

Há diferentes métodos que possibilitam o estudo de pigmentos fotossintéticos nas folhas, os quais podem ser não destrutivos, com o uso de clorofilômetro ou destrutivos, através de solventes, com destaque para a acetona, o álcool (Colombo *et al.*, 2018).

6.1. Clorofila e Carotenóides

O nome clorofila foi proposto por Pelletier e Caventou, em 1818, para designar a substância verde que se podia extrair das folhas com o auxílio do álcool. Atualmente os pigmentos clorofilianos são de grande importância comercial, podendo ser utilizados tanto como pigmentos quanto como antioxidantes.

As clorofilas são os pigmentos naturais mais abundantes presentes nas plantas, responsáveis pela captação de luz. Elas estão presentes nos cloroplastos das folhas e em outros tecidos vegetais fotossintéticos. Outros pigmentos como os carotenóides estão sempre juntos às clorofilas, também com a função de captar luz e proteger as clorofilas da fotoxidação (Von Elbe, 2020).

A clorofila *a* está presente em todos os organismos que realizam fotossíntese com liberação de oxigênio. É o pigmento utilizado para realizar o primeiro estágio da conversão de energia luminosa em energia química, enquanto que as clorofilas *b* e carotenóides auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação, sendo assim chamados de pigmentos acessórios (Taiz *et al.*, 2018).

6.2. Fotossíntese e metais

Muitos dos metais como por exemplo cromo são considerados essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, porém, concentrações inadequadas podem afetar o metabolismo da planta. Dessa forma, o estado nutricional da planta pode afetar a fotossíntese de diferentes maneiras, podendo ser de forma direta e indireta. Os efeitos diretos promovem a geração de estresse oxidativo, podendo promover a inibição de enzimas citoplasmáticas e danos às estruturas celulares, enquanto, que o efeito indireto é causado pela substituição de nutrientes essenciais nos locais de troca catiônica da planta. Ou seja, os metais na sua forma iônica são tóxicos (Arif *et al.*, 2016; Andresen *et al.*, 2018).

Os nutrientes essenciais metálicos (K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Mo e Zn), são requeridos para uma ampla variedade de processos fisiológicos, porém, podem ser considerados tóxicos em condições elevadas. De maneira geral, os metais em desequilíbrio podem provocar alteração dos processos fisiológicos, inativar enzimas, bloquear grupos funcionais, deslocar e substituir

elementos essenciais e interferir na integridade das membranas e, por consequente, promover o aparecimento de sintomas visuais de toxidez, como clorose, necrose, perda de turgor, danos no aparato fotossintético (Dalcorso *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2018).

6.3. Densidade Estomática

Os estômatos são aberturas na superfície foliar que possibilitam trocas gasosas e a transpiração, são constituídos por um par de células-guarda pelo poro estomático e pelas células subsidiárias, que auxiliam no controle do grau de abertura estomática (Zeiger *et al.*, 2018).

A resistência estomática, ou seja, o grau de fechamento dos estômatos é regulada pela planta de forma que a transpiração é proporcional ao balanço de energia, sem induzir aquecimento excessivo das folhas (Larcher, 2020). Acredita-se que o status hídrico das células da epiderme é responsável pela abertura estomática.

A densidade estomática presente em uma folha é inversamente proporcional à expansão das células da epiderme. Assim, quanto mais células da epiderme se expandir durante o crescimento da folha, menor será a densidade estomática. Ainda, a quantidade de estômatos de uma folha é definida no decorrer do processo de crescimento, e os fatores que afetam esta quantidade são as diferenças na intensidade luminosa e a disponibilidade hídrica (Kouwenberg *et al.*, 2019). Entre espécies há uma grande variação nas dimensões e frequência de estômatos, o que tem grande importância nas diferenças de regulações das trocas gasosas.

A regulação da abertura e fechamento estomático é um processo extremamente complexo, envolvendo fatores do ambiente e da própria planta. O rápido fechamento estomático é uma característica desejável e variável em genótipos de *zea mays*, sendo causado pela eficiente sinalização entre as raízes e as folhas (Machado, 2021). Genótipos mais tolerantes à seca apresentam fechamento estomático em valores de potencial da água maiores quando comparados aos genótipos sensíveis (Smith, 2020).

7. Estatística descritiva e testes de comparação múltipla (ANOVA e Kruskal-Wallis).

A sigla ANOVA se refere à análise de variância e é um procedimento estatístico usado para testar o grau em que dois ou mais grupos variam ou diferem em um experimento. A maioria das experiências, uma grande variação (ou diferença) geralmente indica que houve uma descoberta significativa da pesquisa.

8. Índice de Risco Ecológico

O Índice de Risco Ecológico (IRE, em inglês Environmental Risk Index - ERI), proposto por Mattson & Argermeier (2019), permite avaliar o estresse a que um determinado ecossistema apresenta. O fator de translocação representa a habilidade da planta em absorver e distribuir os metais pesados através de seu corpo, sendo um indicador crucial da capacidade de uma planta em acumular esses elementos. Este fator é fundamental para compreender como os metais pesados são transportados das raízes para outras partes da planta, como caule, folhas e frutos (Souza, 2022).

8.1. Factor de bioacumulação

O factor de bioacumulação é uma medida da relação entre a concentração de metal nos tecidos específicos da planta (raiz, caule, folha e fruto) e a concentração presente no ambiente circundante. Esse factor é essencial para avaliar o grau de contaminação de uma planta por metais pesados e seu potencial de transferência desses elementos para os níveis tróficos superiores da cadeia alimentar (Arumugam *et al.*, 2018).

8.2. Factor de Bioconcentração

O factor de bioconcentração (BCF) é a razão entre a concentração do metal na planta e a concentração no solo. Um BCF alto indica que a planta é eficiente em concentrar o metal a partir do solo (Arumugam *et al.*, 2018).

8.3. Factor de Translocação

O factor de translocação (FT) é uma medida da capacidade de uma planta de translocar metais pesados das raízes para a parte aérea. É calculado pela relação entre a concentração do metal na parte aérea e a concentração nas raízes (Arumugam *et al.*, 2018).

9. Objectivos

9.1. Geral

- Avaliar o efeito do crómio no crescimento de *Zea mays* e seu risco ecológico.

9.2. Específicos

- Determinar os parâmetros de crescimento da planta de *Zea mays* cultivadas em solos contaminados pelo crómio;
- Determinar a translocação e bioacumulação do crómio na planta do *Zea mays* em solos contaminados pelo crómio.
- Determinar o potencial risco ecológico do crómio no solo.

9.3. Hipóteses

O crómio pode permanecer no solo por longos períodos, durante esse tempo, ele pode ser absorvido pela vegetação, afetando a saúde dos ecossistemas terrestres e contaminando corpos de água superficiais e subterrâneos (Vardhan et al., 2019; Xu et al., 2023). Embora o crómio tenha algumas funções metabólicas em organismos animais, sua presença em excesso no ambiente representa uma ameaça à estabilidade e ao equilíbrio ecológico (Oruko et al., 2021; Zhu et al., 2018).

H0: A contaminação do solo por crómio não representa risco ecológico.

H1: A presença de crómio no solo em concentrações acima dos padrões de qualidade representa risco ecológico aos ecossistemas.

11. Área de estudo

A experiência foi realizada na Estufa e Laboratório de Bioquímica e Fisiologia Vegetal do Departamento de Ciências Biológicas (DCB), Faculdade de Ciências no Campus principal da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), o Campus principal da UEM localiza-se nas coordenadas geográficas 25° 56.946'Sul e 32° 35.973' Este, no distrito municipal de KaMaxaquene. Este, por sua vez, limita-se ao norte pelo distrito municipal de KaMavota, a este pelo Oceano Índico, a oeste pelo distrito municipal Nlhamankulu e a sul, com o distrito Municipal KaMpumo (Maloa e Júnior, 2019).

