

INSTITUTO FEDERAL DO PARANÁ

DOUGLAS MIGUEL LOPES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CALAGEM E SUBSOLAGEM NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO
DO SOLO E NO TEOR DE CLOROFILA DO CAFÉ ARÁBICA**

IVAIPORÃ

2024

Douglas Miguel Lopes dos Santos

INFLUÊNCIA DA CALAGEM E SUBSOLAGEM NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO E NO TEOR DE CLOROFILA DO CAFÉ ARÁBICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Agrônômica do Instituto Federal do Paraná, como parte dos requisitos mínimos necessários à obtenção do grau em bacharelado em engenharia agrônômica

Orientador: Prof. Dr. Denis Santiago da Costa

IVAIPORÃ

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

Douglas Miguel Lopes dos Santos

INFLUÊNCIA DA CALAGEM E SUBSOLAGEM NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO E NO TEOR DE CLOROFILA DO CAFÉ ARÁBICA

O presente trabalho em graduação foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Documento assinado digitalmente

SUELEN CRISTINA UBER

Data: 08/09/2024 17:05:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Suelen Cristina Uber
Instituto Federal do Paraná – Campus Ivaiporã



Documento assinado digitalmente

ELTON PAULO DOBROVOLISKI

Data: 09/09/2024 17:14:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Elton Paulo Dobrovolski
Instituto Federal do Paraná – Campus Ivaiporã

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica pelo Instituto Federal do Paraná, Campus Ivaiporã.



Documento assinado digitalmente

DENIS SANTIAGO DA COSTA

Data: 09/09/2024 19:51:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenação do Curso Engenharia Agrônômica
Prof. Dr. Denis Santiago da Costa
Siape: 1400880



Documento assinado digitalmente

DENIS SANTIAGO DA COSTA

Data: 08/09/2024 17:00:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Denis Santiago da Costa (Orientador)
Siape: 1400880

Ivaiporã, 22 de agosto de 2024.

Este trabalho é dedicado a você, familiar ou amigo que contribuiu muito na minha caminhada. Sem vocês eu nada seria.

AGRADECIMENTOS

Se hoje escrevo esses agradecimentos, é porque venci todos os obstáculos encontrados durante o percurso para chegar até aqui. Inicio agradecendo a Deus, que por sua infinita misericórdia esteve olhando por mim todos esses anos, me nutrindo de sabedoria e entendimento no percorrer deste caminho. Sou grato ao meu pai, mãe e avô paterno – Valdir Almeida dos Santos, Maria Aparecida Lopes dos Santos e Vivalde dos Santos - por todo subsídio material e emocional que me deram, hoje a vida me faz enxergar, que sem esse apoio, eu não seria nem a metade de quem estou me tornando.

Na oportunidade, não poderia deixar de expressar minha gratidão aos meus irmãos biológicos e também aos irmãos decoração; ter para onde voltar, ter a quem recorrer no momento de angústia e dificuldade, acalenta a alma e deixa tranquilo o coração. E também às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, meus colegas de turma, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Agradeço ao professor - coordenador do curso e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso - Dr. Denis Santiago da Costa, pela confiança depositada no meu projeto, onde o mesmo enxergou em mim um potencial que eu mesmo não percebia – gostaria de ter-lhe honrado, mas sei que deixei a desejar, no entanto, asseguro-lhe, que dei o melhor de mim dentro das condições que possuía - obrigado pela motivação durante todo o processo.

Por último, não menos importante, quero agradecer ao Instituto Federal do Paraná Campus Ivaiporã e todo o seu corpo docente, que diante de tantas adversidades encontradas ao longo de todo período acadêmico, não mediram esforços para propiciar-nos uma formação integral, demonstrando comprometimento com a qualidade e excelência do ensino.

Sem mais, sigo escrevendo o próximo capítulo dessa história, e espero que não seja da forma como sonho, mas sim, da forma como o Pai Celestial tem preparado para mim. Paz e bem.

“Você não pode impor a produtividade, você deve fornecer condições e ferramentas necessárias, para permitir que o cultivo seja de excelência.”

RESUMO

O cultivo de café desempenha um papel significativo na economia global e nas comunidades agrícolas em diversas partes do mundo. Originário das regiões tropicais da África, o café é atualmente uma das bebidas mais consumidas globalmente, tornando-se uma commodity essencial que influencia muitos aspectos da vida econômica e social. busca-se através deste, à análise e desenvolvimento do efeito subsolagem para descompactação do solo, sob aplicação de calcário no cafeeiro. O experimento foi realizado em delineamento experimental de blocos ao acaso com 5 repetições, onde foram aplicados 4 tratamentos, totalizando 20 parcelas. A área total do ensaio foi de 540 m², sendo 108 metros lineares e cada parcela possuía o tamanho de 27 m². Os tratamentos propostos para esse ensaio são: Testemunha (T1); Calagem (T2); Subsolagem (T3) e Calagem + Subsolagem (T4). Para a subsolagem foi utilizado um subsolador convencional com algumas adaptações: o alongamento da estrutura em 50 centímetros para uma das extremidades do subsolador, para que uma das hastes consiga alcançar o máximo do interior do barrado do cafeeiro; e a utilização 02 hastes de aproximadamente 60 centímetros de comprimento, com 40 centímetros de espaçamento entre si, para que uma delas fosse conduzida próxima à projeção das raízes, enquanto a outra próximo ao rodado do trator. As condições do experimento, nem a subsolagem nem a calagem, isoladamente ou em combinação, tiveram um efeito significativo sobre o índice de clorofila das plantas nas três datas de avaliação. Entretanto, com as avaliações realizadas analisando os dados obtidos, pode-se constatar que o efeito da subsolagem na saia do cafeeiro influencia diretamente na reestruturação do solo, aumentando a sua porosidade. Conclui-se a partir do presente no trabalho que são imprescindíveis os efeitos da subsolagem na projeção da saia do cafeeiro, obtendo resultados significativos para o desenvolvimento radicular da planta.

Palavras-chave: Subsolagem; Descompactação do Solo; Teor de Clorofila; Calagem; Cafeeiro.

ABSTRACT

Coffee cultivation plays a significant role in the global economy and in agricultural communities in various parts of the world. Originating in the tropical regions of Africa, coffee is currently one of the most consumed beverages globally, becoming an essential commodity that influences many aspects of economic and social life. This study aims to analyze and develop the subsoiling effect for soil decompaction, under the application of limestone in coffee plants. The experiment was carried out in a randomized block experimental design with 5 replications, where 4 treatments were applied, totaling 20 plots. The total area of the trial was 540 m², being 108 linear meters and each plot had the size of 27 m². The treatments proposed for this trial are: Control (T1); Liming (T2); Subsoiling (T3) and Liming + Subsoiling (T4). For subsoiling, a conventional subsoiler was used with some adaptations: the structure was extended by 50 centimeters to one end of the subsoiler, so that one of the rods could reach the maximum depth of the coffee tree's border; and two rods of approximately 60 centimeters in length were used, spaced 40 centimeters apart, so that one of them was driven close to the projection of the roots, while the other was close to the tractor's wheel. Under the experimental conditions, neither subsoiling nor liming, alone or in combination, had a significant effect on the chlorophyll index of the plants on the three evaluation dates. However, with the evaluations performed by analyzing the data obtained, it was possible to confirm that the effect of subsoiling on the coffee tree's skirt directly influences the restructuring of the soil, increasing its porosity. It can be concluded from the present work that the effects of subsoiling on the projection of the coffee tree's skirt are essential, obtaining significant results for the root development of the plant.

Keywords: Subsoiling; Soil decompaction; Chlorophyll content; Liming; Coffee tree.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 PROBLEMA..... | 11 |
| 1.2. HIPÓTESE..... | 11 |
| 1.2.1. Hipótese Nula..... | 11 |
| 1.2.2. Hipótese Alternativa..... | 12 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.3.1. Objetivos Gerais..... | 12 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos..... | 12 |
| 2. DESENVOLVIMENTO..... | 13 |
| 2.1 REVISÃO DE LITERATURA..... | 13 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 15 |
| 3.1 Caracterização da área experimental..... | 15 |
| 3.2 Delineamento experimental e tratamentos..... | 16 |
| 3.3 Parâmetros avaliados..... | 18 |
| 4. Resultados e Discussão..... | 19 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 23 |
| 6. Referências Bibliográficas..... | 24 |

1. INTRODUÇÃO

O café tem suas origens na Etiópia, acredita-se que foi descoberto pelos habitantes locais no século IX. A planta foi cultivada na Península Arábica, especialmente no Iêmen, durante o século XV, e de lá se dispersou para outras partes do mundo, incluindo a Europa e as Américas (PENDERGRAST, 2019). O café destaca-se entre as principais exportações de diversos países em desenvolvimento, desempenhando um papel crucial nas economias desses locais. A indústria do café é responsável por criar milhões de postos de trabalho, tanto diretamente, nas atividades de cultivo e colheita, quanto indiretamente, nas etapas de torrefação e comercialização. Em países como Brasil, Vietnã, Colômbia e Etiópia, o cultivo do café representa uma fonte essencial de renda para muitos agricultores e trabalhadores rurais. A produção de café não só impulsiona o crescimento econômico e a estabilidade das regiões produtoras, mas também afeta as cadeias de suprimento e os mercados internacionais.

