

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PAULO HENRIQUE RIBEIRO MARQUES

**FATORES DETERMINANTES DO SOLO NA QUALIDADE DO
Coffea arabica L. EM SISTEMA AGROFLORESTAL E
CONVENCIONAL**

Recife

2024

Paulo Henrique Ribeiro Marques
Engenheiro Agrônomo

**Fatores determinantes do solo na qualidade do *Coffea arabica* L. em sistema
agroflorestal e convencional**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira

Recife

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

M357f Marques, Paulo Henrique Ribeiro.
Fatores determinantes do solo na qualidade do *Coffea arabica* L. em sistema agroflorestal e convencional / Paulo Henrique Ribeiro Marques. - Recife, 2024.
82 f.; il.

Orientador(a): Brivaldo Gomes de Almeida.
Co-orientador(a): Ademir de Oliveira Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Solos . 2. Porosidade. 3. Temperatura. 4. Café
5. Avaliação sensorial . I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Ferreira, Ademir de Oliveira, coorient. III. Título

CDD 631.4

Paulo Henrique Ribeiro Marques

**Fatores determinantes do solo na qualidade do *Coffea arabica* L. em sistema
agroflorestal e convencional**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de julho de 2024.

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Luciana Leite de Andrade Lima Arruda
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, Cândida e Geraldo Marques (*In memoriam*), aos meus filhos Daniel, Carol, aos meus filhos pernambucanos Matheus, Lucas, Leo e Gisely, e à minha esposa Cecília.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade desta existência.

Agradeço à minha família: aos meus pais pelo carinho, amor, apoio, incentivo e educação com base no exemplo. Aos meus filhos pelo amor, incentivo e motivação. À minha esposa pelo incentivo, apoio incondicional, cuidados, companheirismo e amor. Aos meus irmãos pelo incentivo, atenção e carinho.

Aos meus amigos do LaFiS: Alison, Eudes, Talmo, Edilson, Arnaldo, Rhyan, Lua, Steffany, Victor e Romulo, minha gratidão eterna pela ajuda e apoio sempre. “Companheiro é companheiro.”

Agradeço a todos os amigos do Laboratório de Análises Gastronômicas e Experimentação de Alimento por todo apoio recebido nas análises e ensaios, aprendizado, pelo carinho e acolhimento.

Agradeço ao meu orientador professor Brivaldo pela dedicação, apoio, incentivo, ensinamentos e paciência.

Também agradeço aos professores Ademir, Luciana, Wagner, Fred, Marcelo pela ajuda, disponibilidade e contribuições.

Agradeço aos amigos, professores e alunos do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da UFRPE, todos que direta ou indiretamente me ajudaram neste trabalho.

Agradeço muito ao Luciano e sua família, produtores de café em Miracica – Garanhuns PE, por todo apoio na pesquisa, pela generosidade e gentileza de abrir as portas de sua casa para nos receber e fazer com que fosse possível este trabalho.

Agradeço a CAPES pela concessão da bolsa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Também agradeço a UFRPE pela oportunidade da pesquisa, pelo espaço e estrutura para realização deste trabalho.

Agradeço aos “anjos” que me socorreram durante a caminhada...

Por fim, e não menos importante, agradeço a Baleia que está presente em todos os momentos deste trabalho e além.

Fatores determinantes do solo na qualidade do *Coffea arabica* L. em sistema agroflorestal e convencional

RESUMO

A cultura do café é um elemento essencial da história e economia brasileira. O Brasil é o maior produtor de café do mundo e a cultura do grão é disseminada em diversas regiões do país. Entretanto, a produção agrícola, não somente do café, mas para toda agricultura, tanto para o grande produtor rural como para aqueles que trabalham na agricultura familiar, depende da qualidade do solo. Esta é frequentemente quantificada por meio de seus atributos, com destaque para os físicos, químicos e biológicos. No cultivo de *Coffea sp.* é mais comum o manejo convencional. O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações na qualidade estrutural dos solos sob cultivo do cafeeiro em duas condições de manejo: convencional e agroflorestal em Miracica – Garanhuns - Pernambuco. A pesquisa buscou entender como o tipo de manejo altera a qualidade estrutural do solo e se este tem influência na qualidade do café. Desta forma, delimitamos duas áreas experimentais sob cultivo do café, sendo uma área onde o cafeeiro é cultivado de forma convencional a pleno sol, e outra área onde o cafeeiro é cultivado sombreado, no sistema agroflorestal. Em cada área, foram coletadas amostras de solo: em blocos de 20 × 20 × 20 cm com estrutura preservada, amostras em cilindros volumétricos de aproximadamente 100 cm³ retiradas por meio de um amostrador do tipo Uhland e amostras de solo desestruturadas (sem estrutura preservada) utilizando um trado tipo holandês. Estas amostras foram devidamente embaladas e protegidas em plástico bolha e transportadas ao laboratório de Física do Solo da UFRPE. Após a preparação das amostras, foram realizados ensaios para a caracterização dos solos das áreas sob cultivo de café arábica, tendo-se como atributos físicos do solo: a distribuição das frações granulométricas, argila dispersa em água, cálculo do grau de floculação; densidade do solo e densidade de partículas; porosidade total e sua distribuição em classes de poros; resistência tênil de agregados do solo; resistência do solo à penetração de raízes (RP); umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados de RP (U_{RP}); índices de estabilidade de agregados; além da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e temperatura do solo. Quanto aos atributos químicos, foram determinados: pH (H_2O), complexo sortivo; carbono orgânico total e matéria orgânica para caracterização dos solos sob cultivo de café arábica. Também foram realizadas análises físico-químicas do café e testes para identificar o perfil sensorial do café, com grãos obtidos de cafeeiros cultivados sob os sistemas agroflorestal e convencional, avaliando a interferência destes sobre as características físico-químicas e parâmetros cromáticos do café. Os resultados mostraram que alguns atributos físicos do solo são mais afetados de acordo com o sistema de manejo empregado, a exemplo da K_{sat} , que foi maior no sistema agroflorestal em relação ao sistema convencional, assim como a umidade (U_{RP}). A temperatura do solo foi maior para o sistema convencional, assim como sua amplitude térmica. Também foi possível identificar diferenças entre os atributos sensoriais dos cafés que, apesar de serem da mesma variedade e cultivados na mesma classe de solo, em áreas próximas (≈ 100 m), tiveram avaliações distintas, sendo diferentes no sistema de manejo empregado na cultura cafeeira.

Palavras-chave: Temperatura do solo. Porosidade do solo. Atributos sensoriais. Bioativos. Café.

Soil determining factors in the quality of *Coffea arabica* L. in agroforestry and conventional systems

ABSTRACT

Coffee culture is an essential element of Brazilian history and economy. Brazil is the largest coffee producer in the world and the cultivation of the bean is widespread in several regions of the country. However, agricultural production, not only coffee but for all agriculture, both for large rural producers and for those who work in family farming, depends on the quality of the soil. This is often quantified through its attributes, emphasizing physical, chemical, and biological attributes. In cultivation of *Coffea* sp. Conventional management is more common. The objective of this study was to evaluate changes in the structural quality of soils under coffee cultivation under two management conditions: conventional and agroforestry in Miracica – Garanhuns - Pernambuco. The research sought to understand whether the type of management changes the structural quality of the soil and whether this has an influence on the quality of the coffee. In this way, we delimited two experimental areas under coffee cultivation, one area where coffee is grown conventionally in full sun, and another area where coffee is grown in shade, in the agroforestry system. In each area. soil samples were collected: in 20x20x20 cm blocks with preserved structure, samples in core of approximately 100 cm³ were taken using a Uhland-type sampler, and unstructured soil samples (without preserved structure) using a Dutch-type auger. These samples were properly packaged and protected in bubble wrap and transported to the Soil Physics laboratory at UFRPE. After preparing the samples, tests were carried out to characterize the soils in the areas under Arabica coffee cultivation, taking into account the physical attributes of the soil: the distribution of particle size fractions, clay dispersed in water, calculation of the degree of flocculation; soil density and particle density; total porosity and its distribution into pore classes; tensile strength of soil aggregates; soil resistance to root penetration (RP); gravimetric humidity at the time of RP data collection (U_{RP}); aggregate stability indices; in addition to saturated hydraulic conductivity (Ksat) and soil temperature. As for chemical attributes, the following were determined: pH (H₂O), assortative complex; total organic carbon and organic matter to characterize soils under Arabica coffee cultivation. Trials, physical-chemical analyses of coffee, and tests were also carried out to identify the sensorial profile of coffee with beans obtained from coffee trees grown in each system and the interference of the agroforestry and conventional management system on the physical-chemical characteristics and chromatic parameters of coffee. The results showed that some physical attributes of the soil are more affected according to the management system used, such as saturated hydraulic conductivity (Ksat), which was higher in the agroforestry system compared to the conventional system, as well as humidity (U_{RP}). The soil temperature was higher for the conventional system, as was its thermal amplitude. It was also possible to identify differences between the sensory attributes of coffees which, despite being the same variety and grown in the same soil class, in nearby areas ($\cong 100$ m), had different evaluations, being different in the management system used in coffee cultivation.