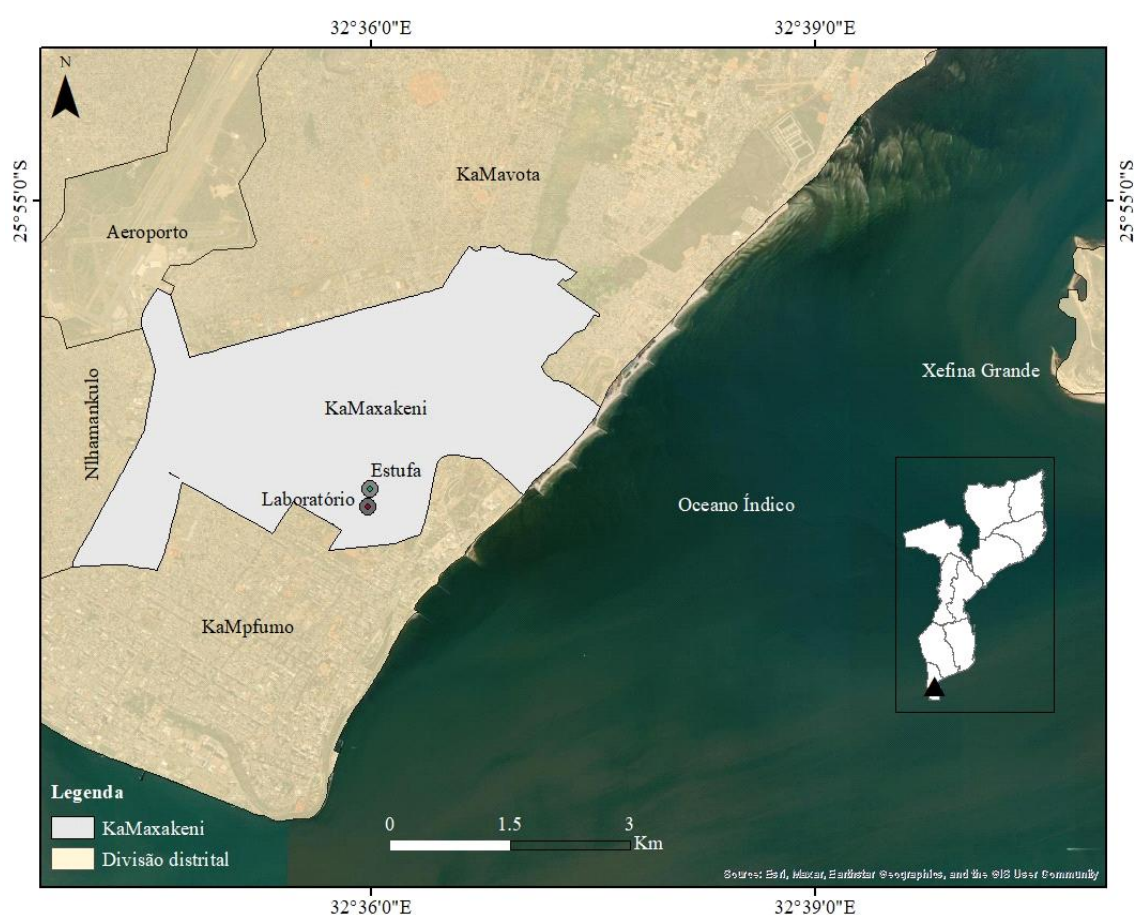


Figura 1. Localização geográfica do Campus principal da Universidade Eduardo Mondlane.

10. METODOLOGIA

10.1. Material e Equipamentos

Tabela 4: Material e equipamentos

Material		Equipamento	Amostras
Água destilada	Pinças;	Balança analítica	Sementes de milho
Etanol (99%)	Porta amostra	Balança portátil	Solo
Almofariz	Regador	Centrifugadora	Crômio
Balão volumétrico	Régua	Espectrofotômetro de fluorescência Raio X por Dispersão de Energia	-----
Balde;	Régua graduada	Espectrofotômetro;	-----
Bisturi;	Sacos plásticos	Estufa de secagem	-----
Conta-gotas;	Tesoura;	Frigorífico	-----
Copos de Becker;	Tubos de ensaio	-----	-----
Envelopes de papel;	Vasos plásticos de 1kg;	-----	
Fita métrica;	Frascos de polietileno	-----	-----
Luvas descartáveis;	Papel A4;	-----	-----
Marcador;	Papel-de-polietileno-transparente;	-----	-----
Máscaras-de-proteção individual;	Pipeta de 1ml e 5ml;	-----	-----
Moinhos de bolas	Provetas;	-----	-----
Pá	Secador	-----	-----
Papel absorvente;	Termômetro-de-mercúrio	-----	-----
Papel de alumínio;	-----	-----	-----
Papel milimétrico	-----	-----	-----

11. Colheita do solo

Quantidades suficientes de amostras de solo foram retiradas, com a ajuda de uma pá metálica, ao redor da Estufa do Departamento de Ciências Biológicas (DCB) da Universidade Eduardo Mondlane. Os solos foram colectados em pontos aleatórios, a uma profundidade média de 20 cm, e foram transportados em sacos plásticos para a estufa do departamento de ciências biológicas de seguida fez se a organização dos vasos.

11.1. Preparação dos materiais

Fez-se a diluição do metal crómio e as preparações permanentes; a sementeira fez-se após a contaminação dos solos com as concentrações de (0.0 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹).

11.2. Desenho Experimental

A experiência foi realizada na estufa do Departamento de Ciências Biológicas(DCB) da Universidade Eduardo Mondlane (UEM) , no período entre Outubro e Dezembro de 2023. Para a realização da experiência foram enchidos 56 vasos com solo dos arredores da Estufa do Departamento de Ciências Biológicas (DCB) que foram divididas em III tratamentos (0.0mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹) tabela 4.

Tabela 5. Desenho Experimental

Tratamento	Concentração (mg*L ¹ de Crómio)
T1(Controle)	0.0 mg*L ¹
T2	10 mg*L ¹
T3	30 mg*L ¹

As plântulas foram cultivadas e regadas com 100 ml de água da rede nacional FIPAG do tanque da estufa do DCB, em 3 dias úteis da semana (2^af , 4^a f e 6^a feiras), uma vez por dia, por um período de 60 dias.

11.3. Material vegetal

As sementes de *Zea mays* utilizadas para a experiência são de variedade comercial.

No laboratório foi realizada a pré-germinação em placas de petri, as sementes foram primeiro lavadas com hipoclorito de sódio a 3%, por cinco minutos, e de seguida, lavadas com água destilada.



Figura 2. Sementes de Milho (*Zea mays*).

De acordo com Cheng *et al.* (2021) e Ramos-Fuentes *et al.* (2023), as plantas de milho podem competir pela água e luz, afectando o seu desenvolvimento. Para garantir a uniformidade no volume de água durante a irrigação foi definido volume fixo de água por vaso, 100 ml de água, ao passo que o factor luz solar foi minimizado evitando a colocação dos vasos perto da área sombreada no interior da estufa. A análise do experimento foi centrada no material vegetal do milho (raiz, caule e folhas). Para analisar a capacidade de absorção de crómio pelos diferentes órgãos da planta ao longo do tempo, as amostras de plantas de milho foram colhidas intervalo de 60 dias após a sementeira.

Após a colheita o material vegetal foi analisado no laboratório. Para permitir a sanidade das amostras, sobretudo a retirada de possível excesso de metais que eventualmente poderiam ter sido transportados pelo ar, todo o material vegetal colectado foi lavado com água de torneira (Guirra *et al.*, 2019). Parte de folhas frescas foram usadas para determinar a densidade estomática e o teor de clorofila (*a*, *b* e Betacarotenóide), ao passo que parte do material vegetal (raiz, caule e folha) foi submetido a secagem a 80°C na estufa por 72 h e pesado em balança analítica para a obtenção de pesos da biomassa dos órgãos vegetais.

11.4. Determinação da Densidade estomática

Para a determinar a densidade estomática em folhas do milho foi utilizado o método não destrutivo. Pincelou-se com verniz (verniz incolor) a parte abaxial da folha de milho e deixou-se repousar por 5 minutos, após a secagem, com ajuda de uma pinça foi retirada a camada de verniz da folha; fez-se a montagem da película numa lâmina que contém uma gota de água destilada; colocou-se a lamela por cima, enxugou-se a água em excesso e fez-se a observação ao microscópio com a objectiva de 10X (Bacelar *et al.*, 2019).

As concentrações da densidade estomática foram determinadas pela equação segundo Bacelar *et al.* (2016). $X \text{ estomas} \times 10 \text{ mm} / 1.76$.

11.5. Determinação de Clorofila a, b e Carotenóides

Para determinar o teor de clorofila (*a*, *b* e Betacarotenóide) utilizou-se o método destrutivo das folhas sendo que, o uso de acetona a 80% em conjunto com o processo de manceração tem demonstrado ampla utilização na determinação de clorofilas e betacarotenóides (Peloso *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2020).

Colocou-se 100g de pedaços de folhas num almofariz com pequena quantidade de areia fina, como um agente físico e inerente, para facilitar a manceração, uma vez macerado, adicionou-se 10ml de etanol a 96%, o material foi filtrado em papel filtro qualitativo com auxílio de funil de vidro de 60 nm, em balão volumétrico de 25 ml, previamente envolvido com papel alumínio. Após a filtragem, foram realizadas as leituras de absorbância em espectrofotômetro nos seguintes comprimentos de onda: 663, 647 e 470 nm para a clorofila *a*, *b* e betacarotenóide.

Todo o processo de extração e análise foi realizado com o mínimo de luz possível para evitar a fotooxidação dos pigmentos (Lima *et al.*, 2020).

As concentrações das clorofilas e betacarotenóides foram determinadas pelas equações seguindo: Arumugam *et al.* (2018)

$$\text{Clorofila } a = [12.25 * \text{Clorofila } a(663 \text{ nm})] - [2.79 * \text{Clorofila } b(647 \text{ nm})]$$

$$\text{Clorofila } b = [21.5 * \text{Clorofila } b(647 \text{ nm})] - [25.1 * \text{Clorofila } a(663 \text{ nm})]$$

$$\text{Betacarotenóide} = [1000 * \text{Betacarotenóide}(470 \text{ nm})] - (2.05 * \text{Clorofila } a) - [(\text{Clorofila } a * \text{Clorofila } b) / 245]$$

11.6. Digestão e leitura dos metais pesados

Na digestão as amostras são sujeitas a elevadas temperaturas, sem aumento de pressão. A digestão ácida foi feita, com o intuito de se determinar o teor mineral presente em cada amostra e as leituras foram realizadas empregando o método Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES).

Foi pesado 0.1g de amostra já secas e moidas em um cadinho (limpo e seco). Para as amostras vegetais foi adicionado 15ml de HNO_3 (ácido nítrico) e 5ml HClO_4 (ácido perclórico) e para as amostras do solo foram adicionados 6ml de HCl (ácido clorídrico), 12ml de HNO_3 (ácido nítrico) e 18ml de HF (ácido fluorídrico) concentrado e cobertos com vidro de relógio e foram aquecidos à 180°C até que o volume baixasse para 0.5ml, e foram deixados arrefecer durante 10 minutos.

De seguida foi realizada a filtragem completando o volume para 50mL e se fez o restante do volume com água bidestilada, transferiu-se 15ml do volume dos balões volumétricos para os tubos de ensaio e foram organizados no Espectrofotómetro de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente onde foi feita a leitura dos metais (Costa *et al.*, 2021).