O cultivo e o consumo de café se expandiram para a Península Arábica no século XV, e a partir daí, a planta se espalhou para outras partes do mundo através do comércio (PENDERGRAST, 2019). Sendo atualmente o Brasil, o principal produtor, respondendo por mais de um terço da produção mundial do grão, (FAOSTAT, 2021). O café é uma importante fonte de receita para muitos municípios, possuindo um grande campo de trabalho na agropecuária nacional. A produção tornou-se um dos principais contribuintes para o crescimento econômico. A produção nacional do país é de cerca de 47,7 milhões de sacas, produzidos em 2,2 milhões de hectares, sendo 66% da produção da espécie café arábica (*Coffea arabica* L.) (CONAB, 2021). A postura brasileira na produção de café é resultado principalmente da modernização da agricultura, incluindo a adoção de novas tecnologias como a mecanização e melhorias na produção.

Sobre sua Classificação Botânica, temos que o café é pertencente à divisão das Fanerógamas, classe Angiosperma, subclasse Eudicotiledônea, ordem Rubiales, família das Rubiaceae, tribo Coffeae, subtribo Coffeina e, gênero Coffea. Este sistema de classificação reflete a posição taxonômica das plantas de café dentro do reino vegetal e destaca sua relação com outras espécies dentro da mesma ordem e subclasse (SMITH et al., 2022). Sendo ainda, de natureza arbustiva e de ciclo perene e raiz pivotante, a planta pode atingir de 3 a 4 metros com um formato cilíndrico.

Entre os principais fatores que interferem na produção, estão: práticas de adubação, aplicação de pesticidas no solo, recomendações de densidade de planta,

irrigação, culturas intercalares e fertilidade do solo em geral. A fertilidade do solo é crucial para o cultivo bem-sucedido do cafeeiro, pois influencia diretamente o crescimento das plantas e a qualidade dos grãos. Solos ricos em matéria orgânica e com pH adequado são essenciais para otimizar a produção de café, pois afetam a disponibilidade de nutrientes essenciais para a planta (STEWART et al., 2021). A adoção da prática da correção do solo traz inúmeros benefícios, acarretando na maior produtividade da cultura. A aplicação de calcário não só corrige a acidez do solo, mas também melhora a disponibilidade de nutrientes e a estrutura do solo, promovendo um crescimento mais robusto e produtivo das plantas de café (RAIJ et al., 1997). Enfatizando a importância de cuidados com a administração das doses, pois sua falta e/ou excesso podem alterar a dinâmica adequada dos nutrientes, acarretando quedas de até 50% na produção.

A compactação do solo na agricultura, ocorre pelo tráfego intenso de implementos agrícolas, que apresenta uma promitente intensificação a cada período. Segundo DIAS JÚNIOR (2008), a compactação causada pelo tráfego de máquinas pode alterar a distribuição de poros por tamanho e, por conseguinte, alterar a retenção e a distribuição de água no solo. No cafeeiro, as pequenas faixas próximas à saia, contêm a maioria das raízes ativas. O uso intensivo da mecanização altera a estrutura do solo, prejudicando o crescimento radicular, a longevidade da planta e a retenção de água do solo. Segundo GONTIJO et al., (2008), a compactação, pode provocar danos à estrutura do solo, limitando a produção em lavouras cafeeiras. Acarretando assim em diversos problemas, entre eles, a redução dos macroporos do solo, ocasionada pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas, também propicia aumento na resistência mecânica do solo à penetração vertical e redução na condutividade hidráulica do solo, (MINATEL et al., 2006).

A subsolagem é uma técnica recomendada para a descompactação do solo, pois o revolvimento das camadas mais densas, com o intuito de desenvolver as raízes do cafeeiro e normalizar oxigenação solo e a penetração da água, aumentando a absorção de nutrientes para a planta. A subsolagem com aração e gradagem aumenta a porosidade da camada superficial do solo, (CORSINI et al., 1999).

O intuito do experimento é empregar o uso da subsolagem sob a aplicação de calcário. O experimento foi desenvolvido através de 04 tratamentos, posicionados em 05 blocos, onde cada bloco corresponde uma linha do cafeeiro e cada tratamento foi feito em parcelas de três pés de café consecutivos. Sendo que: Tratamento 1 - Testemunha;

Tratamento 2 - Calagem; Tratamento 3 - Subsolagem; Tratamento 4 - Calagem + Subsolagem; conduzidos aleatoriamente dentro de cada bloco.

1.1 PROBLEMÁTICA

Em áreas de café antigas com mais de 40 anos de produção, que o produtor deseja restaurar, a qualidade do solo frequentemente apresenta desafios significativos para uma produção eficaz e sustentável. Sendo a compactação do solo, um problema comum nesses cafezais, exacerbada pelo intenso trânsito de máquinas agrícolas durante a época das chuvas, o que compromete a estrutura do solo, e dificulta o desenvolvimento das raízes. Além disso, a baixa fertilidade do solo, frequentemente associada a altos níveis de acidez, limita a capacidade das lavouras de café de atingir níveis esperados de produtividade. A partir do mencionado acima, surgem as seguintes problemáticas: como a compactação do solo afeta a produtividade das lavouras de café e quais são as melhores práticas para reverter esse problema em áreas com histórico de cultivo intenso? Quais são os métodos mais eficazes para melhorar a fertilidade do solo e reduzir a acidez em cafezais antigos? Partindo deste pressuposto, busca-se as respostas no decorrer deste trabalho.

1.2. HIPÓTESE

1.2.1. Hipótese nula

Chegou-se a hipótese que a subsolagem, combinada com a calagem, não influencia no aumento do teor de clorofila do café arábica em áreas de produção antiga, com compactação do solo e acidez pronunciada.

1.2.2. Hipótese alternativa

Chegou-se a hipótese que a subsolagem, combinada com a calagem, aumenta o teor de clorofila do café arábica em áreas de produção antiga, com descompactação do solo e acidez pronunciada.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos gerais

Realizar a Subsolagem, com o intuito de romper camadas compactadas no solo, visando desagregar a camada adensada. Analisar o desenvolvimento do efeito da subsolagem para descompactação do solo, sob aplicação de calcário no cafeeiro, analisar o nível de penetração do solo, avaliar o teor de clorofila, e o desenvolvimento da planta nos diferentes tratamentos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Utilizar a subsolagem para romper as camadas de compactação que dificultam o desenvolvimento e o crescimento das raízes. Com o intuito de permitir que as raízes do café penetrem mais profundamente;
- Aumentar a porosidade do solo e melhorar a capacidade de absorção da água.
- Aumentar a aeração do solo, para que haja um ambiente saudável e oxigenado para as raízes e microrganismos do solo;
- Criar através da subsolagem um ambiente onde haja uma melhor penetração de fertilizantes e corretivos e a incorporação de nutrientes no solo;
- Fazer a calagem e a descompactação do solo com o auxílio da subsolagem em uma lavoura de café Mundo Novo, oriunda de um plantio realizado há cerca de 40 (quarenta) anos;
- Avaliar o crescimento e o desenvolvimento do cafeeiro sobre quatro tratamentos: testemunha; calagem; subsolagem; e calagem + subsolagem;
- Analisar o teor de clorofila e o nível de penetração em Mpa.