Keywords: Soil temperature. Soil porosity. Sensory attributes. Bioactives. Coffee.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Brasil, estados produtores de café, destacando Minas Gerais, estado com maior produção de café em 2022.....	19
Figura 2 - Produção comercial de café arábica no estado de Pernambuco, com destaque da região do Agreste Meridional.....	19
Figura 3 - Fluxograma metodológico	25
Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo em Miracica - Garanhuns, PE.....	26
Figura 5 - Demarcação das subáreas experimentais, com detalhes para a definição dos limites das áreas de bordadura e útil, com esboço da disposição dos pontos de coleta ..	27
Figura 6 - Procedimentos de coleta dos solos: A) em blocos (estrutura preservada); B) blocos empacotados com plástico filme, devidamente identificados; C) acondicionamento dos blocos em caixas de isopor para o transporte até o laboratório (LaFiS)	28
Figura 7 - Aspectos dos agregados obtidos, via peneiramento a seco, para os ensaios: A) índices de estabilidade de agregados; B) resistência tênsil dos agregados	28
Figura 8 - Amostras coletadas via cilindros volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$), com estrutura preservada: A) acondicionamento das amostras em plásticos filme e bolha, para o transporte ao laboratório; B) preparação das amostras para os ensaios em laboratório após toalete e fixação do pano e liga.....	29
Figura 9 - Processo de dispersão das amostras: A) agitação em equipamento do tipo Wagner; B) provetas contendo a suspensão do solo nos ensaios de granulometria dos solos.....	30
Figura 10 - Penetrômetro de bancada utilizado nos ensaios para determinação da resistência tênsil dos agregados de solos em laboratório, onde: A) célula de carga; B) ponto de ruptura do agregado; C) sistema computacional de registro do momento da ruptura do agregado ($F_{\text{máx}}$)	31
Figura 11 - Equipamento utilizado para os ensaios da distribuição dos tamanhos de agregados do solo: A) mesa para peneiramento por via úmida; B) conjuntos de peneiras, cada um com cinco unidades; C) início do processo de desagregação com a amostra no topo do conjunto	32
Figura 12 - Mesa de tensão com a distribuição espacial das amostras de solo em cilindros volumétricos, utilizada para aplicar e equilibrar o potencial mátrico(ϕ_m), via coluna de água	33

Figura 13 - Permeâmetro de Guelph utilizado para ensaios de condutividade hidráulica saturada dos solos (Ksat) em campo.....	34
Figura 14 - Penetrômetro de campo utilizado nos ensaios <i>in situ</i> para determinação da resistência do solo à penetração de raízes.....	36
Figura 15 - Medição da temperatura do solo em áreas de cultivo de café: A) sombreado; B) em pleno sol; C) dinâmica da coleta de dados	38
Figura 16 - Procedimentos para obtenção do fruto sem casca (grão cru): A) descascador de café manual; B) café em casca “cereja” seca; C) separação do café em grão cru.....	39
Figura 17 - Processo de torra do café em grão cru: A) torrador elétrico stratto®; B) detalhe do funil que leva os grãos para o aquecedor; C) coleta dos grãos após a torra....	40
Figura 18 - Aspectos dos grãos: A) café verde (grão cru); e B) café torrado	40
Figura 19 - Moedor Hamilton Beach Burr Coffee Grinder (A), com detalhe do café torrado (B), e moído para a extração.....	41
Figura 20 - Procedimento de agitação magnética e extração do café para realização das análises físico-químicas.....	41
Figura 21 - Realização da análise sensorial com consumidores realizado na Cozinha Show do Laboratório de Gastronomia da UFRPE.....	44
Figura 22 - Variação diurna da temperatura do solo na profundidade de 0,05 m nos dois sistemas de manejo da cultura do café.....	53
Figura 23 - Contribuição das variáveis e distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo de área de cafezal com plantio a pleno sol e sombreado, em duas dimensões no sistema de coordenadas definido pela primeira e segunda componente principal	55
Figura 24 - Atividade antioxidante de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial.....	57
Figura 25 - Contribuição das variáveis e distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo de área de cafezal com plantio convencional a pleno sol e sombreado, em duas dimensões no sistema de coordenadas definido pela primeira e segunda componente principal	59
Figura 26 - Análise dos componentes principais, na qual os pontos em vermelho ilustram os atributos e os pontos em azul as amostras, sendo 257 (Café sombreado), 496 (Café comercial) e 831 (Café a pleno sol)	62

Figura 27 - Correlação entre atributos e grau de aceitação (Ace) entre consumidores não treinados..... 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas do Permeâmetro Guelph - equipamento MS130.....	35
Tabela 2 - Especificações do penetrômetro utilizado nos ensaios de campo	36
Tabela 3 - Frações granulométricas, classificação textural e densidades para os solos estudados sob o cultivo do café.....	45
Tabela 4 - Caracterização química do Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café.....	46
Tabela 5 - Complexo sortivo do solo e fósforo disponível em um Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café	47
Tabela 6 - Saturação por cálcio, magnésio e potássio nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café.....	48
Tabela 7 - Porosidade total, distribuição de tamanho de poros e condutividade hidráulica (Ksat) em amostras do Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café	49
Tabela 8 - Resistência do solo à penetração de raízes, resistência tênsil de agregados e umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados para o Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café	51
Tabela 9 - Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice geral de estabilidade de agregados dos solos estudados sob o cultivo do café	51
Tabela 10 - Carbono orgânico total (COT), Matéria orgânica (MO) e Estoque de carbono (Est.C) em amostras do Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café	52
Tabela 11 - Parâmetros clássicos de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial.....	56
Tabela 12 - Classes de compostos fenólicos de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial.....	57
Tabela 13 - Parâmetros cromáticos pelo sistema CIELab de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial	58
Tabela 14 - Compostos bioativos de grãos torrados e moídos de café arábica cv. Catuaí vermelho cultivados a pleno sol e sombreado	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Hipóteses	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. A cafeicultura no Brasil e em Pernambuco	18
2.2. Cultivo e sistemas de manejo do café	20
2.3. Atributos físicos e químicos de qualidade estrutural do solo	21
2.4. Qualidade estrutural do solo e sua relação com a qualidade do café	22
2.5. Estabilidade estrutural do solo	23
2.6. O carbono como componente chave na qualidade do solo	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Área experimental e sua caracterização	26
3.2. Procedimentos de coleta dos solos e pré-tratamentos	27
3.3. Ensaio para determinação dos atributos físicos dos solos	29
3.3.1. Densidade de partículas sólidas do solo (Dp).....	29
3.3.2. Frações granulométricas dos solos	30
3.3.3. Resistência tênsil dos agregados dos solos (RT)	30
3.3.4. Índices de estabilidade de agregados dos solos	31
3.3.5. Porosidade do solo total (Pt) e sua distribuição por tamanho de poros (DTP).....	33
3.3.6. Densidade do solo (Ds).....	34
3.3.7. Condutividade hidráulica dos solos (Ksat) in situ	34
3.3.8. Resistência do solo à penetração de raízes (RP) in situ.....	35
3.3.9. Carbono orgânico total, matéria orgânica no solo e estoque de carbono	37
3.4. Temperatura do solo.....	37

3.5. Caracterização química dos solos	38
3.6. Variáveis físico-químicas e avaliação sensorial do café arábica	39
3.6.1. Obtenção das amostras de café.....	39
3.6.2. Extração das amostras e análises físico-químicas	41
3.6.3. Análises sensoriais	43
3.6.3.1. Preparação das amostras.....	43
3.6.3.2. Método de Rede	43
3.6.3.3. Método CATA (Check-all-that-apply).....	43
3.7. Análise estatística	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Caracterização física dos solos	44
4.2. Caracterização química dos solos	46
4.3. Atributos físicos dos solos	49
4.3.1. Porosidade total do solo (Pt) e sua distribuição em tamanho de poros (DTP) e condutividade hidráulica dos solos (Ksat)	49
4.3.2. Resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados do solo (RT) e umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados da RP (URP)	50
4.3.3. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice geral de estabilidade dos agregados (IGEA)	51
4.3.4. Carbono como componente chave na qualidade estrutural do solo	52
4.3.5. Temperatura do solo.....	53
4.4 Análise multivariada para caracterização dos tipos de solo.....	54
4.5. Caracterização química, cromática e sensorial do café	56
4.5.1. Parâmetros químicos	56
4.5.2. Parâmetros cromáticos	58
4.5.3. Análise multivariada para caracterização físico-química e cromática do café	58
4.5.4. Perfil de compostos bioativos do café.....	60
4.5.5. Caracterização sensorial do café	61

5. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICES.....	77
APÊNDICE A - Glossário dos termos descritores da Ficha do CATA	77
APÊNDICE B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido	78
APÊNDICE C - Ficha de avaliação do CATA (Check-All-That-Apply).....	80

1. INTRODUÇÃO

O café é a segunda bebida mais consumida no Brasil, ficando atrás apenas da água, de acordo com a Associação brasileira da indústria de café (ABIC). A cultura do café é um elemento essencial da história e economia brasileiras. O Brasil é o maior produtor de café do mundo com cerca de 35% da produção mundial (CONAB, 2023) e a cultura do grão é disseminada em diversas regiões do país. Em Pernambuco, o café é produzido na região do Agreste, principalmente nos brejos de altitude, onde a cultura do cafeeiro encontra condições favoráveis para se desenvolver, semelhantes ao seu centro de origem na Etiópia. A cultura do café em Pernambuco tem importância econômica e também social, em função do grande número de agricultores familiares que atuam na cadeia produtiva, gerando empregos e renda.