12. Caracterização físico-química do solo

Após o final da experiência, o solo foi colocado nos envelopes e deixado a secar na estufa à 65°C , de seguida foi crivado com o crivo de 2 mm e pesada na balança analítica.

As análises físico-químicas do solo foram feitas no laboratório de Pedologia do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM) usando os métodos: pH (H_2O e KCl) e CE – Método Potenciométrico na suspensão de solo/ H_2O ou KCl (1:2,5).

A Matéria Orgânica (%MO) e Carbono (%C) foram feitas pelo Método de WalkleyBlack, as Bases trocáveis a extração foi feita com acetato de amónio e a determinação do Ca^{2+} e Mg^{2+} por titulação com EDTA, e Na^+ e K^+ por espectrometria de chama. O fósforo (%P), pelo método de Olsen.

Para a análise de textura foi efetuada a análise mecânica do solo com o método de pipeta e a classificação da textura foi efetuada com base nos limites da escala de Atterberg (Al-Taani *et al.*, 2021).

12.1. Índice de poluição ecológica

Moçambique não possui legislação para os valores de referência de metais pesados presentes no solo, desse modo para que se tivesse uma base de comparação, foram adoptados os valores determinados pela legislação Sul Africana.

$$PI = \frac{C_{cr}}{V_{oRf}} \text{ (Nyika et al., 2019).}$$

Onde: PI: índice de poluição; Ccr: Valor do Cr no solo; VoRf: Valor padrão de qualidade do solo para o Cr(6.5mg). (Nyika et al., 2019). O PI pode ser definida de acordo com a tabela a baixo.

Tabela 6. Nível de contaminação por metais pesados (Soleimani et al., 2023).

Faixa CF	Categorias de contaminação
FC<1	baixa contaminação
1<FC<3	contaminação moderada
3 < CF < 6	contaminação considerável
FC>6	contaminação muito elevada

12.2. Factor de Translocação, Bioconcentração e Bioacumulação

Os factores de translocação (FT), Factores de Bioconcentração (BCF), assim como os factores de bioacumulação (FBA) foram calculados utilizando as equações de Arumugam *et al.*, (2018).

$$BCF = \frac{[Metal]_{parte\ aérea}}{[Metal]_{raízes}}$$

$$FT = \frac{[Metal]_{raízes}}{[Metal]_{Solo}}$$

$$FBA = \frac{[Metal]_{na\ planta\ (Folha+Raiz)}}{[Metal]_{Solo}}$$

12.3. Potencial risco ecológico

Foi adoptado o método de Soleimani para avaliar o potencial risco ecológico de contaminação do solo pelo crómio seguindo a equação:

$$E_i = \sum T_i \times \frac{C_i}{C_{oi}}$$

Onde:

E: potencial risco ecológico; RI: índice de risco ecológico potencial de todos os metais pesados do solo; Ti: Resposta toxica=2; Ci: concentração de metal no solo; Ci: concentração no fundo (6.5 mg).

Tabela 7. Nível de contaminação por metais pesados (Soleimani et al., 2023).

Critério de avaliação	níveis				
	Baixo	Moderado	Considerável	Alto	Muito alto
Ei	<40	40–80	80–160	160–320	>320
RI	<150	150–300	300–600	>600	–

13. Análise estatística

Todos os dados do solo e plantas foram organizados no programa Excel. De seguida os resultados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro a nível de significância estatística a 5%, após verificação da normalidade os dados foram analisados usando o pacote *software* STATISTIC versão 10. As distribuições das diferenças dos parâmetros de crescimento e bioquímicos nos diferentes tratamentos foram apresentados em forma de tabela e gráficos.

14. RESULTADOS

14.1. Características físico-químicas do solo

O solo de todos os tratamentos (00 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹) analisados apresentaram textura do tipo franco arenoso.

O pH do solo (tabela 7) foi classificado como neutro com valores entre 6,6 e 7,6. Para Kim e Kumar Kim *et al.*, (2019) sob essas condições de pH, há íons livres biodisponíveis de crômio, que podem ser translocadas por meio de forças eletrostáticas. Alderman *et al.* (2018) destacam que a disponibilidade de metais pesados para as plantas está fortemente associada à sua mobilidade no solo, a qual é influenciada diretamente pelo pH fator que também regula o transporte desses elementos até os tecidos vegetais. No entanto, Gabriel *et al.* (2019) ressaltam que, em geral, os micronutrientes são mais acessíveis às plantas cultivadas em solos com pH ácido, quando comparados a solos neutros ou alcalinos.

Tabela 8. Característica físico-químico do solo dos tratamentos controle e com adição de 10 e 30 mg/kg de crômio.

Característica	Controle 00 mg.kg ⁻¹	Tratamento 10 mg.kg ⁻¹	30 mg.kg ⁻¹	p-valor
pH	7.31a	6.65bc	6.87bc	0.0005
CTC	3.06a	2.85a	3.72a	0.848
CEmS/cm	0.11a	0.18a	0.23ab	0.01
Ca ²	1.98a	2.03a	1.87a	0.863
K ⁺	0.06a	0.14a	0.12a	0.27
Na ⁺	0.81a	1.18a	1.19a	0.562
Mg ²⁺	0.25a	0.25a	0.34a	0.502
P(%)	7 a	4.87a	6.13a	0.285
MO%	0.59a	0.79a	0.73a	0.832
Limo	2.48a	2.59a	2.76a	0.466
Argila	6.03a	8.65bc	8.33bc	0.008
Areia grossa	33.93 ^a	32.44a	32.98a	0.869
Areia fina	57.56a	56.33a	55.92a	0.838
Textura	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso	

Os valores representam a média de 9 plantas ± desvio padrão. Valores com letras diferentes ab/c horizontalmente demonstram diferenças significativas entre as médias.

Na nona semana, observou-se uma baixa capacidade de troca de cátions (Tabela 7) no solo onde se cultivou *Zea mays*, enquanto a condutividade elétrica foi considerada baixa segundo o modelo proposto por Varennes (2003). Nessas condições, segundo Adamczyk-Szabela e Wolf (2022), há um aumento na biodisponibilidade de elementos no solo, o que foi confirmado neste estudo.

O crômio foi translocado do solo para as raízes e, seguindo, das raízes para as folhas das plantas de *Zea mays*, em todos os tratamentos. De acordo com Shanker *et al.* (2005) e Singh *et al.* (2015), essa absorção ocorre por meio de transportadores que normalmente atuam na captação de nutrientes essenciais. Sharma *et al.* (2020) explica que a entrada do Cr(III) se dá por mecanismos passivos, enquanto o Cr(VI) utiliza processos ativos, através de transportadores de ânions como fosfato e sulfato. Isso pode justificar os baixos valores observados nas bases de troca de cátions, já que a competição do crômio pelos sítios ativos limita a absorção de nutrientes, resultando na formação de compostos insolúveis (Anitha *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2018).

o excesso de crômio interfere na absorção de minerais essenciais como Ca, Fe, Mg, e P, mascarando os sítios de absorção e formando complexos insolúveis, o que compromete também a absorção de micronutrientes (Mn, Zn) e macronutrientes (K, N, P) (Sharma *et al.*, 2020). Segundo o mesmo autor, as raízes de *Zea mays* podem liberar ácidos orgânicos como malato e citrato, que alteram a solubilidade dos metais no solo. Essa mesma dinâmica foi observada por Srivastava *et al.* (2021) em plantas de tomate, sugerindo que o aumento da concentração de crômio nos tecidos vegetais em *Zea mays* pode estar relacionado à presença desses ácidos, que convertem o crômio em formas mais facilmente absorvíveis.

Na nona semana a matéria orgânica do solo foi considerada baixa em todos os tratamentos, este fato pode estar associado à textura arenosa do solo, conforme descrito por Gajaje *et al.* (2024) e Ferreira *et al.* (2023). Segundo Li *et al.* (2015), a textura influencia diretamente a mineralização da matéria orgânica, além de afetar a umidade do solo. Solos com maior proporção de areia, como os deste estudo (com 32–38% de areia grossa e 50–57% de areia fina), tendem a reter menos água e nutrientes (Yost e Hartemink, 2019), o que pode favorecer a mobilidade de metais pesados como o crômio (Edogbo *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2018).

Na nona semana, observou-se uma redução de 33% na biomassa radicular no tratamento com 30 mg.kg⁻¹ de crômio. Na parte aérea, houve um aumento de 55% com 10 mg.kg⁻¹ de crômio e uma redução de 13% com 30 mg.kg⁻¹. Somente as folhas apresentaram diferenças

estatisticamente significativas entre os tratamentos. Esses dados estão em concordância com os estudos de Reis (2019) e Shanker *et al.* (2005), os quais relataram que altas concentrações de crômio prejudicam o metabolismo celular, a redução na biomassa de *Zea mays* está associada a danos no sistema radicular e à menor capacidade de absorção e translocação de água e nutrientes para a parte aérea da planta.

14.2. Efeito do crômio no peso fresco e biomassa do *Zea mays*.

Na nona semana, o peso fresco da parte aérea da planta do milho apresentou aumento de 7% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e redução de 22% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamento controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.91$ ($p > 0,05$) (figura 3).

Na nona semana, o peso fresco da raiz da planta do milho apresentou redução de 5.7% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e redução de 21% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamento controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.5$ ($p > 0,05$) (figura 3).