2. DESENVOLVIMENTO

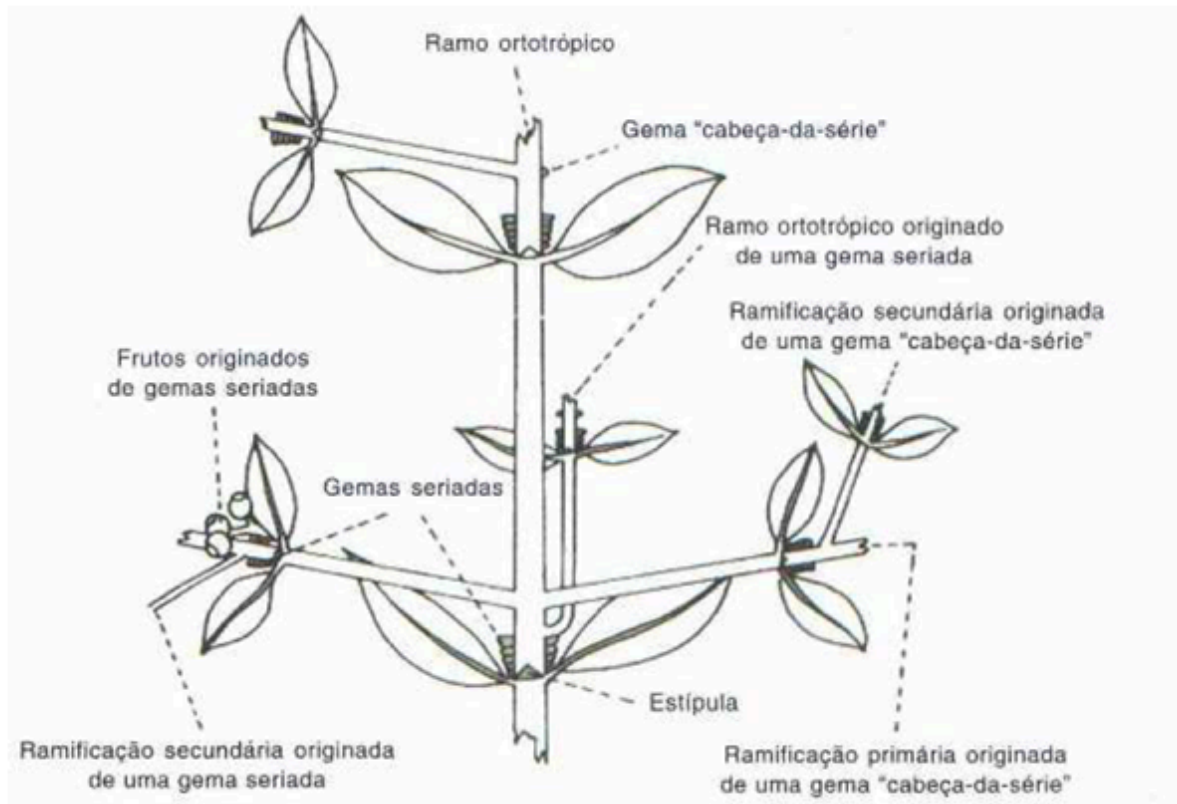
2.1 REVISÃO DE LITERATURA

A planta de café arábica

A espécie vegetal *Coffea arabica*, comumente conhecido como café arábica, é uma espécie híbrida alotetraploide proveniente do cruzamento de *Coffea eugenioides* e *Coffea canephora*, pertencente à família botânica Rubiaceae e apresenta grande importância socioeconômica devido os seus grãos serem apreciados como uma excelente bebida (SALOJÄRVI et al., 2024). A história da descoberta do café arábica é repleta de lendas e contos, fatos que tornam o apreciar da bebida ainda mais interessante. Segundo a lenda, um pastor de cabras (chamado Kaldi), às margens do Mar Vermelho, observou que após seus animais pastorearem e se alimentarem de frutos de um arbusto que ali crescia, eles ficavam mais animados. Um monge observou esse comportamento dos animais e coletou alguns frutos maduros do arbusto e levou para o monastério onde torrou e preparou uma bebida. Como resultado, ao partilhar da bebida com os irmãos do monastério, eles conseguiram ficar mais alertas nas longas noites de oração. (SMITH, 1985). Os árabes foram os primeiros que identificaram o potencial comercial do uso dessa planta, sendo que o cultivo dessa espécie foi iniciado no Iêmen do século XV ao XVI, a partir de plantas da Etiópia (FERREIRA et al., 2021). Por muito tempo a apreciação ficou restrita apenas a países islâmicos e o cultivo do café ficou restringida ao Iêmen e Arábia Saudita pois não era permitido que as sementes fossem comercializadas com o embrião vivo ou tampouco permitido visitas a plantações. Por meio de contrabando de um peregrino indiano as sementes foram levadas para a Índia e em seguida distribuídas nas ilhas de Java (atual Indonésia). No ano de 1706 ou 1710 as plantas chegaram até a Europa em Amsterdã, por meio das navegações holandesas, e, em seguida, para França (por meio de presente dos holandeses). Vendo o crescimento do consumo da bebida na Europa, a Holanda então distribuiu o cultivo de *Coffea arabica*, em suas colônias, sendo que 1718 alcançou a América do Sul por meio do Suriname. No Brasil o café foi introduzido em 1727 no estado do Grão-Pará e em seguida se disseminou para outras regiões. Nessa mesma época (1715 a 1718) outras plantas de café arábico foram levadas do Iêmen para as Ilhas Bourbon (atual Ilhas Reunidas) pelo reinado francês para explorar o cultivo em suas colônias. Assim, por meio dessas duas potências europeias (Holanda e França) o café se espalhou ao redor do mundo sendo cultivado ao redor do mundo (FERREIRA et al., 2019).

Coffea arabica é uma planta perene de metabolismo C3 e que apresenta porte do tipo arbustivo (LUNZ et al., 2008). A raiz dessa espécie é classificada como do tipo pivotante axial, ou seja, raízes que crescem verticalmente abaixo da planta rodeadas de raízes superficiais laterais, e tem as funções de sustentação, interações com microrganismos e absorção de água e nutrientes do solo (FERREIRA et al., 2019). Os ramos da planta apresentam características de dimorfismo que é a emissão ou formação de dois tipos de ramos com diferentes funções, a partir do tronco principal (Figura 1). O ramo vertical que forma a haste ou tronco é denominado ortotrópico, sendo este um ramo improdutivo com sua principal função de formar e sustentar os outros ramos. No ramo ortotrópico se encontram dois tipos de gemas vegetativas, as “seriadas” e as “cabeça-de-série”. As gemas seriadas dão origem somente aos ramos “ladrões” (outros ramos ortotrópicos), e as gemas cabeça-de-série dão origem aos ramos “horizontais”, chamados plagiotrópicos. Os ramos plagiotrópicos, por sua vez, são os que crescem com inclinação entre 45° e 90° em relação ao ramo principal, ou seja, nascem e crescem na direção horizontal, perpendicularmente ao ramo ortotrópico, formando a copa do cafeeiro. Esses são os ramos produtivos, ou seja, onde serão formados os botões florais e, conseqüentemente, os frutos do cafeeiro. O ramo plagiotrópico também possui dois tipos de gemas, as “seriadas” e as “cabeça-de-série”. As gemas seriadas podem originar frutos e ramos plagiotrópicos de ordem secundária, já as gemas cabeça-de-série dão origem apenas aos ramos plagiotrópicos de ordem secundária (RIBEIRO et al., 2022).

Figura 1. Representação esquemática das gemas auxiliares do cafeeiro e dos órgãos que delas tem origem.



Fonte: Adaptado de Rena e Maestri (1986)

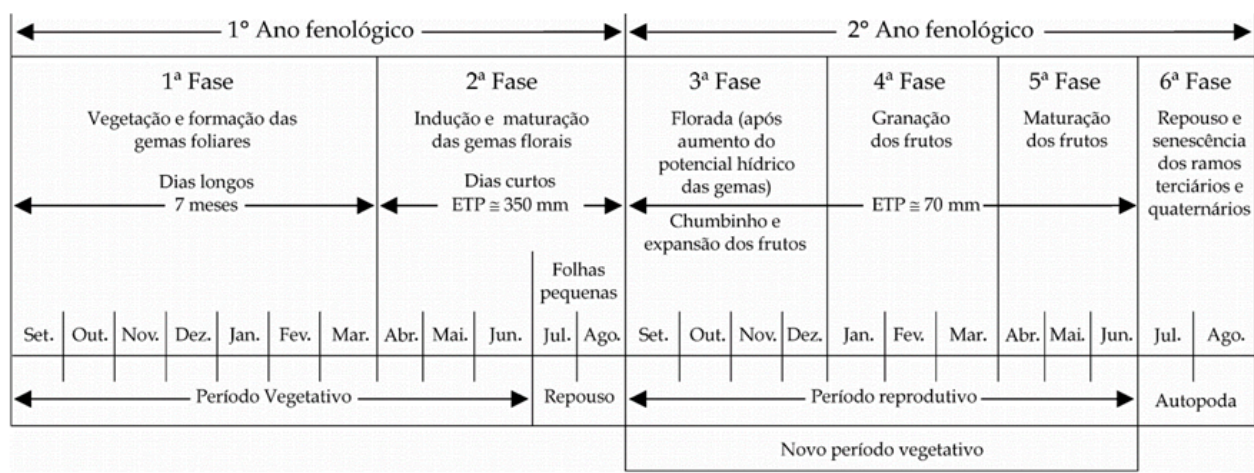
As folhas de café são geralmente finas, brilhantes e encerradas, de forma elíptica e com veios visíveis. Eles normalmente crescem em pares opostos um ao outro no galho e contêm domácias, pequenas cavidades encontradas na parte inferior da epiderme. Possui flores efêmeras (duração de 2 dias) e autógamas (autopolinização), que encontram-se reunidas em inflorescências do tipo glomerular. O fruto do cafeeiro é tipicamente descrito como uma drupa: um fruto carnudo e indeiscente com um pericarpo claramente diferenciado em exocarpo, mesocarpo e endocarpo. Por fim, as sementes de café são geralmente elípticas e de formato plano-convexo, com sulco longitudinal na superfície plana e são anatomicamente caracterizada pela presença de uma pele prateada (perisperma), o endosperma e o embrião (FERREIRA et al., 2019).