O sistema de cultivo do café exerce influência nas características sensoriais da bebida e no perfil de bioativos presentes. O cultivo convencional, caracterizado por monoculturas e uso intensivo de defensivos agrícolas e fertilizantes, pode levar a um café com sabor mais uniforme e menos complexo, com menor diversidade de bioativos. Já o sistema agroflorestal, que integra árvores de sombra e outras culturas, promove um microclima mais estável, maior biodiversidade e menor erosão do solo. Essa diversidade ambiental estimula a produção de cafés com perfis sensoriais mais complexos, com maior variedade de aromas e sabores, como acidez mais brilhante, doçura mais pronunciada e amargor equilibrado. Além disso, o café cultivado em sistemas agroflorestais tende a apresentar maior concentração de compostos fenólicos e antioxidantes, que conferem benefícios à saúde humana.

Entretanto, a produção agrícola, não somente do café, mas para toda agricultura, tanto para o grande produtor rural como para aqueles que trabalham na agricultura familiar, depende da qualidade do solo. Esta é frequentemente quantificada por meio de seus atributos, com destaque para os físicos, químicos e biológicos. Entre os atributos físicos mais usados para esta avaliação estão aqueles relacionados ao arrançamento das partículas sólidas do solo e espaço poroso, associados portanto à estrutura do solo. Deste modo, estes atributos influenciam a dinâmica da água no solo (retenção e drenagem), bem como a densidade do solo, a penetração das raízes e a resistência à erosão. Assim, dos atributos que têm seus resultados dependentes da estrutura do solo, destacam-se: densidade do solo (Ds); porosidade total (Pt) e distribuição de tamanho de poros (DTP); condutividade hidráulica saturada (Ksat); resistência tênsil de agregados (RT); resistência do solo à penetração de raízes (RP); e os índices de estabilidade de agregados (IEA).

Diferentes tipos de manejo são empregados na cultura do café, sendo os mais comuns o convencional e o agroflorestal. O manejo convencional é um método que visa à maximização da produção e ao controle de pragas e doenças. No entanto, seu uso pode ter impactos negativos no meio ambiente, na saúde humana e no sabor do café. Além disso, produtos químicos podem acumular-se no solo, afetando sua estrutura física, química e biológica. Isso pode causar a perda da funcionalidade do solo e a consequente diminuição da qualidade dos alimentos produzidos.

Por outro lado, o manejo agroflorestal é um método mais sustentável que busca integrar a produção de café com a conservação do meio ambiente. Nesse método, o café é cultivado em sistemas que combinam a produção do café com outras culturas, árvores e plantas nativas. Esse manejo, além de contribuir para a conservação do meio ambiente, também pode agregar valor ao produto final, uma vez que o café produzido em sistemas agroflorestais pode ter um sabor mais complexo e sofisticado. A adoção do manejo agroflorestal pode ser uma estratégia importante para garantir a sustentabilidade da produção de café, pois promove a recuperação e manutenção da saúde do solo e utiliza práticas que visam a conservação do solo e dos recursos hídricos, como o uso de adubos orgânicos e a cobertura vegetal permanente. Ademais, a diversificação de culturas e espécies vegetais também contribui para a manutenção da fertilidade e da estrutura do solo, além de aumentar a biodiversidade, resultando em um solo mais saudável e rico em nutrientes, o que favorece o desenvolvimento das plantas.

Ainda em relação aos sistemas convencional e agroflorestal, cada um apresenta suas vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas na escolha do método a ser adotado pelo produtor. Dentre as vantagens do sistema convencional, destacam-se: a maior produtividade por hectare; o menor custo de produção; e a possibilidade de atender à demanda do mercado em grande escala. No entanto, este sistema apresenta desvantagens significativas, como o impacto ambiental decorrente da utilização de agrotóxicos e fertilizantes químicos, a contaminação do solo e dos recursos hídricos, como também a redução da biodiversidade.

Já o sistema agroflorestal busca a prevenção e o controle biológico de pragas e doenças. Além destas vantagens, destacam-se: a maior diversidade de culturas e espécies vegetais; a recuperação do solo, a maior complexidade de aromas e sabores do café; e a redução do impacto ambiental. No entanto, o sistema agroflorestal apresenta desvantagens, como a menor produtividade por hectare, o maior custo de produção, a dificuldade de escala de produção e a maior complexidade na gestão da propriedade.

A escolha entre um desses dois sistemas deve levar em consideração diversos fatores, como as condições climáticas e do solo da região, a disponibilidade de mão de obra e os objetivos do produtor. No entanto, é importante destacar que atualmente há uma valorização do

sistema agroflorestral, devido aos seus benefícios ambientais e à crescente demanda por produtos mais sustentáveis a longo prazo e de melhor qualidade. É importante ressaltar que a qualidade do café é influenciada por diversos fatores, como variedade, altitude, processamento e torra. No entanto, o sistema de cultivo desempenha um papel fundamental na definição das características sensoriais e nutricionais da bebida.

Atualmente os manejos agroflorestrais abrangem áreas cada vez maiores; contudo, há falta de informação sobre a sustentabilidade efetiva dessa forma de cultivo, crescendo assim a necessidade de pesquisas que identifiquem as modificações dos atributos físicos de solos em função dos manejos adotados no cultivo do café arábica, indicando qual dos atributos é mais sensível para diagnosticar a condição estrutural do solo. Essas informações poderão gerar e socializar tecnologias para os agricultores familiares, utilizando indicadores físicos mais adequados para escolha certa do manejo do cafezal em regiões carentes de referências no tema.

1.1. Hipóteses

- O tipo de manejo, convencional e agroflorestral, altera a qualidade estrutural dos solos sob cultivo do cafeeiro.
- Os atributos físicos e químicos dos solos têm influência na qualidade do café produzido.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar as alterações na qualidade estrutural dos solos sob cultivo do cafeeiro em duas condições de manejo: convencional e agroflorestral em Miracica – Zona rural de Garanhuns, Pernambuco – Brasil.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar os atributos físicos e químicos para a caracterização dos solos das áreas sob cultivo de café arábica no Agreste Meridional de Pernambuco;
- Identificar qual atributo físico é mais sensível para avaliar a qualidade estrutural do solo sob os manejos avaliados;
- Identificar o melhor sistema de cultivo, agroflorestral ou convencional, para o café arábica de Miracica-PE.

- Avaliar a interferência do sistema do cultivo agroflorestal e convencional sobre as características físico-químicas, parâmetros cromáticos e atributos sensoriais do café oriundo do Agreste Meridional de Pernambuco.

2. REVISÃO DE LITERATURA

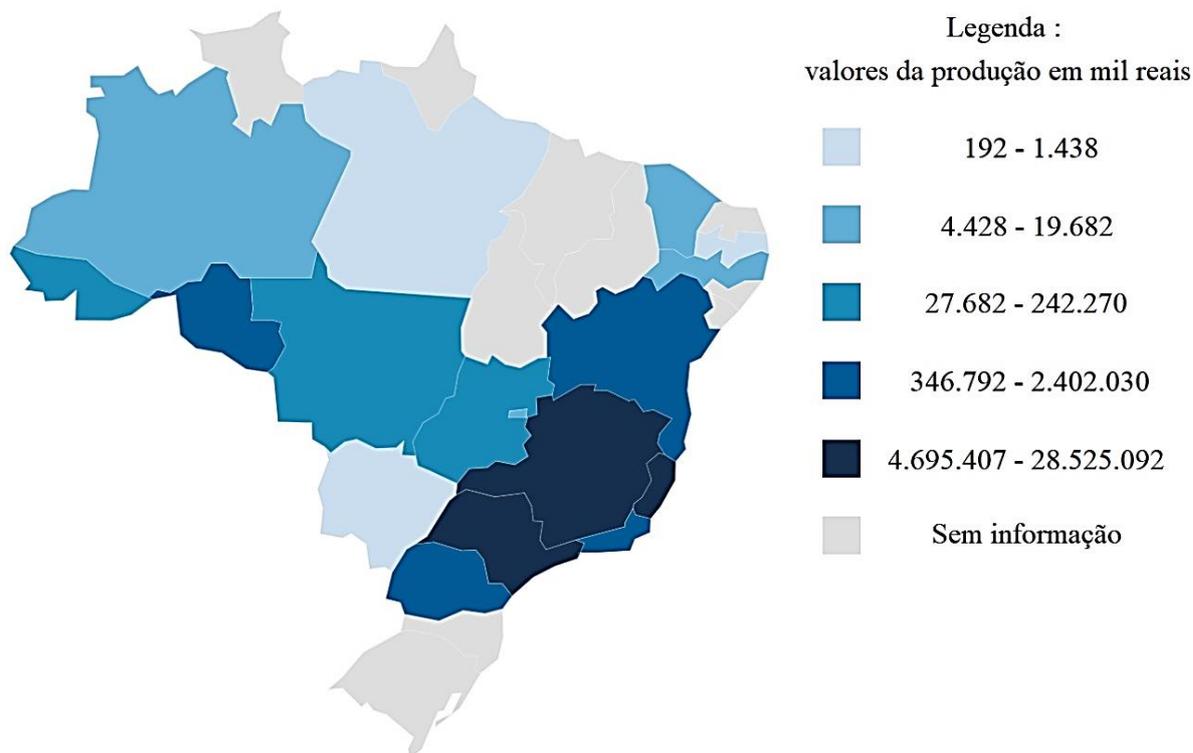
2.1. A cafeicultura no Brasil e em Pernambuco

O café arábica possui grande destaque comercial, e teve sua origem principal no sudoeste da Etiópia, mas também é encontrado no Planalto de Boma, no Sudão do Sul, e no Monte Marsabit, no Quênia. O café chegou à Europa por meio das rotas de comércio, posteriormente foi levado para a América do Sul, mais precisamente para o Suriname, em 1718. A partir daí o café foi introduzido em outras regiões da América do Sul, como a ilha de Martinica em 1720 ou 1723, e posteriormente no Brasil via Guiana Francesa em 1727 (MARTINS, 2020; FARAH, 2019). A introdução do café em nosso país ocorreu pelo Estado do Pará em 1727, iniciando seu cultivo na Região Norte, nas proximidades de Belém do Pará. A cafeicultura gradualmente se deslocou em direção ao Nordeste, percorrendo os estados do Maranhão, Ceará, Pernambuco e Bahia, até atingir o Rio de Janeiro em 1773 (MARTINS, 2020; IAC, 2007). A sua expansão continuou pela Serra do Mar, alcançando o Vale do Paraíba em 1825 e, posteriormente, os estados de São Paulo e Minas Gerais, onde encontrou condições propícias para seu desenvolvimento (MARTINS, 2020; IAC, 2007).