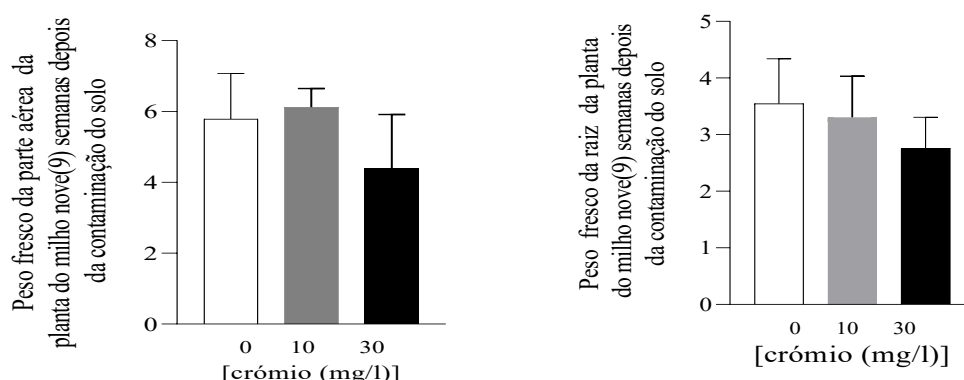


Figura 4. Efeito do crômio na concentração de (00 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹) no peso fresco da planta de milho nove (9) semanas após a experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.

Na nona semana a biomassa da parte aérea da planta do milho apresentou aumento de 40% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e redução de 33% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou diferenças

estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.0001$ ($p < 0,05$) (figura 4).

Na nona semana a biomassa da raiz da planta do milho apresentou aumento de 20% no tratamento de 10 mg.kg^{-1} de crómio e redução de 2.38% no tratamento de 30 mg.kg^{-1} em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.5$ ($p > 0,05$) (figura 4).

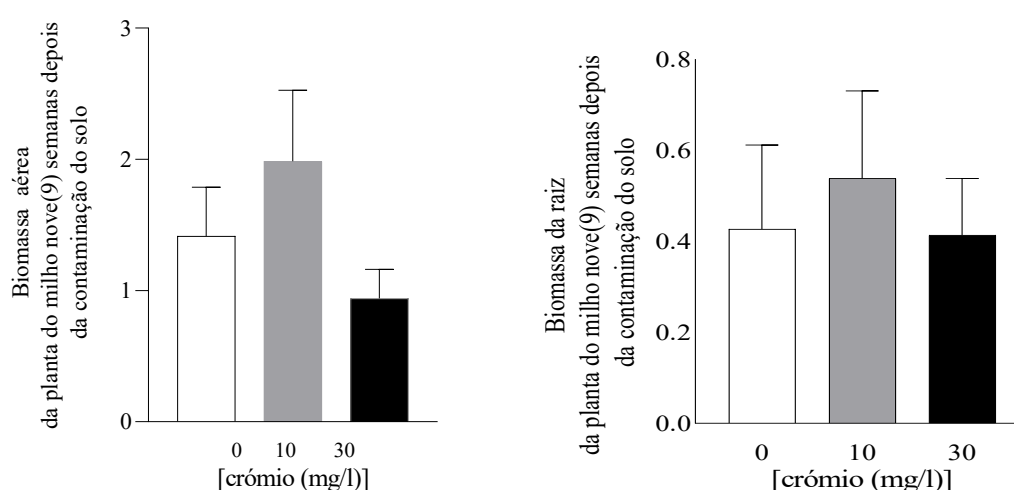


Figura 5. Efeito do crómio na concentração de (00 mg.kg^{-1} , 10 mg.kg^{-1} e 30 mg.kg^{-1}) na biomassa da planta de milho nove (9) semanas após a experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.

15. Densidade estomática

Na nona semana a densidade estomática das folhas do milho apresentou redução de 39% no tratamento de 10 mg.kg^{-1} de crómio e redução de 33% no tratamento de 30 mg.kg^{-1} em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.00002$ ($p < 0,05$) (figura 5).

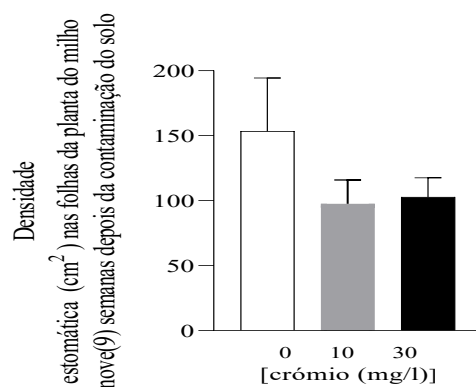


Figura 6. Densidade estomática das folhas do milho em solos contaminados por Crômio a 0.00, 10.00 e 30.00 mg ao longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 folhas $\pm$ desvio padrão.

15.1. Concentrações de Clorofilas *a*, *b* e betacarotenóides.

Na nona semana a concentração da clorofila *a* apresentou um aumento de 68% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e aumento de 94% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.000001$ ($p < 0,05$) (figura 6).

Na nona semana a concentração da clorofila *b* apresentou um aumento de 7% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e redução de 18% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.22$ ($p > 0,05$) (figura 6).

Na nona semana a concentração de betacarotenóides apresentou redução de 40% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e redução de 47% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.0001$ ($p < 0,05$) (figura 6).

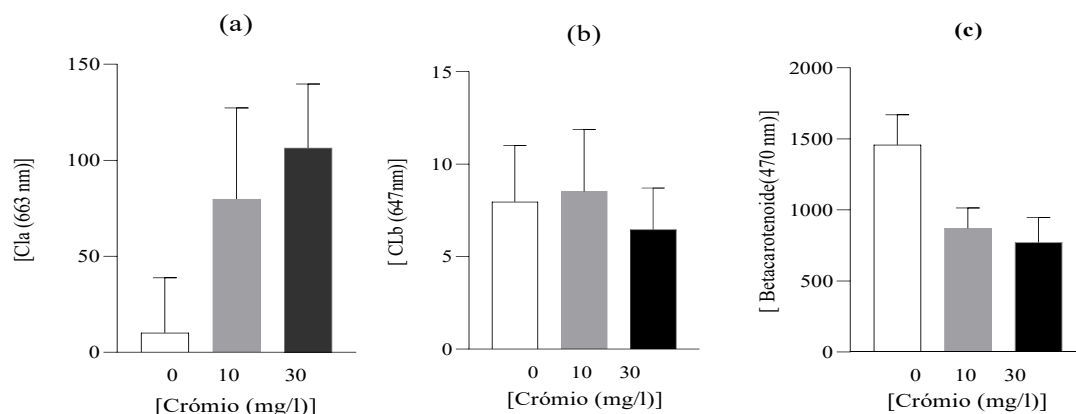


Figura 7. Concentrações de Clorofilas a, b e betacarotenoide nas folhas do milho em solos contaminados por Crômio a 00 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹ ao longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 folhas $\pm$ desvio padrão.

16. Análise da concentração de crômio na biomassa dos vegetais da planta do *Zea mays* e no solo por Espectrometria de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP).

16.1. Concentração do crômio na biomassa do *Zea mays*.

Na nona semana a concentração da biomassa da parte aérea da planta do milho apresentou aumento de 5% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e aumento de 39% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação com o tratamentos controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.91$ ($p > 0,05$) (figura 7).

Na nona semana a concentração da biomassa da raiz da planta de milho apresentou um aumento de 11% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crômio e aumento de 16% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação com o tratamento controle. O teste Anova *One Way*, revelou que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.5$ ($p > 0,05$) (figura 7).

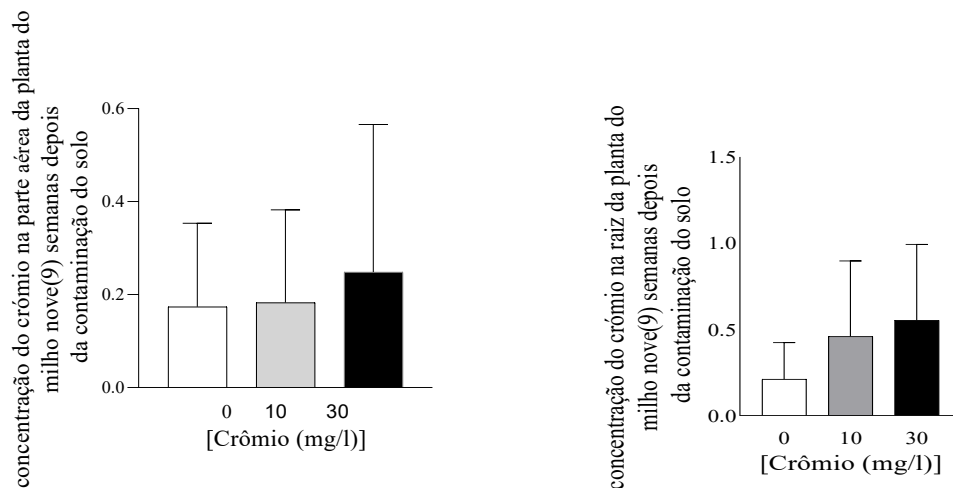


Figura 8. Concentração dos metais pesados nos tecidos da planta do *Zea mays* ao longo da experiência. Os dados referem-se à média de 9 plantas $\pm$ desvio padrão.

16.2. Concentração do cromo no solo.

O tratamento controle apresentou concentração de cromo indetectável, o tratamento de 10 mg.kg^{-1} apresentou um aumento de 73% e o tratamento de 30 mg.kg^{-1} uma redução de 27% quando comparadas entre elas. O teste Anova *One Way*, revelou diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em comparação com o tratamento controle $p = 0.000001$ ($p < 0,05$) (figura 8).