Os grãos verdes de café (nome dado ao grão beneficiado) contém 34% de celulose, 30% de açúcar, 11% de proteína, 6 a 13% de água e 2 a 15% de gordura. Além

desses, outros compostos como minerais, ácidos orgânicos (clorogênicos ou cafeoilquínicos) e alcaloides, como cafeína (1-2,5%) e trigonelina, estão presentes. Pelo processo de torrefação altera-se grandemente a composição química do endosperma, já que esse processo é uma destilação destrutiva acompanhada de desidratação, ocorrendo ainda várias reações de oxidação e redução. Sabe-se que durante esta operação a maior parte da água é eliminada, os açúcares são transformados em caramelo, os ácidos derivados da cafeína reduzem-se à metade, bem como há perda do teor da cafeína (QUEIROGA et al., 2021).

Normalmente, lavouras novas de café arábica são implantadas por meio de mudas oriundas de sementes. Essas mudas, quando transplantadas no campo, assumem um ciclo de produção definido como bienalidade do café. Na bienalidade, a planta de café inicia seu ciclo produtivo logo após o primeiro ano de implantação no campo, quando ocorre o crescimento de ramos plagiotrópicos, os quais possuem gemas seriadas que serão estimuladas a florescer no ano seguinte. Em outras palavras, os grãos do café serão obtidos a partir da diferenciação de gemas que ocorreram 2 anos atrás. Camargo e Camargo (2001) propuseram um esquema que explica a bienalidade do café conforme o desenvolvimento da planta (Figura 2).

Figura 2. Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil.



Fonte: Camargo e Camargo (2001)

Mercado de café arábica

Em 2017, o valor do setor cafeeiro global foi estimado em 83 mil milhões de dólares e proporcionou 125 milhões de empregos. Dos 12,5 milhões de explorações cafeeiras em todo o mundo, 67 a 80% são explorações por pequenos agricultores, muitas delas com menos de 5 ha, e localizadas em países do terceiro mundo (VOORA et al., 2019; MARTINEZ et al., 2023).

O *Coffea arábica* representa 70% de todo o café cultivado no mundo sendo seus grãos preferidos por, após a torrefação, apresentar sabor doce, ser ácido e com baixo teor em cafeína, diferente de variedades de *Coffea canephora* que é mais forte em cafeína e apresenta um sabor mais amargo (Queiroga et al., 2021).

A produção do café no Brasil tornou-se um dos principais contribuintes para o crescimento econômico do país (VOLSI et al., 2019), gerando oportunidades de emprego e um aumento significativo de rendimentos para os agricultores rurais (ALFONSI et al., 2019).

Em 2022 a produção mundial do café foi de 10.782.333,89 toneladas sendo o Brasil maior produtor de grãos verde com aproximadamente 29,42% do total (FAOSTAT, 2024). No Brasil, a produção em 2022 foi de aproximadamente 32.720,8 sacas beneficiadas sendo as regiões mais produtoras o sudeste (93,5%) e o Nordeste (3,88%) do país. Nesse mesmo ano, o estado do Paraná cultivou cerca de 27.190 ha (1,52% da área nacional) com produtividade média de 18,8 sc/ha (18,5% menor que a média nacional), sendo que 100 % dessa área da região sul corresponde unicamente ao estado paranaense (CONAB, 2024). Grandes Rios é a 7ª cidade com maior área plantada de café no Paraná (3,73%), ficando atrás de Carlópolis, Pinhalão, Ibaiti, Tomazina, Apucarana e São Jerônimo da Serra. Apesar da expressiva área plantada, a produtividade média no município de Grandes Rios é de 1096 kg/ha (18,26 sc/ha), o que, apesar de estar próxima da média paranaense, ainda é bastante abaixo da média nacional (IBGE, 2024).

1.2 Características físicas e químicas do solo para cultivo de café

De acordo com Thomaziello et al. (2000), um solo ideal para o cultivo de café deve ser profundo, ausente de pedras, sem compactação e de boa fertilidade. Na

ausência dessas condições, deve ser adotadas práticas agrícolas para aumentar a aeração do solo bem como a fertilidade do solo.

1.2.1 Compactação do solo

Um solo ideal para a agricultura pode ser definido como aquele que apresenta 50% de espaços porosos, ocupados por partes iguais de ar e água, 45-48% de sólidos minerais e 2 a 3 e, por vezes 5% de matéria orgânica (Novais & Mello, 2007).

A compactação do solo é tecnicamente conceituada como um aumento da densidade do solo resultante de complexas interações de processos físicos, químicos e biológicos, reduzindo a porção gasosa do solo. Fisicamente, o processo de compactação resulta da ação de forças mecânicas, oriundas de tráfegos de máquinas e/ou pisoteio de animais sobre o solo, e da ação da água de percolação no perfil do solo, transportando partículas dispersas. Enquanto as forças mecânicas aproximam as partículas unitárias do solo pela expulsão do ar e/ou água que as mantêm afastadas, reduzindo o volume total do solo as custas da redução da porosidade, a água de percolação promove essa aproximação mediante dispersão e rearranjo das partículas unitárias, obstruindo a porosidade e, conseqüentemente, concentrando massa de solo por unidade de volume. Quimicamente, a compactação pode ocorrer a partir da calagem que promove a substituição do elemento alumínio, que tem ação estabilizante da estrutura do solo, pelos elementos cálcio e/ou magnésio, que na faixa de pH abaixo de 7.0 tem ação dispersante. Por fim, biologicamente, a compactação decorre da decomposição da matéria orgânica que atua ativamente na estabilização dos agregados, sendo que operações agrícolas que aceleram a atividade biológica do solo, como revolvimento do solo, agravam o adensamento do solo (KOCHANN et al., 2000).

De acordo com Sá e Santos-Júnior (2005), a compactação do solo afeta o crescimento das plantas por reduzir o conteúdo de água no solo, taxa de difusão de oxigênio, temperatura e resistência mecânica que o solo oferece na emergência de plântulas e o crescimento radicular.

O diagnóstico de um solo compactado pode ser feito de diversas formas como pelo método da trincheira, métodos de exames de raízes, método da avaliação da

densidade, método da avaliação da densidade relativa, método da razão da compactação e método de penetrometria (KOCHANN et al., 2000; SÁ & SANTOS-JÚNIOR, 2005).

Tanto os métodos da trincheira como de exame de raízes podem ser subjetivos pois são afetados pela experiência do observador bem como condições presentes do solo como umidade ou falta de crescimento de raízes por outras razões (pragas, doenças, fertilizantes etc.). Os outros métodos são fortemente afetados por ocasião da textura do solo e umidade, sendo variável valores ótimos quando se trata de solos arenosos ou argilosos (no caso da densidade) ou valores ótimos de umidade (no caso da penetrometria) (SÁ & SANTOS-JÚNIOR, 2005).

Em relação a densidade do solo, Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para os franco-arenosos. No tocante à resistência à penetração, apesar de a resistência à penetração ser afetada pela textura, densidade do solo e conteúdo de água, baseado em diferentes estudos, Camargo & Alleoni (1997) sugerem a classificação conforme proposta na Tabela 1.

Tabela 1. Classes de resistência a penetração de solos e relação com limitações ao crescimento das raízes.

| Classes | Resistência a penetração de solos Mpa..... | Limitações ao crescimento das raízes |
|-------------------|---|--------------------------------------|
| Muito baixa | < 1,1 | Sem limitação |
| Baixa | 1,1 a 2,5 | Pouca limitação |
| Média | 2,6 a 5,0 | Algumas limitações* |
| Alta | 5,1 a 10,0 | Sérias limitações |
| Muito alta | 10,1 a 15,0 | Raízes praticamente não crescem |
| Extremamente alta | > 15,0 | Raízes não crescem |

* Para solos arenosos esse valor pode variar de 6,0 a 7,0 MPa

Fonte: Adaptado de Camargo & Alleoni (1997)

Para contornar os problemas de precisão na identificação da compactação do solo, utiliza-se o intervalo hídrico ótimo (IHO) pois esse integra a densidade do solo, umidade (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) e resistência a penetração de raízes. Através do cálculo do IHO é possível determinar a densidade crítica para o crescimento das plantas.