A produção global de café na safra 2023/24 está prevista em 174,3 milhões de sacas de 60 kg, o que representa uma alta de 2,5% na comparação com a safra anterior. Brasil, Vietnã e Colômbia mantém liderança no quesito, exportadores de café (IBGE, 2022; CONAB, 2023). O Brasil se destaca como o maior produtor dessa *commodity* há mais de 150 anos (ABIC, 2021), com produção comercial em todas as regiões. Segundo a CONAB (2023), no ano de 2023, a área cultivada no país com café totalizou 2,24 milhões de hectares e uma produção de 55,1 milhões de sacas de café beneficiado, e essa cifra depende de muito fatores, como o manejo apropriado da cultura.

O Brasil conta com várias regiões na produção de café, um total de 17 estados que atuam no mercado cafeeiro. De acordo o IBGE (2022), o estado de Minas Gerais destacou-se como o maior produtor de café (Figura 1). A cafeicultura brasileira abarca aproximadamente cerca de 300 mil unidades de produção, das quais 82% são consideradas fazendas de café familiares.

Figura 1 - Mapa do Brasil, estados produtores de café, destacando Minas Gerais, estado com maior produção de café em 2022



Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

No estado de Pernambuco a cultura do café tem sua principal concentração nos municípios do agreste pernambucano (Figura 2), especialmente em Taquaritinga do Norte, Garanhuns e Brejão, segundo a BSCA - Brazil Specialty Coffee Association (2023). Esse foco é devido às condições climáticas e altitudes favoráveis, sendo a espécie arábica predominante.

Figura 2 - Produção comercial de café arábica no estado de Pernambuco, com destaque da região do Agreste Meridional



Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

Essa região é responsável por aproximadamente 92% do cultivo de café no estado. Além disso, existem registros, de acordo com IBGE (2022), de cultivo também em Triunfo, Exu, Santa Cruz da Baixa Verde e Moreilândia. Nesse contexto, o cultivo de cafés está ganhando crescente força entre os produtores, pois os mesmos almejam conferir maior valor ao grão produzido.

2.2. Cultivo e sistemas de manejo do café

O contundente processo modernizador da agricultura brasileira gera impactos ambientais e transformações sociais, em magnitudes tão amplas que justificam os estudos na busca de soluções mais naturais de cultivo (THEODORO et al., 2009).

No cultivo de *Coffea sp.* é mais comum o manejo convencional, com utilização de tecnologias para aumentar a produtividade a curto prazo. Entretanto, o uso inadequado das tecnologias agrícolas, como defensivos e fertilizantes, tem ocasionado degradação do solo e do ambiente (CARNEIRO et al., 2009). Trata-se de um processo decorrente da manipulação intensiva, quando o solo perde sua porosidade pelo adensamento de suas partículas, gerando assim a compactação do solo, que se dá, em grande parte, pela presença de máquinas agrícolas, tais como tratores e colhedoras.

Por outro lado, o manejo agroflorestal favorece a colonização das plantas por fungos micorrízicos arbusculares, promovendo maior sustentabilidade do agroecossistema cafeeiro (SAGGIN JÚNIOR; SIQUEIRA, 1995). Esses fungos desempenham papel fundamental na formação e manutenção dos agregados do solo (RILLIG, 2004). No ambiente agroflorestal a produção se dá de forma sintrópica, pois a matéria orgânica ao solo, que favorece a sua bioestrutura, aumenta a “saúde” do solo e do vegetal, não somente porque melhora a estrutura grumosa, mas por também contribuir com a diversificação da micro vida e fauna da terra (PRIMAVESI, 2006).

O cultivo de cafezais em sistemas agroflorestais (SAF's) é uma alternativa na construção de um sistema de produção sustentável para agricultores familiares, residentes nas áreas tradicionalmente produtoras de café. Nesse sentido, Alfaro-Villatoro (2004) destaca que o sombreamento é um dos mais importantes efeitos da arborização, por afetar diretamente a interceptação da radiação solar e a eficiência fotossintética e respiratória dos cafeeiros. Além disso, a produção de café em manejo agroflorestal é um retorno às origens da planta. Dean (1997) mostra que os primeiros cafeeiros desprezaram as características do *habitat* de origem do cafeeiro e, ao invés de adotar o sombreamento dos plantios e tentar melhorar sua qualidade, optaram pela expansão da monocultura, a exemplo da cana-de-açúcar, visando à

quantidade produzida e não a qualidade. Contudo, segundo Khatounian (2001), não se deve considerar apenas a produção máxima, mas também outros aspectos desejáveis no cultivo, tais como: sanidade; longevidade; atenuação da bienalidade e a prevenção contra morte por esgotamento; além da meia-sombra, assim como em sua região de origem.

No manejo agroflorestal existe a preocupação em conservar a fertilidade do solo para o crescimento de plantas saudáveis, bem como para a sustentação de agricultura permanente. A natureza é respeitada como geradora da produção agrícola e a ação antrópica se limita a ajustes que corrijam eventuais perturbações (SALGADO, 2006). Embora algumas pesquisas apontem que o manejo do café agroflorestal promove maior alteração nos atributos químicos do solo em relação ao convencional, com aumento no pH, capacidade de troca de cátions, saturação de bases, e redução do alumínio trocável (THEODORO et al., 2003), poucos são os trabalhos que avaliam o impacto desses manejos nos atributos físicos do solo.

2.3. Atributos físicos e químicos de qualidade estrutural do solo

Na caracterização do solo se avalia as três fases, determinando-se a composição da matriz sólida e do conteúdo dos poros. Em relação à matriz sólida, têm-se como variáveis: a distribuição do tamanho dos sólidos (frações granulométricas); o formato dos sólidos; a natureza (minerais, componentes orgânicos) e o arranjo (estruturação) de seus componentes. Quanto ao conteúdo dos poros, pode-se fazer a separação entre líquido (água) e gás (ar), ou, em maior detalhe, determinar a composição da solução do solo e da fase gasosa (VAN LIER, 2020).

O solo é um dos principais recursos naturais utilizados na agricultura, sendo fundamental para o cultivo de diferentes culturas, incluindo o café. No entanto, a forma como o solo é manejado pode impactar significativamente os atributos físicos do solo, o que pode afetar a produtividade da cultura. Neste contexto, o manejo agroflorestal gera mais qualidade do solo e pode apresentar benefícios em relação ao manejo convencional. Karlen et al. (1997) definiram a qualidade do solo como a sua capacidade de sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e dar suporte para habitação e saúde humana. Manter o bom funcionamento de todas essas funções é bastante expressivo para o equilíbrio e sustentabilidade do solo.

No manejo agroflorestal, o solo é cultivado de forma mais integrada com a vegetação natural, com a presença de árvores e outras plantas que contribuem para a melhoria da qualidade do solo. Esse tipo de manejo contribui com o aumento da matéria orgânica, redução da erosão e a melhoria da infiltração de água no solo. Além disso, a presença de árvores pode ajudar a proteger a cultura do café contra a radiação solar excessiva e a manter uma boa temperatura e

umidade no solo (MELLONI, 2018). Por outro lado, o manejo convencional tende a ser mais intensivo com o uso de máquinas agrícolas de grande porte e pode envolver o uso de práticas que podem afetar negativamente os atributos físicos do solo. A monocultura, neste sentido, pode levar à compactação do solo.

Segundo Jácome et al. (2020), o manejo agroflorestal pode apresentar vantagens em relação ao manejo convencional no que diz respeito aos atributos físicos do solo em áreas de cultivo de café. Estes autores apontaram que o manejo agroflorestal promoveu maior porosidade e menor densidade do solo, além de maior capacidade de retenção de água em relação ao manejo convencional. O manejo agroflorestal promoveu maior diversidade biológica do solo, maior teor de matéria orgânica e maior estabilidade de agregados do solo em relação ao manejo convencional (JÁCOME et al., 2020).

2.4. Qualidade estrutural do solo e sua relação com a qualidade do café

Os atributos físicos do solo são fatores fundamentais que influenciam diretamente a qualidade do café produzido. A textura, estrutura, porosidade, densidade e a permeabilidade do solo são alguns dos atributos físicos que impactam significativamente a qualidade do café (PAIS, 2011).

Segundo Yadessa et al. (2020), estudos revelaram que houve relações significativas entre as propriedades do solo e as características de qualidade do café. A qualidade da xícara do café arábica silvestre foi consideravelmente influenciada pelas propriedades do solo, especialmente pelo fósforo disponível (relação positiva) e textura do solo (relação positiva com partículas finas, mas negativa com a areia). Isso significa que níveis mais altos de fósforo disponível no solo e argila ou silte foram associados a uma melhor qualidade da xícara.