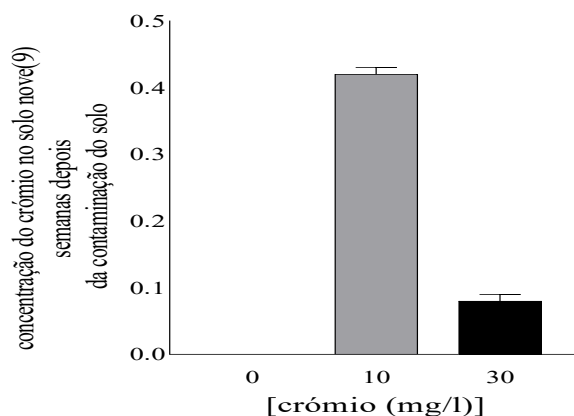


Figura 9. Concentração do cromo no solo dos tratamentos (00 mg.kg^{-1} , 10 mg.kg^{-1} e 30 mg.kg^{-1}) no final da experiência. Os dados referem-se à média de 3 réplicas $\pm$ desvio padrão.

17. Índice ecológico

17.1. Índice de poluição ecológica.

O índice de poluição ecológica de 0.08 reflecte uma baixa contaminação do solo por crómio. Isso é benéfico para o cultivo do milho, pois a baixa contaminação do solo significa que as plantas crescerão em condições mais seguras, com menos risco de absorver quantidades prejudiciais de crómio.

17.1.1. Potencial risco ecológico

O índice de risco ecológico de 0.02 indica um baixo risco ecológico associado à presença de crómio no solo. Isso sugere que o impacto ambiental do crómio presente no solo sobre as plantas de milho e o ecossistema em geral é baixo, promovendo a sustentabilidade agrícola e a saúde do ecossistema.

17.1.2. Factor de Translocação, Bioconcentração e Bioacumulação

O factor de translocação do crómio na planta do milho apresentou aumento de 10% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crómio e aumento de 15% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação ao tratamentos controle (tabela 8).

A bioconcentração do crómio na planta do milho apresentou aumento de 11% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crómio e aumento de 33% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação com o tratamento controle (tabela 8).

A bioacumulação do crómio na planta do milho apresentou aumento de 6% no tratamento de 10 mg.kg⁻¹ de crómio e aumento de 11% no tratamento de 30 mg.kg⁻¹ em comparação com o tratamento controle (tabela 8).

Tabela 9. Factor de translocação, Bioconcentração e Bioacumulação nas plantas de *Zea Mays* contaminadas por cromo.

Tratamento	Factor de Translocação- Zea mays
Crómio 00 mg.kg ⁻¹	0.11
Crómio 10 mg.kg ⁻¹	0.23
Crómio 30 mg.kg ⁻¹	0.28
Tratamento	Factor de Bioconcentração- Zea mays
Crómio 00 mg.kg ⁻¹	0.09
Crómio 10 mg.kg ⁻¹	0.10
Crómio 30 mg.kg ⁻¹	0.12
Tratamento	Factor de Bioacumulação- Zea mays
Crómio 00 mg.kg ⁻¹	0.19
Crómio 10 mg.kg ⁻¹	0.32
Crómio 30 mg.kg ⁻¹	0.40

18. DISCUSSÃO

Os valores de concentração do metal pesado crómio apresentaram-se abaixo limite de referência de acordo com a legislação sul africana. Pelo facto de Moçambique não possuir legislação para os valores de referência de metais pesados presentes no solo, foram adoptados valores determinados pela legislação Sul Africana para solos sob influência de residências, comércio (mercados) e indústrias, e os valores definidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para solos naturais.

Os resultados deste estudo indicam que a presença do metal pesado crómio no solo teve uma leve influencia no crescimento do milho. A análise foi feita em solos contaminados com diferentes concentrações de crómio (00 mg.kg^{-1} , 10 mg.kg^{-1} e 30 mg.kg^{-1}), tendo sido observado que o aumento da concentração de crómio no solo não teve um impacto negativo direto nas características fisiológicas e bioquímicas do *Zea mays*.

A raiz é a porta de entrada de nutrientes e da água na planta mas se houver contaminantes, é provável que sofra os danos dessa contaminação (Jezler *et al.*, 2020).

A exposição por poluentes, provocam alterações frequentes na distribuição de carbono contido nos órgãos da planta, sendo a produção de biomassa foliar favorecida prejudicando as raízes. (Klumpp *et al.*, 1996). O stress no sistema radicular pode provocar redução no crescimento da parte aérea, afectando a produção de biomassa (Taiz e Zeiger., 2019).

Houve uma tendência de redução do peso fresco e biomassa à medida que a concentração de crómio aumentava, sendo que o tratamento controle apresentou o maior valor de peso fresco e menor valor da biomassa da planta do milho. O tratamento 10 mg.kg^{-1} de crómio aumentou nos dois pesos (Biomassa e peso fresco) e reduziu com a adição da concentração de 30 mg.kg^{-1} comparativamente com o controle. Os pesos da planta aumentava à medida em que a concentração do crómio aumentava. O que quer dizer, quanto maior for a concentração de crómio no solo maior será a sua influencia no crescimento do milho (Sousa *et al.*, 2023).

Foi verificado que o crómio no tratamento de 30 mg.kg^{-1} causou aumento da concentração de clorofila *a*, redução na clorofila *b* e betacarotenóides. E no tratamento de 10 mg.kg^{-1} causou aumento da concentração da clorofila *a*, *b* e redução do betacarotenóide. Comportamento idêntico foi observado por Nhandale (2020), num estudo sobre o efeito do crómio no crescimento de *Lolium multiflorum* (*Poaceae*), em que o crómio nas clorofilas apresentou um aumento e betacarotenóides reduziu a concentração deste pigmento (Pires, 2022) observou

resultados similares num estudo de efeitos de crómio sobre a fotossíntese e estrutura foliar de *Eremanthus erythropapus*, onde a concentração de clorofila *a* em solos contaminados por crómio, observou um aumento de concentração a medida que a concentração de crómio aumentava.

Por outro lado, Figueiredo (2020) num estudo de gramíneas bioindicadoras de crómio, observou que o crómio inibiu o aumento da concentração de betacarotenóides de *Panicum maximum* cv.

A concentração de clorofila *b* e caratenóides são sensíveis a presença do crómio, este elemento inibe o processo metabólico da clorofila, impedido a incorporação do ácido aminolevulínico, essencial para síntese da clorofila (Fornasieiro, 2023). Esses resultados sugerem que o crómio interfere nos processos bioquímicos essenciais para a fotossíntese e a saúde geral das plantas.

A comparação entre as diferentes concentrações de crómio revelou que tanto os parâmetros de crescimento (biomassa) quanto os bioquímicos (clorofila *a*, *b* e beta-carotenóides) foram adversamente afetados pelo aumento das concentrações de crómio. As plantas expostas às concentrações mais altas apresentaram um menor desenvolvimento, indicando uma correlação direta entre a quantidade de crómio e os efeitos negativos no milho.

Dentre as estruturas que compõem a planta, a folha é considerada uma das mais plásticas, modificando-se em função das condições ambientais (Vichiato *et al.*, 2019). Nas folhas estão presentes os estômatos, estruturas fundamentais nos processos fotossintético, respiratório e transpiratório, uma vez que através da abertura estomática ocorrem as trocas gasosas (Salisbury *et al.*, 2018). Os padrões de distribuição e o número de estômatos podem justificar o potencial de aclimação dos vegetais à variáveis ambientais.

A concentração da densidade estomática registou uma diminuição significativa entre os tratamentos (10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹) com adição do crómio, sendo que o tratamento 30 mg.kg⁻¹ de crómio apresentou maior concentração da densidade estomática, o menor valor foi registado no tratamento 10 mg.kg⁻¹ e, comparando os dois tratamentos e o tratamento controle, a densidade estomática teve um aumento no tratamento controle devido a ausência do crómio no solo. E apresentou redução nos dois tratamentos pois, um longo período de exposição, causa danos mais intensos às células-guarda. Estudos anteriores, de Fornasieiro (2019), relataram que a presença de crómio interfere na morfologia e funcionamento dos estômatos. A densidade estomática reduzida é um indicador de estresse ambiental em plantas, conforme observado por

Oliva e Figueiredo (2020), que associaram níveis elevados de metais pesados à aumento da densidade estomática e eficiência fotossintética.

De acordo com Pearce *et al.* (2021), a diminuição da densidade estomática em plantas de milho em solos contaminados por crómio podem sofrer mudanças fisiológicas, incluindo menor capacidade de realizar trocas gasosas, maior vulnerabilidade ao estresse hídrico e redução na eficiência da fotossíntese. Estes efeitos combinados podem levar a uma diminuição significativa na biomassa e produtividade das plantas de milho.

O Índice de Poluição Ecológica foi calculado para avaliar o impacto ambiental dos metais pesados nas plantas (Coudhury *et al.*, 2018). E, usando esse índice ecológico, foi calculado e avaliado o impacto ambiental que o crómio causa as plantas de *Zea mays*.

Quanto maior a concentração de crómio, maior foi a bioacumulação detectada na biomassa das plantas de milho. Alguns estudos que avaliaram o desenvolvimento das plantas em solos mostraram que a produção de matéria seca é influenciada pela taxa de contaminação do solo por metais pesados (Sudha, 2020).

O *Zea mays* exibe um aumento tanto no factor de translocação quanto no factor de bioacumulação com o aumento da concentração de crómio no solo. A planta demonstra uma capacidade adaptativa ao translocar e acumular crómio, possivelmente como uma estratégia para mitigar os efeitos tóxicos nas raízes. Por outro lado, o factor de bioconcentração mostra um aumento moderado, sugerindo uma capacidade limitada de bioconcentração, o que pode ser benéfico para a planta de milho no desenvolvimento e crescimento.