Leão et al. (2004) determinou o intervalo hídrico ótimo para um Latossolo vermelho distroférrico e verificou que se a densidade estivesse abaixo de $1,1 \text{ g/cm}^3$ não haveria limitações físicas, todavia, valores determinados maiores que $1,1$ caracteriza compactação e valores acima de $1,37 \text{ g/cm}^3$ limitariam completamente o crescimento de raízes. Corroborando a esses resultados, Klein (2006), para um Latossolo Vermelho argiloso, baseado no intervalo hídrico ótimo, observou que a densidade limitante foi de $1,33 \text{ kg/dm}^3$.

Por outro lado, Serafim et al. (2013) verificaram diferentes valores em dois solos cultivados com café arábica com 3,5 anos sendo o intervalo hídrico ótimo, considerando uma resistência a penetração de 3 MPa de $0,99 - 1,05 \text{ kg/dm}^3$ na profundidade de 0 a 5 cm na entrelinha do café em Cambissolo Háplico Tb distrófico e $0,87 - 0,93 \text{ kg/dm}^3$ na profundidade de 0 a 5 cm na entrelinha do café em Latossolo Vermelho distrófico.

1.2.1.1 Mecanização na cafeicultura moderna e compactação do solo

A cafeicultura brasileira busca por eficiência em todos os processos do ciclo da cultura, com a exploração ao máximo do potencial produtivo da planta, adoção de tecnologias, criação de valor em cafés superiores e redução de custos em um processo sustentável de produção, sendo a substituição da mão de obra uma necessidade devido a elevação dos custos (MOREIRA et al., 2019).

Na cafeicultura moderna, seja ela em pequena ou larga escala, a mão de obra é um fator limitante para o cultivo, devido ao menor número de membros familiares no campo no caso de pequena escala, bem como devido ao baixo rendimento operacional, falta de especialização e aos custos de contratação de trabalhadores no caso de larga escala. Uma solução para essa problemática é o uso da mecanização agrícola, pois de

acordo com Silva et al. (2006) todas as etapas da produção de café a campo são passíveis de mecanização.

Todavia, apesar de ser uma solução, o uso intenso de mecanização agrícola pode trazer problemas de compactação do solo uma vez que a operação agrícola se restringe apenas a pequenas faixas nas entrelinhas do plantio, colaborando para o maquinário transitar constantemente no mesmo local (CARVALHO-FILHO et al., 2004). Adicionalmente, a maioria das operações agrícolas no café ocorre em condições inadequadas de umidade em áreas cultivadas com cafeeiros por ocasião da fenologia da planta, o que se tem tornado preocupante em decorrência da compactação causada pelas máquinas ao longo dos anos, que pode levar à redução da produtividade (SILVA et al., 2006).

Corroborando ao exposto, Araújo-Júnior et al. (2008) observaram mudanças estruturais do solo, associadas à compactação, causadas pelo tráfego de máquinas agrícolas em lavouras de café arábica, no sul de Minas Gerais.

1.2.1.2 Mitigação da compactação

De acordo com Kochann et al. (2000), o processo de descompactação do solo pode se dar por duas vias: processo biológico e processo mecânico. O processo biológico está associado a adição de matéria orgânica no solo que confere maior estabilidade a agregados do solo por meio de liberação de substâncias cimentantes. Ainda, o uso de plantas com sistema radicular vigoroso é desejável para romper camadas compactadas e quando ocorrer a morte e a decomposição das raízes haverá a criação de macroporos no solo. Por outro lado, o processo mecânico está no princípio de romper camadas compactadas através de equipamentos que operam em profundidades ligeiramente maiores do que a camada compactada do solo.

Em cafeeiro, a subsolagem pode ser realizada como uma estratégia para áreas de solo compactado (na superfície ou subsuperfície) para eliminar problemas de camadas adensadas do solo, as quais dificultam a penetração de água, reduzem o arejamento do solo e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de café. Na lavoura de café, a subsolagem é realizada na projeção da saia e de um lado da fileira de cada vez, pois o rompimento de raízes, dos dois lados, de uma só vez, pode prejudicar a planta, principalmente se demorar a chover (FERRÃO et al., 2017)

Ainda, de acordo com Matiello et al., 2010, em plantios de café com compactação superficial, recomenda-se utilizar o subsolador a uma profundidade de 0,2 a 0,3 m, já em áreas com camadas compactadas mais profundas, utiliza-se o implemento em profundidades de 0,5 a 0,7 m.

Fernandes et al. (2012) estudaram a subsolagem em solo cultivado com café variando o número de hastes do subsolador em duas safras e o número de passadas de subsolador em uma safra posterior a subsolagem e concluíram que o subsolador de duas hastes tem potencial de incrementar até 65% da produtividade do café (média de três safras) e 37% em relação ao incrementado com uma passada.

Correção da acidez do solo

Para garantir uma ótima produção agrícola e fitossanitária, é essencial corrigir a acidez do solo. O pH mais adequado para a maioria das culturas está entre 6,0 e 7,0. Solos com pH abaixo de 6,0 podem comprometer a disponibilidade de nutrientes essenciais, causar toxicidade por alumínio e dificultar o manejo do solo. A realização de um teste de pH é uma etapa essencial para determinar o nível de acidez e a quantidade de alteração necessária para os ajustes apropriados (Lal et al., 2021).

A calagem, que consiste na aplicação de calcário, é o método mais utilizado para corrigir a acidez do solo. O calcário dolomítico é recomendado quando há necessidade de adição de cálcio e magnésio ao solo, enquanto o calcário calcítico é adequado apenas para fornecer cálcio. É importante aplicar cal uniformemente e incorporá-lo ao solo para garantir uma distribuição eficaz (Sanchez et al., 2019).

Após a aplicação do corretivo, é necessário trabalhar o material no solo com arado ou enxada e monitorar o pH regularmente. Práticas de manejo, como rotação de culturas e adubação adequada, são importantes para manter o pH do solo em níveis ideais. Regular a acidez do solo não só aumenta a produtividade, mas também promove um ambiente saudável para o crescimento das plantas (Brady et al., 2016).

Efeito da calagem na produção de café

A calagem desempenha um papel crucial na correção da acidez do solo e é fundamental para otimizar o cultivo de várias plantas, incluindo o café. Essa prática traz diversos benefícios para a produção de café. Ao ajustar o pH do solo, a calagem facilita

a disponibilidade de nutrientes essenciais como fósforo, cálcio e magnésio, que são importantes para o desenvolvimento saudável do cafeeiro, podendo assim aumentar a produção de café. Solos ácidos, geralmente com pH abaixo de 5,5, podem afetar negativamente a disponibilidade de nutrientes e a saúde do cafeeiro (GONÇALVES et al., 2011).

Adicionalmente, a calagem reduz a toxicidade do alumínio, frequentemente presente em solos ácidos, que pode afetar negativamente o crescimento das plantas. No qual, o Ca^{2+} neutraliza Al^{3+} no solo. Reduzindo a solubilidade do alumínio, a calagem melhora as condições para as raízes do cafeeiro, promovendo um crescimento mais vigoroso (Holford et al., 2020).

De acordo com a Embrapa, a calagem melhora a estrutura do solo e proporciona um ambiente mais favorável ao desenvolvimento radicular, contribuindo para um aumento na produção de café. Além disso, a aplicação de cal também potencializa a eficiência dos fertilizantes, facilitando a absorção dos nutrientes pelas raízes e, conseqüentemente, promovendo uma maior produtividade dos cafeeiros" (Embrapa, 2024).

Finalmente, manter o pH do solo ajustado pode ter um efeito benéfico na qualidade do café. Solos com pH equilibrado podem melhorar o sabor e a qualidade dos grãos, atendendo melhor às expectativas do mercado e dos consumidores (Gichuru et al., 2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O presente trabalho é o estudo de um experimento próprio, realizado no período do dia 19/08/2023 a 23/06/2024, na propriedade denominada Sítio Alto Alegre, localizada no Distrito Lagoa Seca, no Município de Grandes Rios-PR, com locação geográfica entres os paralelos $24^{\circ} 15' 55''$ S e de $51^{\circ} 25' 10''$ O, com altitude de 746 metros. O solo na área é classificado como LATOSSOLO VERMELHO eutroférico típico (BHERING et al.,2008) e o clima da região, de acordo com a classificação de Koppen, é predominantemente Cfa (clima úmido temperado com verões quentes) (ALVARES et.al., 2014).

O experimento foi conduzido em uma lavoura de café do cultivar Mundo Novo, oriunda de um plantio realizado há cerca de 40 (quarenta) anos, cujo espaçamento possui 05 (cinco) metros entre linhas e 02 (dois) metros entre plantas.