A estrutura do solo está relacionada com a organização das partículas do solo e sua agregação. Solos com boa estrutura permitem uma boa aeração e um bom desenvolvimento das raízes do café, o que resulta em um café de melhor qualidade. Por outro lado, solos com estrutura degradada podem resultar em menor produtividade (ANDRADE et al., 2018), refletindo em café de qualidade inferior.

A porosidade do solo está relacionada com a presença de espaços vazios no solo. Solos porosos permitem boa circulação de ar e água no solo, o que é fundamental para o desenvolvimento saudável das raízes (CARVALHO, 2012). Segundo Silva et al. (2021), as operações de manejo do solo alteram a porosidade do solo, afetando a infiltração, redistribuição, armazenamento, disponibilidade e absorção da água pelas plantas. Em Nunes et al. (2020), os cafeeiros sombreados por *Hevea brasiliensis* em manejo agroflorestal, apresentaram menos

efeitos antrópicos e menores valores de resistência do solo à penetração das raízes (RP) quando comparado com o café aberto no manejo convencional. Neste caso, a distribuição das raízes do cafeeiro foi um indicador eficaz da qualidade do solo. Os autores também observaram que as raízes do café se distribuíram equilibradamente ao longo do perfil, entre 0 – 0,80 m para o manejo agroflorestal; enquanto que, no convencional, houve concentração das raízes na profundidade de 0 – 0,10 m.

Quando o conteúdo de água retido no solo é dependente da estrutura, distribuição dos poros, e da densidade do solo, os fenômenos capilares têm maior importância na dinâmica da água. Por outro lado, quando o conteúdo de água é baixo, e portanto retido em poros menores, a movimentação da água passa a ser influenciada pelos fenômenos de adsorção, e esta dependente da textura e da superfície específica das partículas minerais da fração argila (HILLEL, 1998; BEUTLER, 2002).

2.5. Estabilidade estrutural do solo

A estabilidade de agregados de solos pode ser definida como a resistência que a estrutura do solo oferece quando submetida a processos de estresse físico. Este índice é afetado de forma concreta por algumas das propriedades do solo, como matéria orgânica, textura, porosidade e temperatura; assim como, manejo do solo dentro do cultivo escolhido, decomposição da matéria orgânica e dispersão da argila, que funcionam como agentes cimentantes do solo (NABAVINIA et al., 2015; FARAHANI et al., 2018a, 2018b; FARAHANI et al., 2019).

Por outro lado, a estabilidade de agregados tem influência em algumas características do solo, como infiltração da água e atividade microbiana (DEXTER, 1985). Nesse sentido, a quebra ou enfraquecimento da estrutura do solo produz microagregados, com o colapso de alguns poros, reduzindo assim a capacidade de infiltração e aumentando a densidade do solo, tornando o ambiente mais propício a processos iniciais de erosão hídrica ou eólica do solo, intensificando sua degradação (COLAZO; BUSCHIAZZO, 2014).

O cultivo do solo pode acarretar redução nos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, influenciar reduções na estabilidade de agregados, com uma diminuição relativa na proporção de macroagregados e aumento dos microagregados, já que esses não são influenciados pelo manejo (TISDALL; OADES, 1982). Estudar a estabilidade de agregados é essencial, pois sua manutenção implica na diminuição do salpicamento de partículas, sendo também fundamental para manejo e cultivo do solo, tornando-se importante para a definição da qualidade do solo.

2.6. O carbono como componente chave na qualidade do solo

A matéria orgânica é um dos melhores indicadores de qualidade do solo, pois se relaciona com inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas. O carbono orgânico desempenha um papel central na melhoria desses atributos. Quando presente em níveis adequados, ele contribui para a formação de agregados estáveis, promovendo uma estrutura do solo mais favorável, como observado em Reichert (2003). Segundo este autor, do ponto de vista físico, a qualidade está associada àquele solo que: a) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; b) responde ao manejo e resiste à degradação; c) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; d) possibilita o crescimento das raízes.

O carbono (C) atua como o precursor de processos que controlam os atributos do solo e a sua redução afeta diretamente os atributos físicos e químicos, pois: a) reduz a agregação, porque o C é o principal agente de cimentação pelo fato dos compostos orgânicos possuírem cargas negativas e formarem ligações com as cargas positivas dos óxidos de Fe e Al e das argilas; b) as cargas negativas dos radicais carboxila formam pontes com o Ca^{2+} devido ao aumento da sua concentração pela calagem e gessagem; c) ocorre o aumento da densidade do solo devido a desagregação e dispersão das partículas de argila resultando no aumento da força de coesão entre as partículas de argila com a ação do Fe e Al; d) diminui a quantidade e o tamanho de macroporos em decorrência da diminuição da porcentagem de macroagregados; e) reduz a infiltração de água no solo e aumenta a resistência do solo à penetração das raízes; f) redução do pH; g) redução da CTC; h) redução da disponibilidade de nutrientes para as plantas (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2020).

A correlação entre o carbono orgânico e os atributos físicos do solo também desempenha um papel relevante na mitigação das mudanças climáticas. Solos ricos em carbono têm maior capacidade de sequestrar o dióxido de carbono atmosférico, reduzindo sua concentração na atmosfera e contribuindo para o equilíbrio do ciclo global do carbono (COELHO et al., 2013).

Para promover o aumento do teor de carbono orgânico no solo e, conseqüentemente, melhorar seus atributos físicos, práticas agrícolas sustentáveis devem ser adotadas. O uso de técnicas de manejo conservacionista, como rotação de culturas, mínimo revolvimento do solo, plantio direto, adição de matéria orgânica, cobertura permanente do solo e redução do uso de agroquímicos, promove a acumulação de carbono no solo ao longo do tempo. Segundo De Oliveira Ferreira et al. (2018), a adição frequente de matéria orgânica no solo contribui sobremaneira para a formação de macroagregados. Essas práticas contribuem para a melhoria

da estrutura do solo, aumento da porosidade, melhoria da infiltração de água e redução da resistência do solo à penetração de raízes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, a Figura 3 ilustra as etapas para geração dos dados, desde a seleção da área experimental, seguindo-se dos ensaios de determinação dos atributos dos solos para avaliação das alterações na sua qualidade estrutural, em função do cultivo do cafeeiro em duas condições de manejo (convencional e agroflorestal), bem como a caracterização do café quanto a seus aspectos físico-químicos, sensoriais e cromáticos.

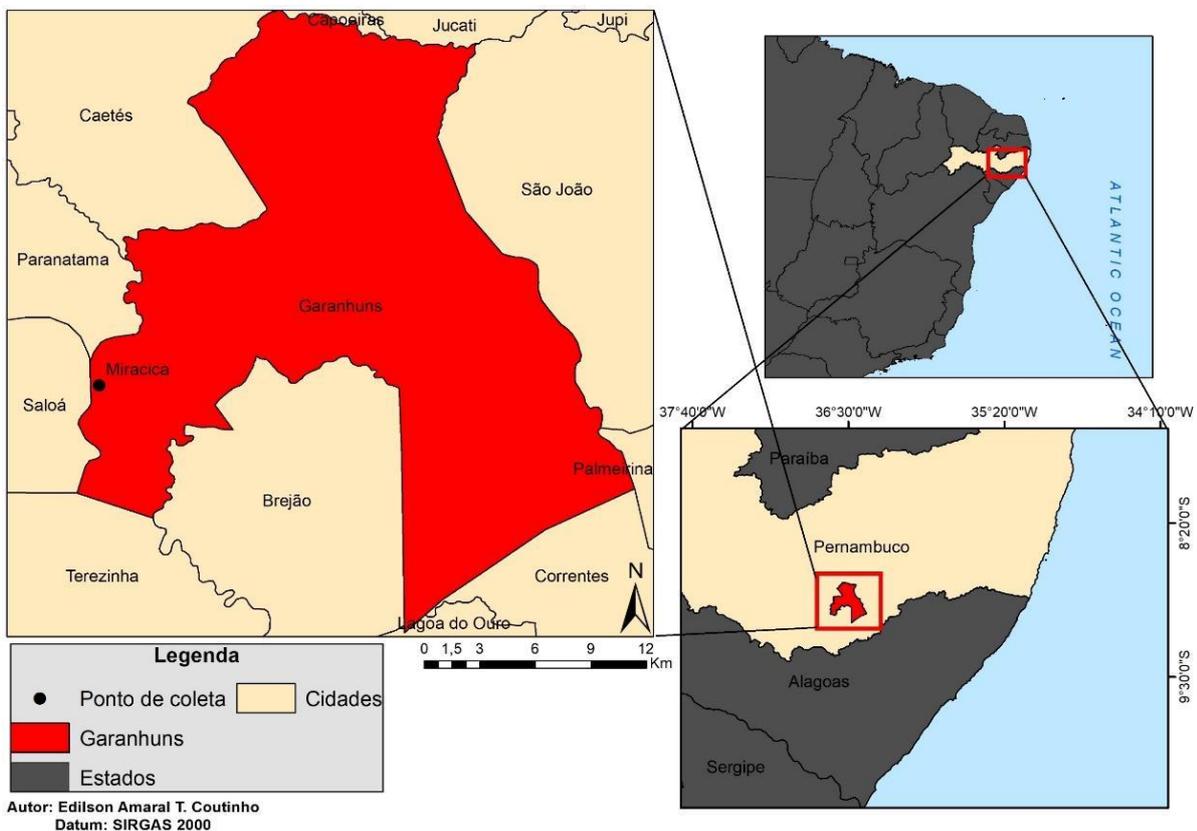
Figura 3 - Fluxograma metodológico



3.1. Área experimental e sua caracterização

A área experimental está situada no distrito rural de Miracica, pertencente ao município de Garanhuns (Figura 4), agreste de Pernambuco, latitude $08^{\circ}58'01''$ sul e longitude $36^{\circ}37'34''$ oeste, encontra-se a aproximadamente 840 metros de altitude sobre o nível médio do mar. O clima é classificado como tropical com estação seca, com verão seco e inverno úmido, do tipo As na classificação climática de Köppen-Geiger (fronteiriço com o clima mediterrâneo, tipo Csa), com temperaturas amenas e mais baixas que na maior parte do ano, em função da altitude. A temperatura média compensada anual é de 21°C , chegando a 15°C ou até menos nos meses mais frios, época que também é tradicionalmente a mais chuvosa do ano.

Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo em Miracica - Garanhuns, PE



Fonte: Edilson Amaral Tavares Coutinho (2024).

O índice pluviométrico é de cerca de 890 mm/ano, com umidade do ar relativamente alta durante o ano todo. O tempo médio de insolação é de 2 330 horas/ano, sendo maior entre outubro e dezembro (INMET, 2023). O solo foi classificado como Argissolo Amarelo, conforme SiBCS (EMBRAPA, 2018).

A área experimental, segundo informações do proprietário, mantinha mata nativa até 1990 quando esta foi derrubada e realizado plantio de cajueiros. Em 1995 foi adquirida por outra família que manteve os cajueiros e realizou o plantio do cafezal sob a sombra das árvores,

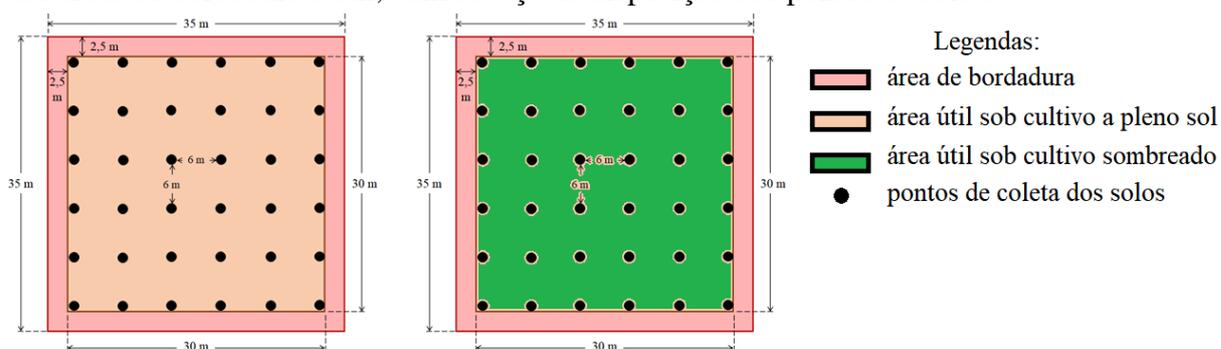
produzindo café por cerca de 20 anos, quando houve uma grande seca nos anos 2015 e 2016 que prejudicou muito a lavoura de café, ficando praticamente abandonada por 5 anos. Em 2020 o terreno foi adquirido pelo atual produtor há quatro anos que realizou a chamada “recepta” do cafeeiro. A recepta consiste em uma poda baixa e mais drástica aplicada em plantas que perderam os ramos produtivos inferiores que formam a saia da planta, ou em plantas totalmente depauperadas ou deformadas. Pode ser aplicada com o corte da planta a uma altura média de 30 cm a 40 cm do solo e, assim a brotação ortotrópica, que vai surgir, será responsável por formar uma nova copa da planta podada (EMBRAPA, 2020). A cultura não é irrigada e a adubação é feita com esterco bovino e “cama de galinha” composta por casca de arroz, fezes e restos de ração das aves, aplicados anualmente na medida de 6 Mg ha⁻¹.

3.2. Procedimentos de coleta dos solos e pré-tratamentos

Nas duas subáreas experimentais: uma agroflorestal, que chamaremos de sombreado; e a outra convencional, denominada de pleno sol, foram abertos dois perfis (um em cada sistema) para as descrições morfológicas dos solos, realizadas de acordo com Santos et al. (2015).

Em cada área avaliada foi delineado um grid com dimensões de 35 × 35 m, que após definição da área de bordadura, demarcou-se a área útil (30 × 30 m), com intervalos de 6 m entre os pontos de coleta, perfazendo um total de 36 pontos por subárea (Figura 5).

Figura 5 - Demarcação das subáreas experimentais, com detalhes para a definição dos limites das áreas de bordadura e útil, com esboço da disposição dos pontos de coleta



Fonte: Brivaldo Gomes de Almeida (2024).

Na sequência, as amostras dos solos foram coletadas nos respectivos pontos, a partir de blocos (Figura 6), com estrutura preservada, nas dimensões $\cong 20 \times 20 \times 20$ cm, seguindo as recomendações preconizadas em Marcelo et al. (2016). No Laboratório de Física do Solo (LAFIS) da UFRPE, os blocos foram saturados e submetidos à drenagem natural em temperatura ambiente (25 °C) até atingirem a capacidade de campo.

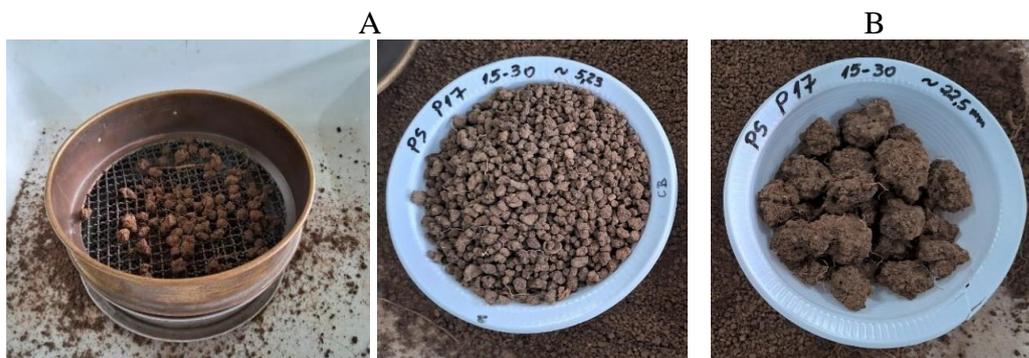
Figura 6 - Procedimentos de coleta dos solos: A) em blocos (estrutura preservada); B) blocos empacotados com plástico filme, devidamente identificados; C) acondicionamento dos blocos em caixas de isopor para o transporte até o laboratório (LaFiS)



Fonte: arquivo pessoal Paulo Marques.

Em seguida, os blocos foram separados, manualmente, em agregados com diâmetro médio de 5,23 mm (Figura 7A), utilizando neste processo um conjunto de peneiras com malhas de abertura medindo 7,10 e 3,35 mm. Estes agregados foram reservados para os ensaios de determinação dos índices de estabilidade de agregados (IEA). Já para os ensaios de determinação da resistência tênsil de agregados dos solos (RT), foram utilizados agregados com diâmetro médio de 22,5 mm (Figura 7B), confeccionados a partir da tamisação via seca, utilizando um conjunto de peneira com abertura de malhas medindo 25 e 20 mm.

Figura 7 - Aspectos dos agregados obtidos, via peneiramento a seco, para os ensaios: A) índices de estabilidade de agregados; B) resistência tênsil dos agregados



Fonte: arquivo pessoal Paulo Marques.

As demais amostras, também foram coletadas com estrutura preservada, mas obtidas a partir da inserção de cilindros volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$) ao solo, sendo estas destinadas aos ensaios da porosidade total e sua distribuição em classes de tamanho de poros (macro, meso e microporos), além da densidade do solo (Figura 8).

Figura 8 - Amostras coletadas via cilindros volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$), com estrutura preservada: A) acondicionamento das amostras em plásticos filme e bolha, para o transporte ao laboratório; B) preparação das amostras para os ensaios em laboratório após toailete e fixação do pano e liga



Fonte: arquivo pessoal Paulo Marques.

Para o transporte dessas amostras ao laboratório, cada conjunto amostra-cilindro foi envolvido em plásticos, primeiro do tipo filme e depois em bolha (Figura 8A), colocados em caixas de isopor, protegendo-os assim de possíveis perturbações. Em laboratório, os conjuntos amostra-cilindro tiveram suas extremidades ajustadas (com faca de lâmina reta), fazendo os desbastes, de modo que o tarugo de solo ficasse com o mesmo volume interno do cilindro. Em seguida, foi fixado um pano à base do conjunto, utilizando uma liga de borracha (Figura 8B).

Para os ensaios que não exigem a manutenção da estrutura dos solos, as coletas das amostras foram realizadas na forma desestruturada, com auxílio de pá, trado (tipo holandês, para solos argilosos; ou caneco, para os arenosos), sendo destorroadas em local apropriado (galpão de solos do DEPA/UFRPE), secas ao ar e passadas em peneira com malhas de 2,0 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar - TFSA (FONTANA et al., 2017).