As plantas cultivadas em solos contaminados respondem ao estresse de metais pesados. A capacidade de *Zea mays* de translocar e acumular crómio pode ter implicações significativas para a fitorremediação, uma técnica que utiliza plantas para remover ou estabilizar contaminantes no solo. No entanto, a bioacumulação elevada também levanta preocupações sobre a segurança alimentar e a saúde pública, destacando a necessidade de monitoramento e manejo adequado de solos contaminados (Coudhury *et al.*, 2019).

Todos os resultados obtidos vão de acordo com os estudos anteriores que mostram *Zea mays* tem potencial para acumular o crómio em seus tecidos.

19. CONCLUSÃO

O *Zea mays* mostrou ter potencial para crescer em solos contaminados com crómio até 30 mg.kg¹.

O aumento da concentração de crómio no solo causou uma leve redução no peso fresco, biomassa das folhas e raízes do *Zea mays*, a planta apresentou adaptações fisiológicas, como o aumento da clorofila *a* em relação às clorofilas *b* e betacarotenóides.

A densidade estomática apresentou maior número de estomas nas folhas controle devido a ausência do crómio.

A concentração de 30 mg.kg¹ de crómio não apresenta risco ecológico, mas o *Zea mays* mostrou ter potencial para acumular o crómio em seus tecidos.

O *Zea mays* pode ser cultivado em solos contaminados com até 30 mg.kg¹ de crómio sem comprometer a saúde humana.

20. LIMITAÇÕES

- Alto custo nas análises químicas em Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), tendo limitado o número de amostras.
- A falta de legislação moçambicana para a concentração de metais pesados encontrados no solo e nas plantas, tendo sido recorrido a utilização de legislações Sul África, que é o país mais próximo de Moçambique. Não tendo ajudado muito pois as características climático geográficas são diferentes.

21. RECOMENDAÇÕES

- Realizar-se estudos com maior número de amostras e em diferentes condições ambientais para validar os resultados encontrados e explorar possíveis métodos para solos contaminados;
- Implementar programas de monitoramento contínuo dos níveis de metais pesados nos solos agrícolas.

22. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancres (ano desconhecido). Desenvolvimento e crescimento. Pp. 20. Universidade Federal de Goiás, Goiás. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/99/o/ANCRESpdf.pdf>.
- Asadullah, A. Bano and H. Javed (2021). PGPR assisted bioremediation of heavy metals and nutrient accumulation in *Zea mays* under saline sodic soil. *Pakistan Journal of Botany*, 53(1):31-38.
- Bernard, A. (2020). Cadmium and its adverse effects on human health. *Indian Journal of Medicine Research*, 128:557-564.
- Bernardo, B., C. Candeias, F. Rocha (2022). Soil Risk Assessment in the Surrounding Area of Hulene-B waste dump, Maputo (Mozambique). *Geosciences*, 12:290.
- Biriarte, P. (2019). Influência da *Leucaena leucocephala* na composição química do solo: estudo de caso da Quinta de Canhandula e Quinta de Muzimbite — Município de Dondo. Pp. 53. Tese de licenciatura. Universidade Pedagógica, Beira.
- Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: time for change. *Food Energy Secur*, 6:61–77.
- Collin, M. S., S. K. Venkatraman, V. Kanimozhi, S. M. Arbaaz, G. S. Stacey, J. Anusha, R. Choudhary, V. Lvov, G. I. Tovar, F. Senatoy, S. Kopala and S. Swamiappan (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Elsevier*, 7:100094.
- Collin, M. S., S. K. Venkatraman, V. Kanimozhi, S. M. Arbaaz, G. S. Stacey, J. Anusha, R. Choudhary, V. Lvov, G. I. Tovar, F. Senatoy, S. Kopala and S. Swamiappan (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Elsevier*, 7:100094.
- Cortez, Nuno & Abreu, Maria Manuela (2008). Solo a pele da terra. Departamento de Ciências do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Costa, J. B. da 2021. Caracterização e constituição do solo (7ª. ed), Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Craine, J. M. and R. Dybzinski (2013). Mechanisms of plant competition: Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Functional Ecology*, 27: 833–840.

- Craine, J. M. and R. Dybzinski (2020). Mechanisms of plant competition: Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Functional Ecology*, 27: 833–840.
- Dhingra, O. D., J. J. Muchovej e J. Cruz-Filho (1980). Tratamento de sementes: Controle de patógenos. Pp. 121. Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Dhingra, O. D., J. J. Muchovej e J. Cruz-Filho (2018). Tratamento de sementes: Controle de patógenos. Pp. 121. Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Donald, A. N., P. B. Raphael, O. J. Olumide and O. F. Amarachukwu (2022). The synopsis of environmental heavy metal pollution. *American Journal of Environmental Sciences*, 125:134.
- Donald, A. N., P. B. Raphael, O. J. Olumide and O. F. Amarachukwu (2022). The synopsis of environmental heavy metal pollution. *American Journal of Environmental Sciences*, 125:134.
- Faquin, V. (2021). Diagnose do estado nutricional das plantas. Pp. 77. Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- García-Rosales, G. and A. Colín-Cruz (2018). Biosorption of lead by maize (*Zea mays*) stalk sponge. Elsevier, 91:2076-2086.
- Garoma, B., T. Chibsa T. Keno and Y. Denbi (2019). Effect of storage period on seed germination of different maize parental lines. *Journal of Natural Sciences Research*, 7(4):8-14.
- Genchi, G. M. S. Sinicropi, G. Lauria, A. Carocci and A. Catalano (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environment and Research in Public Health*, 17(11):3782.
- Guimarães, M. de A., T. A. de Santana, E. V. Silva, I. L. Zenzen e M. E. Loureiro (2020). Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, 3(1):58-68.
- Gutterer, W. M. R. Área Contaminada por Disposição Inadequada de Resíduos Industriais de Galvanoplastia. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2020. Rio de Janeiro – RJ.
- Gutterres, M. ; Silva, M. C. ; Dettemer, A. . Dossiê sobre Crômio. 2021.

- Hananingtyas, I., C. D. Nuryanty, L. Karlinasari, H. S. Alikodra, A. Jayanegara and A. Sumantri (2022). The effects of heavy metal exposure in agriculture soil on chlorophyll content of agriculture crops: A meta-analysis approach. *Earth and Environmental Science*, 951: 1-7.
- Haq, K., N. Ali, Danish, N. P. Gill, M. Dua and M. Shaikh (2018). Seed germination in maize (*Zea mays* L.) under the influence of different drinks flavors as a source of plant nutrients. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 12(3):334-342.
- Jaishankar M, et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol.*, v.7, n. 2, p. 60–72, Jun, 2014.
- Januário, A. M. (2020). Efeito alelopático da *Lantana camara* sobre a germinação das sementes da *Azadirachta indica*. Pp. 66. Tese de licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- Juarte, E. J. (2023). Susceptibilidade dos solos da província de Maputo à compactação. Pp 57. Tese de licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- Langa, J. S. (2022). Avaliação da qualidade da água para o consumo humano na região da Bacia do rio Infulene. Pp. 68. Tese de licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- Lozi, AA. Toxicidade comparada dos metais pesados, arsênio, cádmio, chumbo, cromo e níquel, sobre parâmetros reprodutivos de camundongos machos adultos após exposição aguda. 2019. 156 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Animal) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2019.
- Mabilana, H. A., D. C. Fontana e E. L. da Fonseca (2012). Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique. *Revista Ceres*, 59(3):337-349.
- Madeira, M. A. V. 2019. Apontamentos sobre a constituição e propriedades dos solos, Lisboa, Instituto Superior de Agronomia.
- MADER - Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural (2020). Inquérito integrado agrário 2020. Pp. 81. Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural, Maputo.

- Maloa J. M. e L. N. Júnior (2019). A dispersão urbana em moçambique: uma contribuição ao estudo da produção do espaço urbano em Maputo. *O Espaço Geográfico em Análise*,45(1):91-109.
- Marcelino, Ria. Estudo da Atividade Quimioprotetora in vitro e in vivo da Eugenia dysenterica após exposição ao crómio hexavalente. 2019. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- Mário Machunguene Jr., Sónia V. Guilundo, Rui S. Oliveira, Célia M. Martins & Orlando A. Quilambo (11 de maio de 2024): Avaliação de metais pesados e risco à saúde humana associados ao consumo de culturas cultivadas em áreas industriais de Maputo, Moçambique, *Journal of Environmental Science and Health, Parte A*, DOI: 10.1080/10934529.
- Marove, C. A., R. Sotozono, P. Tangviroon, c. b. Tabelin e T. Igarashi (2022). Assement of soil, sediment and water contaminations around open-pit coal mines in Moatize, Tete province, Mozambique. *Elsevier*: 8:100215.
- Muchimbane, A. B. D. A. (2019). Estudo dos indicadores de contaminação das águas subterrâneas por sistemas de saneamento "in situ" Distrito Urbano 4, Cidade de Maputo – Moçambique. Pp. 131. Tese de dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, SãoPaulo.
- Mudema, J. A., R. F. Sitole e G. Mlay (2021). Rentabilidade da cultura do milho na zona sul de Moçambique: Estudo de caso do distrito de Boane. Relatório Preliminar de Pesquisa nr. 3. Pp. 24. Instituto de Investigação Agrária de Moçambique,Maputo.
- Muhai, A. (2023). Avaliação da Qualidade da Água Fornecida Pelos Operadores Privados e FIPAG no Distrito de Boane no período das cheias (Janeiro – Fevereiro de 2023). Pp. 16. Moçambicana de Segurança Alimentar e Nutricional,Maputo.
- Mulenga, A. (2018). Introdução à estatística. Pp. 310. Imprensa universitária - Universidade Eduardo Mondlane,Maputo.
- Oliveira, W. F. de, B. A de, Miranda, F. V. Caetano, L. A. Machado e V. Ramalho (1999). Efeito de produtos fitossanitários no tratamento de sementes de milho (*Zea mays* L.), visando ao controle de *Fusarium moniliforme* (Sheld). *Pesquisa Agropecuária Tropical*: 29(1):65-69
- Piotto, F. A., M. E. A. Carvalho, L. A. Souza, F. H. S. Rabêlo, M. R. Franco, Katherine D. Batagin-Piottoand R. A. Azevedo (2018). Estimating tomato

tolerance to heavy metal toxicity: cadmium as study case. *Environmental Science and Pollution Research*, 25:27535–27544.