Após delimitada a área do experimento, foi realizado a identificação da profundidade e a intensidade da penetração para entender a textura do solo, em seguida, as análises de solo e demarcação dos tratamentos em várias áreas do cafezal para determinar o experimento e o nível de resistência à penetração e a necessidade de subsolagem.

Antes do início do experimento, foi realizada a amostragem do solo na profundidade de 0,20 metros para caracterização físico-química da área e determinação dos tratamentos. Os dados da análise de solo estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização química e física das amostras de solo no talhão do experimento localizado no município de Grandes Rios – Paraná

| Características físicas | | | | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| Argila (%) | | Silte(%) | | | Areia(%) | |
| 59 | | 16 | | | 25 | |
| Características químicas | | | | | | |
| P- Mehli ch1 (mg.dm ⁻³) | K (cmolc.d m ⁻³) | Ca (cmolc.dm ⁻³) | Mg (cmolc.dm ⁻³) | S (mg.dm ⁻³) | Al (cmolc.dm ⁻³) | CTC pH 7 (cmolc. dm ⁻³) |
| 26,6 | 0,23 | 0,4 | 0,1 | 59,4 | 3,30 | 16,8 |
| MO (%) | pH (CaCl ₂) | Saturação de K (%) | Saturação de Ca (%) | Saturaçã o de Mg (%) | m (%) | V (%) |
| 3,9 | 3,2 | 1 | 3 | 1 | 81 | 5 |

Mat. Org. - matéria orgânica. P - fósforo, K - potássio, Ca - cálcio, Mg - magnésio, Al - alumínio, H - AL» hidrogênio + alumínio, SB - soma de bases, CTC (1) = capacidade de troca catiônica efetiva, CTC (T) - capacidade de troca cationica em pH 7, V - saturação de bases, m - saturação de alumínio. B - boro. Cu » coore. Fe = ferro, Mn = manganés. Zn = zinco. S - enxofre.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado em delineamento experimental de blocos ao acaso com 5 repetições e 4 tratamentos, totalizando 20 parcelas. A área total do ensaio foi de 540 m², sendo 108 metros lineares e cada parcela possuía o tamanho de 27 m². Os tratamentos consistem : Testemunha (T1); Calagem (T2); Subsolação (T3) e Calagem + Subsolação (T4). Foi realizado em todos os tratamentos o esqueletamento das plantas, que consiste em uma poda dos ramos laterais plagiotrópicos do cafeeiro no dia 19/08/2023.

A necessidade de calagem foi realizada conforme método da elevação da saturação por bases para o estado do Paraná (ANDRADE, 2011), para o valor desejado de saturação por base de 60%. Para a distribuição do calcário, foi considerada a área de projeção da copa referente a 20% da área total do experimento, a profundidade de ação do calcário sem incorporação e o poder relativo de neutralização total (PRNT) do calcário (92%). O calcário usado no experimento possuía as seguintes características: CaO - Óxido de Cálcio 53%, MgO - Óxido de magnésio 42%.

A aplicação de calcário, foi realizada manualmente, 500 gramas por planta através da distribuição em faixas em toda a projeção saia, na data de 19/08/2023.

Para a subsolação foi utilizado um subsolador convencional com algumas adaptações: o alongamento da estrutura em 50 centímetros para uma das extremidades do subsolador, para que uma das hastes alcance o máximo do interior do barrado do cafeeiro; e a utilização 02 hastes de aproximadamente 60 centímetros de comprimento, com 40 centímetros de espaçamento entre si, para que uma delas fosse conduzida próxima à projeção das raízes, enquanto a outra próximo ao rodado do trator. A operação de subsolação foi realizada em 19/08/2023.

Figura 1. Realização da subsolação no campo de experimento.



Fonte: Autor (2023).

A adubação foi realizada de acordo com necessidades específicas da planta, levando em consideração fatores como tipo de solo, fase de desenvolvimento do cafeeiro e as características da cultura. O plano de adubação proposto inclui três aplicações principais ao longo do ciclo do cafeeiro, ajustadas conforme as condições locais e as análises de solo.

A primeira aplicação foi realizada após a colheita, em novembro de 2023. Para esta fase, foi utilizado Sulfato de Amônia (20% N e 22% S), na dose de 100 gramas por planta. A aplicação deve ser feita ao redor da base das plantas para garantir a adequada absorção dos nutrientes.

A segunda aplicação ocorreu durante o crescimento vegetativo, em janeiro de 2024. A fórmula utilizada foi o fertilizante NPK 20-05-20, também na dose de 100 gramas por planta. Esta aplicação deve fornecer aproximadamente 40-50 kg/ha de Nitrogênio (N), 05-10 kg/ha de Fósforo (P₂O₅), e 40-50 kg/ha de Potássio (K₂O).

A terceira aplicação foi realizada em março de 2024, novamente utilizando o NPK 20-05-20, com a mesma dose de 100 gramas por planta. Para esta fase, a aplicação deve fornecer cerca de 40-50 kg/ha de Nitrogênio (N), 05-10 kg/ha de Fósforo (P₂O₅), e 40-50 kg/ha de Potássio (K₂O).

Método: Foi aplicado ao redor das plantas, sobre a matéria orgânica, disponibilizada pela cobertura de solo, para garantir que os nutrientes estejam disponíveis durante o período crítico de floração.

Foi realizada, ainda, uma aplicação de fungicida (Priori xtra - Azoxistrobina e Ciproconazol) via foliar, para o controle de ferrugem e o fertilizante NPK Éfforos.

3.3 Parâmetros avaliados

a) Resistência a penetração do solo

O equipamento utilizado para a avaliação foi o "penetrômetro de impacto", no qual foi o identificador dos graus de compactação e eficácia da subsolagem. Realizado no dia 17 de dezembro de 2023. Os parâmetros seguidos foram avaliar a compactação em 20 cm, 40 cm, 60 cm e 80 cm da linha do tronco de cada tratamento, seguido do lado superior da planta.

Figura 2. Avaliação penetrômetro de impacto.



Fonte: Autor (2023).

b) Teor de clorofila

Foram realizadas três avaliações, a primeira no 10 de janeiro de 2024, a segunda no dia 01 de março de 2024 e a terceira avaliação no dia 23 de junho de 2024, utilizando

o aparelho Chlorophyll Meter SPAD-502 Plus (figura 3). Para essa avaliação, foram selecionadas todas as plantas de cada tratamento. Sendo avaliados os teores de clorofila de Norte, Sul, Leste e Oeste da terceira folha do ramo plagiotrópico no terço médio de cada planta. Os resultados obtidos foram expressos conforme índice fornecido pelo equipamento.

Figura 3. Avaliação do índice de clorofila (SPAD).



Fonte: Autor (2024).

3.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada utilizando o método F de Tukey, aplicado em um experimento fatorial 2x2. Neste estudo, foram avaliados dois níveis de calagem e dois níveis de subsolagem. O objetivo era identificar as interações e efeitos principais desses fatores sobre as variáveis de interesse. O método F de Tukey permite comparar as médias dos tratamentos, fornecendo uma maneira robusta de entender como as diferentes combinações de calagem e subsolagem influenciam o resultado experimental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados obtidos, observa-se que os valores de clorofila não sofreram alterações conforme a sazonalidade da época avaliada (Tabela 4). As

condições do experimento, nem a subsolagem, nem a calagem, isoladamente ou em combinação, tiveram um efeito significativo sobre o índice de clorofila das plantas nas três datas de avaliação. Estudos recentes demonstram que a aplicação adequada de calcário não só eleva o pH do solo, mas também aumenta a disponibilidade de nutrientes e melhora a estrutura do solo, facilitando o cultivo e potencializando o crescimento das plantas, (NUNES et al., 2022, p. 214-225).

A ausência de efeitos significativos pode ser atribuída a diversos fatores, como a possível adequação dos níveis de nutrientes no solo antes do início do experimento ou a ausência de estresses hídricos, no qual, segundo os estudos de Cavatte et al. (2012) relatam que na intensificação do déficit hídrico, a planta reduz teores de clorofila. No entanto, a falta de significância estatística nas análises sugere que outros fatores não controlados no experimento podem estar influenciando o índice de clorofila, ou que o período de experimento não foi suficiente para gerar diferenças significativas nas condições específicas do estudo, como consta na tabela 4.

Tabela 4. Resultado estatístico das características de índice SPAD (SPAD).