3.3. Ensaios para determinação dos atributos físicos dos solos

3.3.1. Densidade de partículas sólidas do solo (D_p)

O método de determinação da D_p visa medir a densidade média das partículas minerais e orgânicas na amostra de solo, refletindo sua composição média. A D_p está relacionada ao volume efetivamente ocupado por matéria sólida, desconsiderando o volume dos poros. Assim, foi utilizado o método do balão volumétrico (VIANA et al., 2017). A determinação envolve duas etapas: a obtenção da massa de sólidos da amostra por pesagem, após secagem em estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$), e a determinação de seu volume, pelo princípio de Arquimedes, via equação (1):

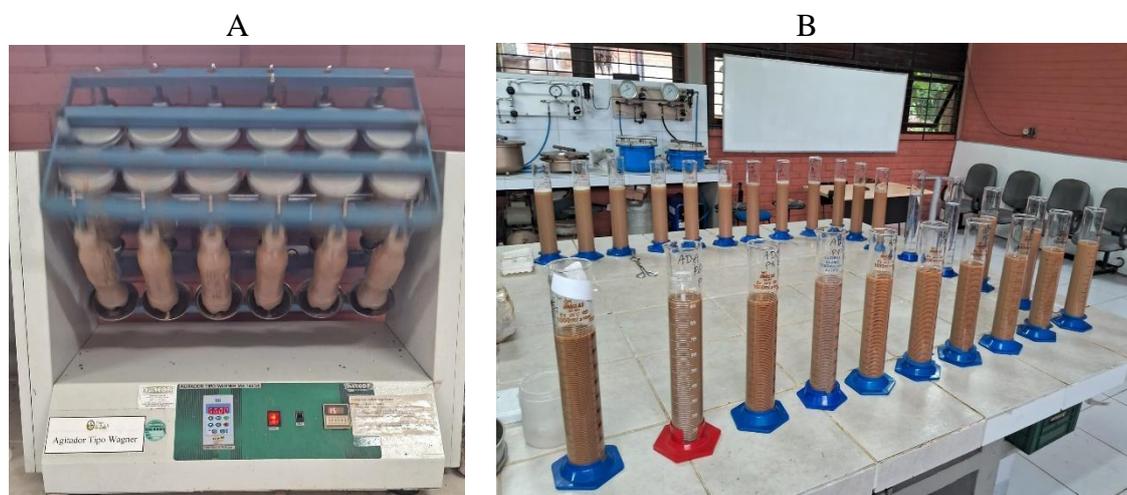
$$D_p = \frac{\text{Massa de sólidos}}{\text{Volume de sólido}} \quad (1)$$

Onde: D_p expressa em g cm^{-3} ; Massa de sólidos, em g; Volume de sólidos, em cm^3 .

3.3.2. Frações granulométricas dos solos

As frações granulométricas dos solos foram obtidas pelo método do densímetro, com as modificações recomendadas em Almeida (2008), brevemente descritas na sequência. Parte da TFSA foi pesada em 50 g e dispersa com solução de hexametáfosfato de sódio, tamponado com Calgon (Hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio), ficando a suspensão sob agitação (tipo Wagner) por 16h (Figura 9A), sendo então transferida para proveta de 1L (Figura 9B). Nesta, a suspensão foi aferida para 940 mL, agitada manualmente e, após 24 h de repouso, teve a concentração de argila total medida via leitura com hidrômetro (g argila total/ L de suspensão).

Figura 9 - Processo de dispersão das amostras: A) agitação em equipamento do tipo Wagner; B) provetas contendo a suspensão do solo nos ensaios de granulometria dos solos



Fonte: arquivo pessoal Paulo Marques.

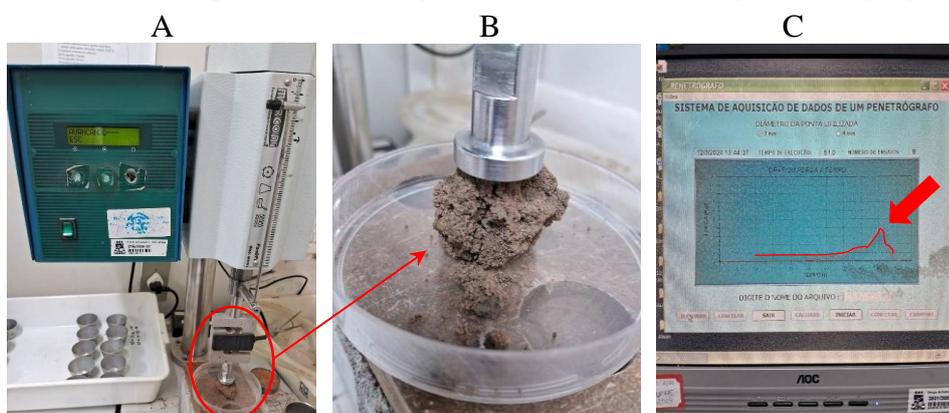
O restante da suspensão foi passado em peneira (malha 53 μm), lavada sob água corrente, pesando-se a areia total após secagem em estufa (105°C). O silte foi calculado por diferença: $\text{Silte (\%)} = 100 - (\text{areia total\%} + \text{argila total\%})$. Além da fração argila total (AT), foi obtida também a fração da argila dispersa em água – ADA (sem Calgon), calculando-se o grau de floculação (GF) das argilas: $\text{GF(\%)} = [(AT - ADA) / AT] \times 100$. Em todos os cálculos das frações granulométricas foi utilizado o fator f, determinado em outra parte da TFSA, destinado à correção da umidade.

3.3.3. Resistência tênsil dos agregados dos solos (RT)

Os ensaios para determinação da RT foram realizados nas amostras coletadas em blocos e separadas em agregados (Figura 7B). Estes tiveram seus tamanhos reduzidos, a partir de contínua quebra, buscando sempre as superfícies de fraquezas, até que passem em peneira com abertura de malha em 25,0 mm, sendo retidos em outra peneira com malha medindo 20,0 mm, conforme procedimentos descritos em Almeida et al. (2009). Nos ensaios de RT a força de

ruptura dos agregados foi obtida utilizando um penetrômetro de bancada, onde os dados gerados nos ensaios são registrados por sistema eletrônico de aquisição (Figura 10).

Figura 10 - Penetrômetro de bancada utilizado nos ensaios para determinação da resistência tênsil dos agregados de solos em laboratório, onde: A) célula de carga; B) ponto de ruptura do agregado; C) sistema computacional de registro do momento da ruptura do agregado ($F_{m\acute{a}x}$)



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

Os resultados da RT foram então obtidos por meio de cálculos utilizando a equação (2), conforme sugerido em Dexter; Kroesbergen (1985).

$$RT = 0,576 \left(\frac{F_{m\acute{a}x}}{Def^2} \right) \quad (2)$$

Onde: 0,576 é o valor da constante de proporcionalidade da relação entre a força compressiva aplicada e a resistência tênsil, gerada no interior do agregado; $F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada para ruptura do agregado (N), e Def é o diâmetro efetivo (mm), calculado usando o modelo proposto por Watts; Dexter (1998), por meio da equação (3).

$$Def = Dm \left(\frac{Mi}{Mo} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Onde: Dm é o diâmetro equivalente (\varnothing_{eq}) médio dos agregados (mm), obtido pela média aritmética das malhas das peneiras usadas na separação dos agregados (25 e 20 mm), sendo o $\varnothing_{eq} = 22,5$ mm; Mi é a massa do agregado individual (g); e Mo é a massa média dos agregados (g), obtida a partir de todos os agregados.

3.3.4. Índices de estabilidade de agregados dos solos

Os ensaios para determinação da estabilidade de agregados foram realizados em condições de via úmida, utilizando aparelho de oscilação vertical do tipo Yoder (Figura 11A).

Figura 11 - Equipamento utilizado para os ensaios da distribuição dos tamanhos de agregados do solo: A) mesa para peneiramento por via úmida; B) conjuntos de peneiras, cada um com cinco unidades; C) início do processo de desagregação com a amostra no topo do conjunto



Fontes: A) Arquivo pessoal Paulo Marques; B) e C) Arquivos Brivaldo Gomes de Almeida

Nesses ensaios, foram utilizados agregados a partir do tamanho inicial (4 e 6 cm), que tiveram seus diâmetros reduzidos, a partir da separação em peneiras (via seca), passando em malhas com abertura de 7,10 mm, sendo retidos em malhas com 3,35 mm, tendo assim agregados com \varnothing_{eq} médio medindo 5,23 mm, conforme sugerido em Kemper; Rosenau (1986), com modificações sugeridas em Nimmo; Perkins (2002), descritas a seguir.

Nos ensaios, com três repetições, foram utilizadas 25 g de agregados, sendo uma quarta amostra (20g) usada para determinação do “fator f” de correção de umidade dos agregados, corrigindo os pesos da condição de secos ao ar para secos em estufa a 105°C. Na sequência, os agregados foram saturados por capilaridade em álcool etílico, por 10 min, para que o ar entre os poros dos agregados seja eliminado, sem a perturbação da estrutura. Logo após a saturação, as amostras foram colocadas em cada conjunto de peneiras (Figura 11B), com abertura de malhas medindo: 2,00 - 1,00 - 0,50 - 0,25 - 0,125 mm, sendo submetidas ao peneiramento via úmida por 15 min (Figura 11C). Na sequência, foram quantificadas as massas dos agregados retidos nas cinco classes de peneira, onde aqueles que passaram através da última, ficam em suspensão, sendo sua massa calculada por diferença e considerados como agregados menores que 0,125 mm. As classes de diâmetro dos agregados foram calculadas conforme Nimmo; Perkins (2002), em que o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG), foram obtidos por meio das equações (4) e (5), respectivamente.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i) \quad (4)$$

$$DMG = \text{EXP} \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot \log \log X_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (5)$$

Onde: X_i - diâmetro médio das classes (mm); W_i – a proporção de cada classe em relação ao total. Os cálculos para obtenção dos valores do índice geral de estabilidade de agregados (IGEA) foram realizados conforme equação (6).

$$\text{IGEA} = \left[\frac{(\text{Peso da amostra seca } 105^\circ\text{C} - \text{wp } 0,125)}{\text{Peso da amostra seca } 105^\circ\text{C}} \right] \times 100 \quad (6)$$

Onde: IGEA é expresso em %; wp 0,125 é peso dos agregados (105°C) da classe $< 0,125$ mm.