- Prado, R. M. (2008). Manual de nutrição de plantas forrageiras. Pp. 500. Undo Especial de Segurança Pública, Jaboticabal.
- Ramos, J. C. (2018). Bioacumulação de metais pesados em girinos de diferentes ecomorfotipos. Tese de Mestrado. Pp. 59. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.
- Ramos-Fuentes, A., Y. Elamri, B. Cheviron, C. Dejean, G. Belaud and D. Fumey (2023). Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems. *Elsevier*, 280:108187.
- Romero-Estévez, D., G. S. Yáñez-Jácome, K. Simbaña-Farinango, P. Y. Vélez-Terreros and H. Navarrete (2020). Determination of cadmium and lead in tomato (*Solanum lycopersicum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) consumed in Quito, Ecuador. *Elsevier*, 7: 893-899.
- Salazar, M. J., J. H. Rodriguez, G. L. Nieto and M. L. Pignata (2012). Effects of heavy metal concentrations (Cd, Zn and Pb) in agricultural soils near different emission sources on quality, accumulation and food safety in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Elsevier*, 244–253.
- Scarlett, M. and S. Bandeira (2014). Pollution in Maputo Bay. In: Bandeira, S. and Paula, J. (eds.), *The Maputo Bay Ecosystem*. WIOMSA, Zanzibar Town, pp. 187-206.
- Seregin, I. V., L. K. Shpigun and V. B. Ivanov (2020). Distribution and Toxic Effects of Cadmium and Lead on Maize Roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51(4):525–533.
- Sharma, P., & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 35-52.
- Silva, K. N. (2019). Efeito de tratamento químico na qualidade fisiológica e sanitária de sementes de milho durante armazenamento. Pp. 63. Dissertação de mestrado em Agronomia. Universidade de Brasília, Brasília.
- Sónia V. Guilundo., Marta A. Aduge, Edmilson M. Simango, Domingos M, Esnaider R. Suárez, Célia M & Orlando A. Quilambo (2001). *Uroclhoa mosambicensis*: Um potencial fitorremediador nativo para solos contaminados com arsênio. Vol. 15(12), pp. 560-568.

- Souza N. K. R., C. Y. Morassuti e W. B. Deus. (2018). Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. *Acta Biomédica Brasiliensia*, 9(3):95-106.
- Tchounwou, P. B., C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, and D. J. Sutton (2018). Heavy Metals Toxicity and the Environment. *EXS*, 101:133–164.
- Varennes, A. 2003. Produtividade dos solos e ambiente, Lisboa, Escolar Editora.
- Yuan, W., J. Xie, X. Wang, Q. Huang and K. Huang (2023). Mechanochemical remediation of soil contaminated with heavy metals and persistent organic pollutants by ball milling with nZVI-CaO-Ca₃(PO₄)₂ additives. *Elsevier*, 466:143109.

23. APÊNDICES 1

1. Análise de dados

			Concentração de Crômio		
			0.0 mg.kg ⁻¹	10 mg.kg ⁻¹	30 mg.kg ⁻¹
Peso fresco	aéreo	Média	5.786857	6.125833	4.394000
		Desvio padrão	1.286547	0.522557	1.519994
		p	0.036121		
	raiz	Média	3.548143	3.304875	2.759875
		Desvio padrão	0.790947	0.726247	0.548042
		p	0.099069		
	aéreo	Média	1.414375	1.985.125	0.940125
		Desvio padrão	0.372718	0.540534	0.221604
		p	0.000157		
Biomassa	raiz	Média	0.42733	0.53886	0.41400
		Desvio padrão	0.18477	0.19187	0.12445
		p	0.502203		

Tabela 10. Estatística de peso fresco e biomassa aérea e raiz da planta de milho em mg em solos contaminados por crômio 00 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹ de concentração.

		Concentração de Crômio		
		0.0 mg.kg ⁻¹	10 mg.kg ⁻¹	30 mg.kg ⁻¹
Área estomática	Média	153.4091	97.5379	102.7462
	Desvio padrão	40.9722	18.4245	14.8279
	p	0.00002		

Tabela 11. Área estomática da planta de milho em mg em solos contaminados por crômio 00 mg.kg⁻¹, 10 mg.kg⁻¹ e 30 mg.kg⁻¹.

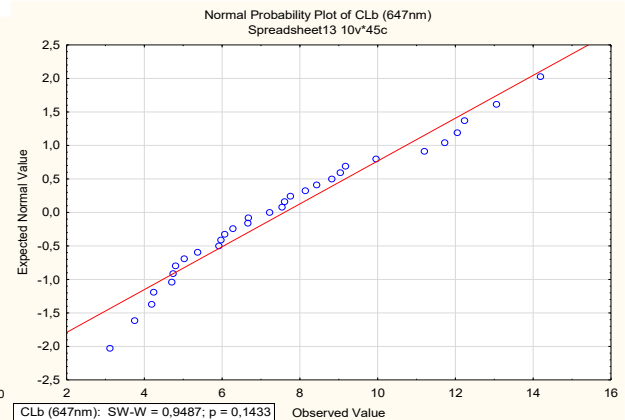
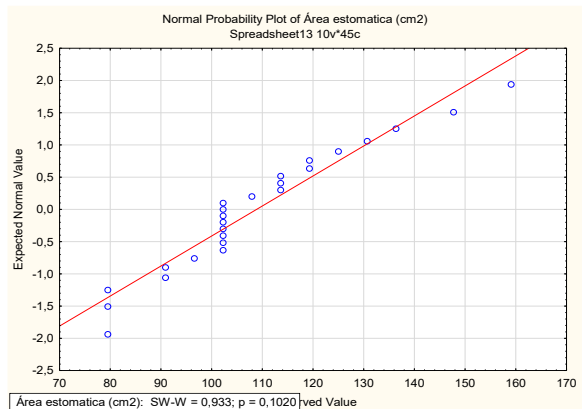
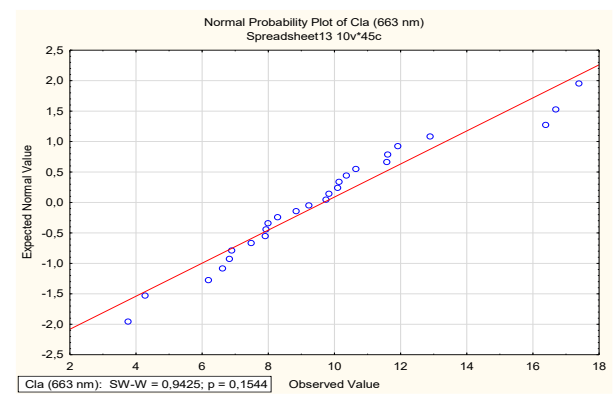
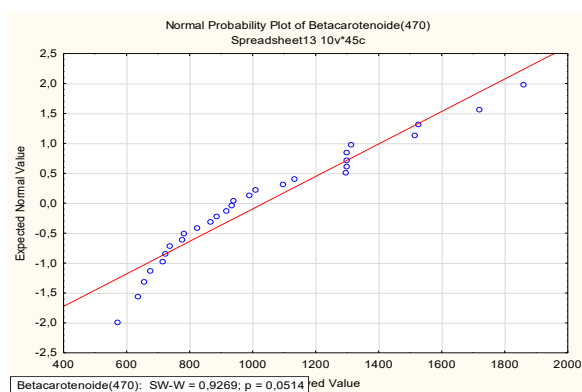
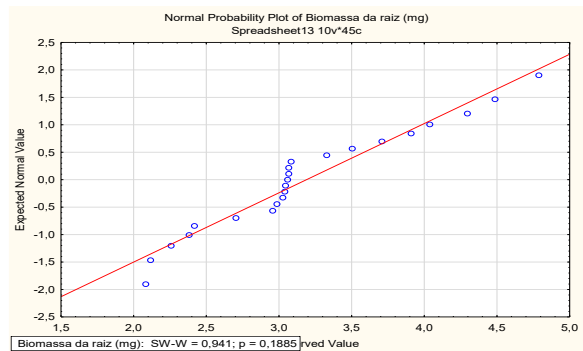
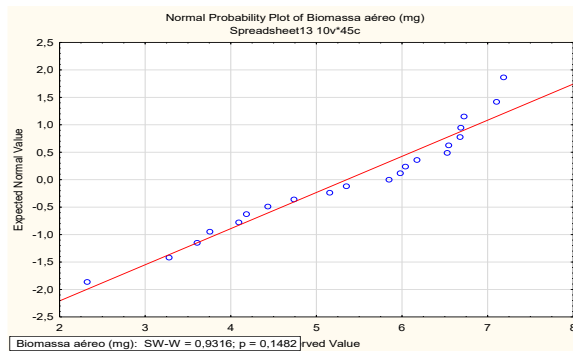
		Concentração de Crômio		
		0.0 mg.kg ⁻¹	10 mg.kg ⁻¹	30 mg.kg ⁻¹
Clorofila a	Média	10.15883	79.77467	106.42192
	Desvio padrão	28.61312	47.50088	33.32981
	p	0.000001		
Clorofila b	Média	7.966457	8.524725	6.464517
	Desvio padrão	3.037734	3.367436	2.247125
	p	0.222856		
Betacarotenóide	Média	1457.682	871.738	771.936
	Desvio padrão	212.1803	142.1506	176.3996
	p	<0.0001		

Tabela 12. Estatística de Clorofila a (663 nm), clorofila b (647 nm) e betacarotenóide (470 nm).