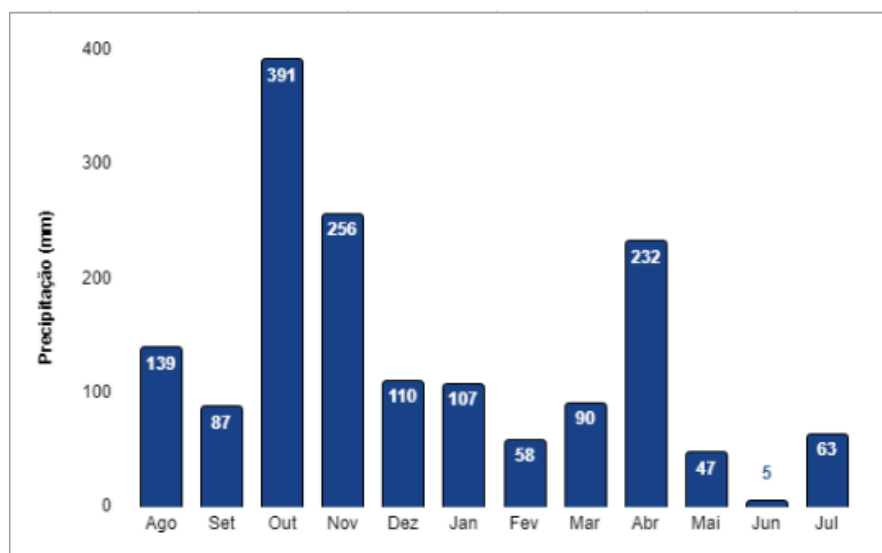
| Tratamentos | IC-SPAD (10/01) | | IC-SPAD (01/03) | | IC-SPAD (23/06) | | |
|---------------------------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|-------|
| |Calagem..... | | | | | | |
| | Sem | Com | Sem | Com | Sem | Com | |
| Subsolagem | Sem | 59,94 | 58,19 | 63,11 | 61,81 | 62,11 | 63,09 |
| | Com | 59,54 | 58,87 | 64,52 | 60,86 | 62,29 | 61,72 |
| <i>p</i> -Valor (Subsolagem) | 0.300 | | 0.168 | | 0.859 | | |
| <i>p</i> -Valor (Calagem) | 0.902 | | 0.892 | | 0.614 | | |
| <i>p</i> -valor (Interação) | 0.637 | | 0.498 | | 0.512 | | |
| <i>p</i> -valor (Bloco) | 0.679 | | 0.761 | | 0.803 | | |

| | | | |
|--------------------------------|------|------|-----|
| Coeficiente de variação (%) | 4.22 | 6.03 | 4.1 |
|--------------------------------|------|------|-----|

*Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente ao nível de 5% de significância pelo teste de tukey. SPAD = Índice de Clorofila SPAD;

O café arábica, por exemplo, prospera em temperaturas médias anuais entre 18°C e 24°C, com uma distribuição anual de precipitação de 1.200 a 2.500 mm. É crucial que o cultivo evite temperaturas extremas e períodos prolongados de seca" (ALVARES et al., 2014). Dados pluviométricos segundo o IAT nos últimos 5 anos (2019 a 2023) foi em média de 1629,1 mm, sendo que no ano do experimento obteve em média 1.585 mm de chuva, no período compreendido entre agosto de 2023 e junho de 2024, como demonstrado no gráfico a seguir.

Figura 4. Precipitação de chuvas, durante o período do ensaio segundo o IAT, (agosto/23 a julho/24).



Fonte: Autor (2024).

Relacionado ao uso da subsolagem na barra do cafeeiro para efeito de descompactação do solo, Bergamin et al. (2010) eles afirmam que o preparo do solo sob a prática de descompactação, influencia a anatomia e o crescimento do sistema

radicular, e que a resistência à penetração é o indicador físico mais eficaz para refletir esse impacto ao longo do perfil do solo, o experimento realizado em quatro medidas diferentes, sendo que, o gráfico A representa a distância de 20 cm do tronco; o gráfico B representa a distância de 40 cm do tronco; o gráfico C representa a distância de 60 cm do tronco; e o gráfico D representa a distância de 80 cm do tronco. Onde foi verificado a resistência à penetração do solo, de diferentes manejos químicos e físicos do solo. T1: Controle; T2: Controle + Calagem; T3: Controle + Subsolação; T4: Controle + Calagem + Subsolação.

No gráfico A abaixo, onde se verifica a distância de 20 cm do tronco, a resistência de penetração sobre o fator subsolação, foi significativa em MPa, entre 0 a 5 cm de profundidade.

No gráfico B, onde se verifica a distância de 40 cm do tronco, a resistência de penetração sobre o fator subsolação foi significativa em MPa, entre 0 a 10 cm de profundidade.

No gráfico C, onde se verifica a distância de 60 cm do tronco, a resistência de penetração sobre o fator subsolação foi significativa em MPa, entre 0 a 20 cm de profundidade.

No gráfico D, onde se verifica a distância de 80 cm do tronco, a resistência de penetração sobre o fator subsolação foi significativa em MPa, entre 0 a 40 cm de profundidade.

Através das avaliações realizadas e dos dados obtidos, pode-se constatar que o efeito da subsolação na saia do cafeeiro influencia diretamente na reestruturação do solo, aumentando a sua porosidade. Ao analisar os gráficos A 20 cm, B 40 cm, C 60 cm, e D 80 cm, verificou-se que em alguns pontos dos tratamentos onde foi realizado a subsolação, os graus de penetração, em megapascal, encontram-se em níveis adequados para o desenvolvimento da raiz da planta. A subsolação com aração e gradagem aumenta a porosidade da camada superficial do solo, bem como o potencial de desenvolvimento radicular a curto prazo (CORSINI & FERRAUDO, 1999).

Figura 5. A. Gráficos A - 20 cm, B - 40 cm, C - 60 cm e D - 80 cm. Resultado da avaliação do penetrômetro de impacto.

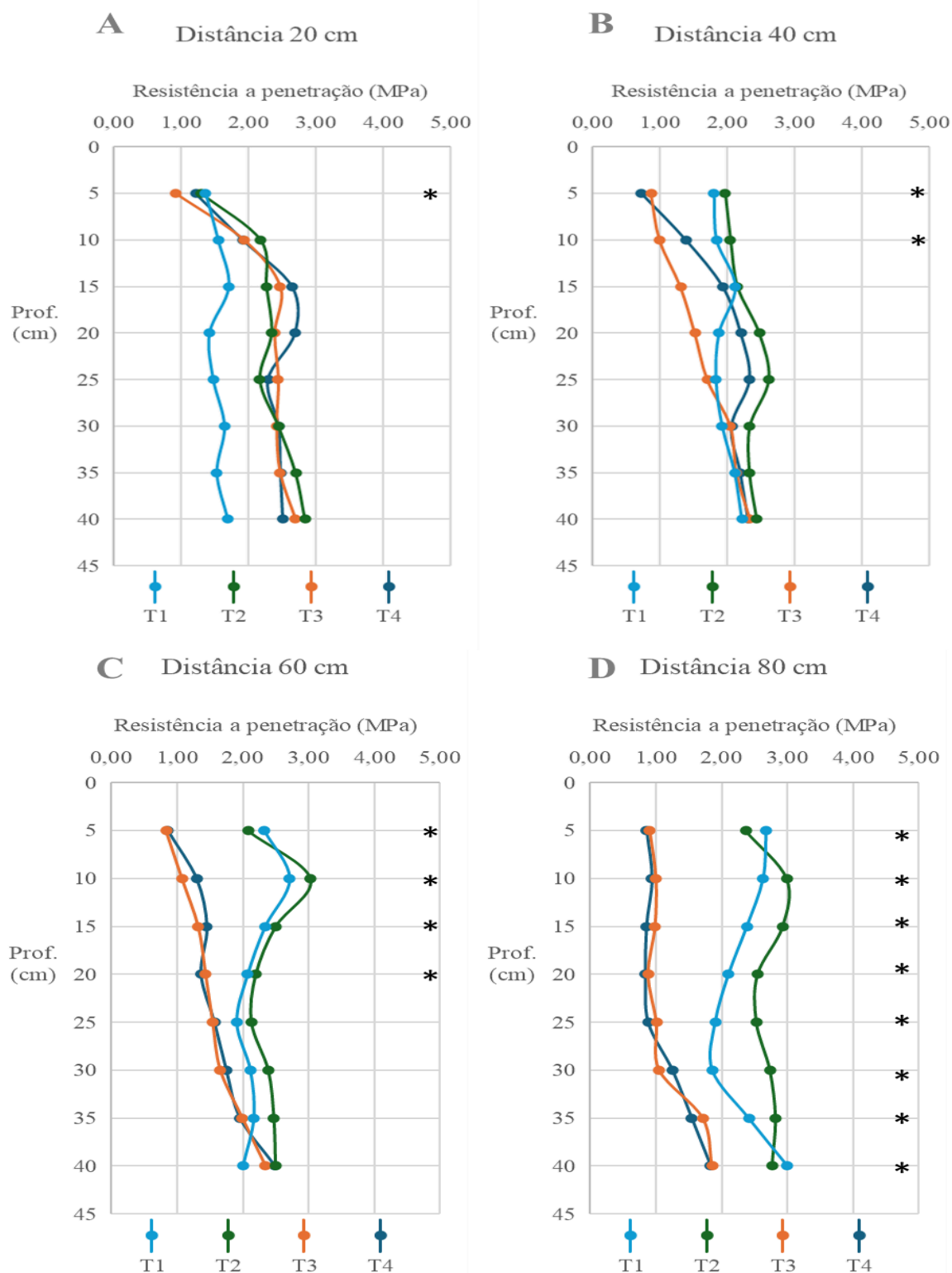


Figura 5 - Resistência à penetração do solo, medido a 20 cm (A), 40 cm (B), 60 cm (C) e 80 cm (D) da linha de plantio de café, de diferentes manejos químicos e físico do solo. T1: Controle; T2: Controle + Calagem; T3: Controle + Subsolação; T4: Controle + Calagem + Subsolação. Marcação com * significa que o fator subsolação foi significativo pelo teste F.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a subsolagem se mostra uma técnica eficaz para a remoção de camadas compactadas no solo. Foi utilizado um subsolador de duas hastes para penetrar e descompactar o solo em profundidade, promovendo melhorias na estrutura do solo e facilitando o desenvolvimento das raízes. Além disso, a redução do tráfego intenso de máquinas pesadas nas áreas de cultivo é crucial para prevenir a compactação. O experimento realizado confirma a importância da subsolagem na melhoria da estrutura do solo em áreas com alta resistência à penetração, demonstrando a eficácia desta técnica na reestruturação física do solo. Observou-se também que, considerando os diferentes tratamentos e a pluviosidade adequada para a cultura, não foram encontradas diferenças significativas nos níveis de clorofila analisados.

6. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 495-504, 2004.

ARAÚJO JUNIOR, C.F. et al. Capacidade de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011a.

ARAÚJO JUNIOR, C.F. et al. Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo sujeito a diferentes manejos de plantas invasoras em refatório. **Usina Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 499-513, jul./set. 2011b.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ALFONSI, W.M.V. et al. Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 2, p. 134–140, 2019.

ANDRADE, C.E. Calagem e adubação do café. Viçosa: **Aprenda Fácil**, 2001. 130 p.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 299-305, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300010>.

BHERING, S.B.; SANTOS, H.G.; BOGNOLA, I.A.; CÚRCIO, G.R.; MANZATTO, C.V.; JÚNIOR, W.C.; CHAGAS, C.S.; ÁGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S.M. Mapa de solos Estado do Paraná: legenda atualizada. **Embrapa Solos**, Embrapa Florestas, Colombo, PR, 74 p. 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/578217/mapade-solos-do-estado-do-parana-legenda-atualizada>. Acesso em: 20 mar. 2023.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson, 2016. p. 214.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 68, p. 49-57, 2002.

CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.

CARVALHO FILHO, A.; DA SILVA, R.P.; FERNANDES, A.L.T. Compactação do solo em cafeicultura irrigada. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CARVALHO, A.E.; KRUG, C.A. Agentes de polinização da flor do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bragantia [online]**, v. 9, n. 1-4, p. 11-24, 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051949000100002>.

CARVALHO, T.S.; COSTA, A.L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 171-180, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.015>.

CAVATTE, P.C. et al. O sombreamento poderia reduzir os impactos negativos da seca no café? Uma análise morfofisiológica. **Fisiologia Vegetal**, v. 144, n. 2, p. 111-122, 2012.

CIÊNCIA DO SOLO. 29. Ribeirão Preto, 2003. *Anuais...* Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 2, maio, 2021.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Café – Safra 2023. 4º Levantamento. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 15 maio 2024.

EMBRAPA. *Calagem e sua importância para a produção de café*. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 7 set. 2024.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 05 mar. 2020.

FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, F.; SANTINATO, R. Utilização da subsolagem na redução da compactação do solo para produção de café cultivado no cerrado mineiro. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 1648, 2012.

FERREIRA, J.L.; CAIXETA, E.T.; CANIATO, F.F.; SETOTAW, T.; SANT'ANA, G.C.; FERREIRA, L.M. Genetic Diversity of Coffea Arabica. In: MAIA, R.T.; CAMPOS, M.A. (Eds.) *Genetic Variation*. IntechOpen, 2021. p. 1-23.

FERREIRA JÚNIOR, L.DE G. et al. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciencia Rural**, v. 46, n. 2, p. 273–278, 2016.

FERREIRA, T.; SHULER, J.; GUIMARÃES, R.; FARAH, A. Introduction to Coffee Plant and Genetics. In: FARAH, A. (Ed.) *Coffee: Production, Quality and Chemistry*. Royal Society of Chemistry: S/Am, 2019. p. 1-25.

GICHURU, M.; MWAURA, F. Coffee Quality and Processing. Wiley-Blackwell, 2022. p. 98.

GONÇALVES, J.R.P.; MOREIRA, A.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; BOAS, R.L.V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 369-375, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.3659>.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOAS, R. L. V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 369-375, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.3659>.

GUARÇONI, A. Saturação por bases para o cafeeiro baseada no pH do solo e no suprimento de Ca e Mg. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 327-336, 2017.

GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 1301-1314, 2008.

HILLEL, D. **Soil and Water: Physical Principles and Processes**. Academic Press,

2004.

LAL, R., & STEWART, B. A. (2021). Soil Fertility and Nutrient Management for Coffee Cultivation. In *Soil Management for Sustainable Agriculture* (pp. 80-100). CRC Press.

LASHERMES, P. et al. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics**, New York, v. 261, p. 259-266, 1999.

MATIELLO, J. B. et al. Produção de cafés especiais. In: MATIELLO, J. B. et al. *Cultura do café no Brasil*. Varginha: Futurama Editora, 2016.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura do Café no Brasil: Manual de Recomendações**. Rio de Janeiro e Varginha: Fundação Procafé, 2010. 542 p.

MAZZA, J. A. et al. Influência da compactação no desenvolvimento de sistema radicular de cítrus: sugestão de método quantitativo de avaliação e recomendações de manejo. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 15, n. 2, p. 263-275, 1994.

MINATEL, A. L. G. et al. Efeitos da subsolagem e da adubação verde nas propriedades físicas do solo em pomar de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 86-95, 2006.

MOREIRA, Antônio. Conhecendo o grão: segredos e sabores. In: MOREIRA, Antônio. **História do café no Brasil**. São Paulo: Magma Editora cultural, 2007.

MOTTA SOBRINHO, A. *A civilização do café: 1820-1920*. 3. ed. São Paulo: Brasiliense, 1978.

OLEGO, M. A. et al. Assessing the effects of soil liming with dolomitic limestone and sugar foam on soil acidity, leaf nutrient contents, grape yield and must quality in a Mediterranean vineyard. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. e1102, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016142-8406>.

PENDERGRAST, M. *Uncommon Grounds: The History of Coffee and How It Transformed Our World*. Basic Books, 2019.

RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. p. 97-101. (Boletim Técnico, 100).

RAMÍREZ-BUILES, V. H. et al. Calcium Nutrition in Coffee and Its Influence on Growth, Stress Tolerance, Cations Uptake, and Productivity. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 590892, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.590892>.

ROGERS, E. D.; BENFEY, P. N. Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 32, p. 93-98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.11.015>.

SANTINATO, F. et al. Análise econômica da colheita mecanizada do café utilizando repetidas operações da colhedora. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 402-411, 2015.

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediatos e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho escuro sob PD. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, p. 52-61, 1997.

SILVA, C. A. et al. Produtividade do cafeeiro e atributos de fertilidade de latossolo sob influência de adensamento da lavoura e manejo da calagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 5, p. 1066-1076, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000500014>.

SMITH, R.; JONES, L. Plant Taxonomy and Classification: Understanding the Position of Coffee Plants. In: *Plant Systematics: An Integrated Approach*. Springer, 2022. p. 100-120.

TERRA, Instituto Agua e. Dados de Precipitações do Paraná: chuvas totais mensais. Chuvas totais mensais. 2024. Grandes Rios - PR. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioTotaisMensaisPrecipitacao.do?action=carregarInterfacelInicial>. Acesso em: 15 ago. 2024.

TORRES, E. et al. Avaliação de sistemas de preparo do solo, rotação de culturas e semeadura da soja. Londrina: Embrapa Soja, 1998. (Série Documentos).

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Produção, suprimento e distribuição, 2020.

VASQUEZ, E. V.; DE MARIA, I. C. Influencia del Laboreo sobre la rugosidad del suelo y la retención de agua en um Ferrasol. In: Congresso Brasileiro.

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, p. 1-15, 2019.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil Till. Res.**, v. 84, p. 200-215, 2005.