		Concentração de Crômio		
	Parâmetro	00 mg.kg ⁻¹	10 mg.kg ⁻¹	30 mg.kg ⁻¹
Peso aéreo	Média	0.173822222	0.18284444	0.24831111
	Desvio padrão	0.179641437	0.19951026	0.31745024
	p	0.918659798		
Peso da raiz	Média	0.211111111	0.45977778	0.55351111
	Desvio padrão	0.213071687	0.43774944	0.44097962
	p	0.553850232		
[Cr] no solo	Média	-	0.420667	0.007572
	Desvio padrão	-	0.084667	0.007671
	p	0.000001		

Tabela 13. Estatística de Análises do Plasma por Acoplamento Indutivo(ICP) .Biomassa aérea da raiz e concentração de crômio no solo.

2. Teste de normalidade (Shapiro – Wilk) a 95% de Intervalo de Confiança



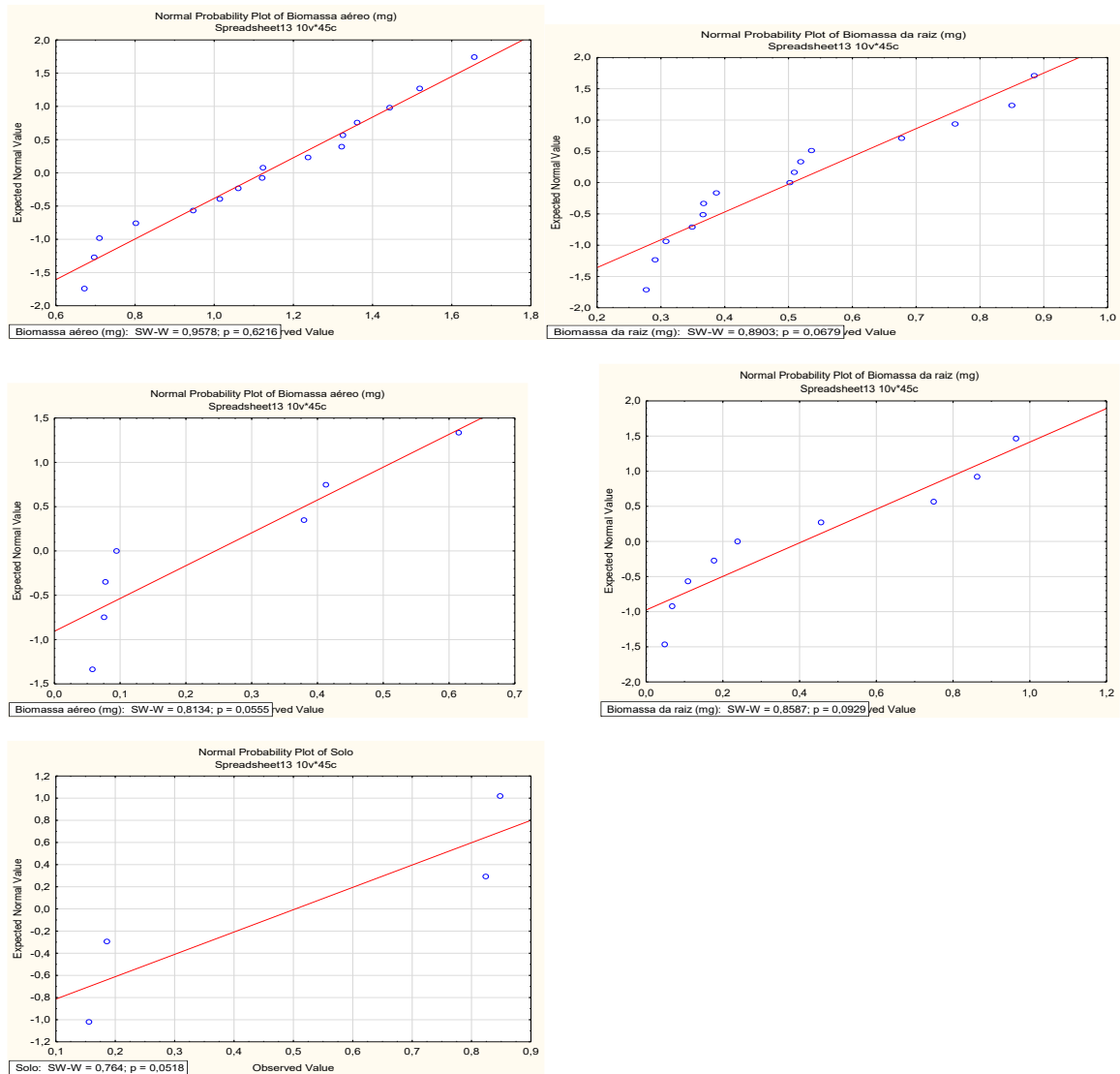
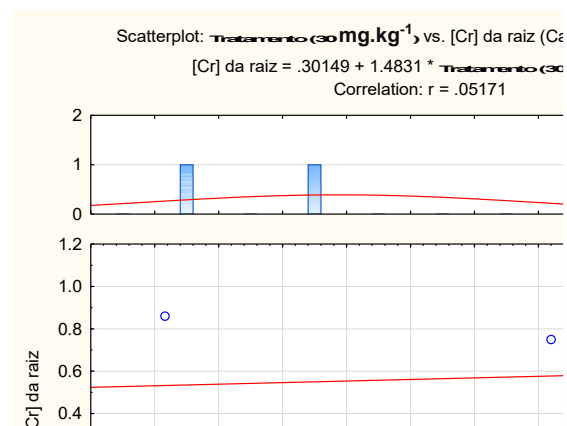
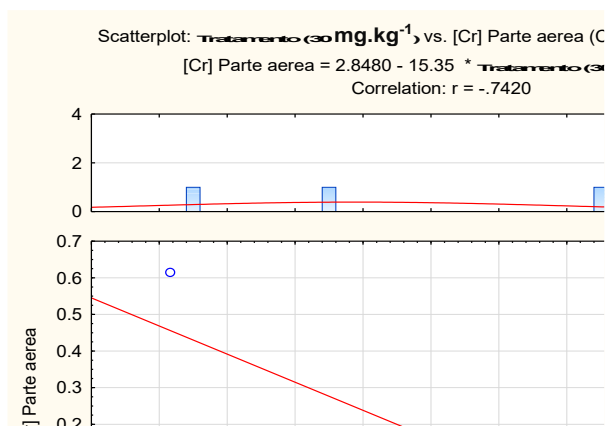
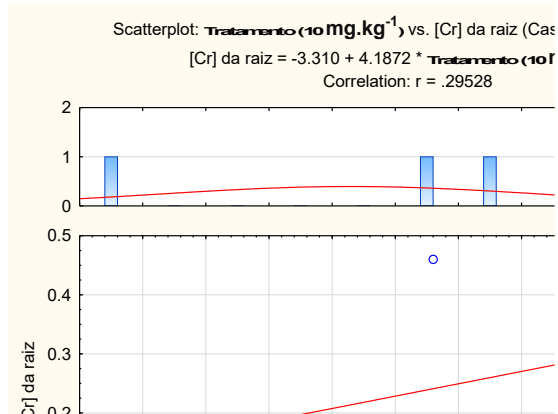
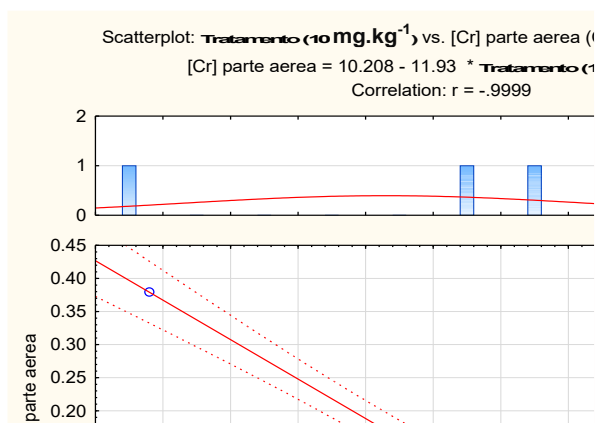


Tabela 14. De cima para baixo e da esquerda para direita temos: testes de normalidade para (a) peso fresco da parte aérea (1) e da raiz (2), (b) área estomática (3), (c) clorofilas a (4), clorofila b (5) e betacarotenóide (6), (d) peso fresco da parte aérea (7) e da raiz (8); (e) ICP para biomassa aérea (9), raiz (10) e solo (11).

3. Correlação de Pearson



24. APÊNDICES 2



Figura 10. De cima para baixo e da esquerda para direita temos : a) Planta de milho uma semana após a sementeira; b) planta do milho em crescimento (5 semanas); c) Planta do milho 3 meses após a sementeira; d) Raiz, Folhas e Caule da planta do milho; e) Preparação observação dos estômas das folhas de milho; f) Imagem da densidade estômatica, observados com a objectiva de 10X.

Fonte: De Oliveira 2023