3.3.5. Porosidade do solo total (Pt) e sua distribuição por tamanho de poros (DTP)

A Pt foi determinada nas amostras coletadas em cilindro volumétrico ($\cong 100 \text{ cm}^3$), via método de saturação, onde o volume de poros é assumido como o volume de água para saturar o espaço poroso do solo. Na sequência, foi determinada a DTP. Para tal, seguindo a classificação sugerida em Almeida et al. (2017a), as classes de poros foram distribuídas em macro, meso e microporos. Nesta classificação, os macroporos são definidos como poros com diâmetro equivalente ($\phi_{\text{eq.}}$) $> 300 \mu\text{m}$, que, usando a equação universal de capilaridade [equação (7)], têm energia de retenção (ϕ_m) de no máximo 10 cca. Para o equilíbrio da ϕ_m aplicada foi utilizada a mesa de tensão (Figura 12).

$$\phi_{m(\text{cca})} = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{\text{raio do poro}_{(m)}} \times 100 \quad (7)$$

Onde: ϕ_m = energia devida ao potencial mátrico do solo, em centímetro de coluna de água (cca).

Figura 12 - Mesa de tensão com a distribuição espacial das amostras de solo em cilindros volumétricos, utilizada para aplicar e equilibrar o potencial mátrico (ϕ_m), via coluna de água



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

Neste contexto, os mesoporos são poros intermediários, com tamanho variando entre: $50 < \phi_{\text{eq.}(\mu\text{m})} < 300$ e, portanto, conforme cálculo via equação (6), retêm água entre 10 e 60 cca. Por fim, os microporos foram definidos como poros com $\phi_{\text{eq.}} < 50 \mu\text{m}$, retendo água com energia superior a 60 cca.

3.3.6. Densidade do solo (D_s)

Finalizados os ensaios da DTP, foi possível calcular a densidade do solo (g cm^{-3}), que foi determinada pelo método do cilindro volumétrico (ALMEIDA et al., 2017b), que se baseia na relação entre a massa de sólidos (g), contida no cilindro volumétrico, e o volume do solo (cm^3), representado pelo volume do cilindro ($\pi \times r^2 \times h$), conforme a equação (8).

$$D_s = \frac{\text{Massa de sólidos}}{\text{Volume do solo}} \quad (8)$$

3.3.7. Condutividade hidráulica dos solos (K_{sat}) *in situ*

A K_{sat} é a propriedade que define uma maior ou menor facilidade de percolação da água através dos poros de determinado local. Sendo utilizada em estudos e projetos de canais, sistemas de drenagem, sistemas de irrigação, aterros sanitários, reservatórios entre outros. Para efetuar a medição em campo, foi utilizado o método do permeâmetro de carga constante (PCC), via permeâmetro Guelph (Figura 13).

Figura 13 - Permeâmetro de Guelph utilizado para ensaios de condutividade hidráulica saturada dos solos (K_{sat}) em campo



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

Este permeâmetro foi desenvolvido por Reynolds e Elrick em 1986 na Universidade de Guelph - Canadá. É um permeâmetro de poço de sondagem e de carga hidráulica constante, que permite a medição da K_{sat} , do potencial de fluxo matricial e do parâmetro da extensão capilar macroscópica, tendo como elemento principal o frasco de Mariotte.

O permeâmetro é composto por conjunto de tubos transparentes e graduados que permitem a medição da vazão, tendo a possibilidade de escolha entre dois reservatórios. Essa combinação tem como objetivo aumentar a faixa de medição da permeabilidade, possibilitando

medições em solos argilosos compactados até solos arenosos, com textura areia grossa. Entre as vantagens da utilização do permeâmetro Guelph estão a rapidez do ensaio e a menor perturbação do solo.

O equipamento possui um depósito constituído por uma tampa superior e uma inferior, montados previamente no reservatório externo e no reservatório interno que é graduado, ambos em acrílico transparente. Possui duas conexões na extremidade superior, uma para a entrada de ar e a outra para conectar uma bomba de vácuo. Na extremidade inferior possui uma válvula responsável por conectar ou isolar o reservatório interno do reservatório externo. E na parte interna está um tubo de ar responsável por manter regular a altura de água no poço de sondagem, conforme especificações técnicas na Tabela 1.

O método de campo via permeâmetro de Guelph, consiste em efetuar medições de permeabilidade na superfície ou no perfil do solo por meio de fornecimento de água, mantendo-se uma carga hidráulica constante e conhecida. A carga hidráulica (H) utilizada nos ensaios em campo foi de 3 cca.

Tabela 1 - Especificações técnicas do Permeâmetro Guelph - equipamento MS130

Especificações Técnicas	Descrição
Faixa de carga de água	3 a 25 cm
Diâmetro do furo no solo	64mm
Reservatório de campo	capacidade máxima 20 L
Volume de água necessário para um ensaio	3 L
Faixa de Ksat recomendada	$5 \times 10^{-2} \text{cm s}^{-1}$ até $2 \times 10^{-6} \text{cm s}^{-1}$

Os resultados são calculados de acordo com o método teórico desenvolvido por Reynolds; Elrick (1986), baseado na equação para fluxo de água permanente no solo, a partir de um furo cilíndrico no solo. O fluxo permanente é aproximado por uma equação onde a vazão (Q) é determinada pela equação (9).

$$Q = R \times A \quad (9)$$

Onde: Q é a vazão do regime permanente ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$); R é a razão da vazão constante obtida durante os ensaios (cm min^{-1}); A é a área da seção transversal do reservatório do permeâmetro utilizado (cm^2).

3.3.8. Resistência do solo à penetração de raízes (RP) in situ

Os ensaios de campo para determinação da RP foram realizados nos 36 pontos de cada área experimental, nas profundidades de 0-0,15 m e de 0,15-0,30 m. Foram feitas medições

totalmente automatizadas utilizando-se penetrômetro de campo da marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300 (Figura 14), cujas especificações técnicas estão na Tabela 2.

Figura 14 - Penetrômetro de campo utilizado nos ensaios *in situ* para determinação da resistência do solo à penetração de raízes



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques

Tabela 2 - Especificações do penetrômetro utilizado nos ensaios de campo

Especificações Técnicas	Descrição
Índice de Cone Máximo	Cone tipo 2 (6.800 kPa)
Resolução da medição de profundidade	1; 2,5 ou 5 cm, configurável
Resolução da medição índice de cone	Cone tipo 2 (7,7 kPa)
Velocidade nominal de inserção	24 mm s ⁻¹
Força máxima suportada	90 kgf (haste tipo 2)

Este equipamento mede a força necessária para que uma haste, com ponta em formato de cone, penetre o solo em diferentes profundidades. No presente estudo, em cada ponto realizaram-se leituras de RP (em MPa) entre 0 e 0,60 m, a intervalos de 0,01 m, até se atingir a profundidade máxima definida. Os valores obtidos foram registrados, armazenados no equipamento e transferidos para um computador, onde puderam ser analisados, utilizando o software específico, que acompanha o penetrômetro. Posteriormente, foram feitas as médias das leituras para cada ponto nas profundidades 0-0,15 e 0,15-0,30 m, obtendo-se, dessa forma, o valor da RP para cada camada.

Vale salientar que, buscando-se eliminar os efeitos da variação do teor de água no solo nos resultados da RP, em cada ponto onde se determinou a RP foram coletadas amostras

deformadas para determinar a respectiva umidade gravimétrica no momento do ensaio da RP (U_{RP}), conforme detalhado mais adiante.

3.3.9. *Carbono orgânico total, matéria orgânica no solo e estoque de carbono*

Determinou-se o carbono orgânico total nas camadas avaliadas, utilizando-se metodologia segundo Mendonça; Matos (2005), adaptado de Yeomans; Bremmer (1988). Para tal fim, pesou-se 0,5 g de terra fina seca ao ar (TFSA), que foram transferidos para tubos de digestão. Adicionaram-se 5 mL de solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) 0,167 mol L⁻¹ e 7,5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado aos tubos de digestão. Essa solução foi levada ao bloco digestor a 170 °C por 30 minutos. Após a digestão, as soluções foram transferidas para o erlenmeyer, onde foram adicionadas água destilada e solução indicadora. A solução final foi titulada com solução de sulfato ferroso amoniacal a 0,2 mol L⁻¹. Para as mesmas condições, foram realizados seis controles, sendo que três foram para digestão e os demais não foram aquecidos. O valor do COT foi calculado com base no volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação dos brancos e da amostra.

Considerando-se que em média a MOS apresenta 58% de carbono (C), estima-se o teor de MOS multiplicando o teor de C pelo “fator de van Bemmelen”, 1,724 (100/58) (YEOMANS; BREMMER, 1988).

Para determinar o estoque de carbono, utilizou-se a metodologia proposta por Ellert; Bettany (1995) com as adaptações indicadas por Fernandes; Fernandes (2009), sendo calculado a partir do teor de carbono no solo, da densidade do solo e da profundidade da camada, conforme a equação (10).

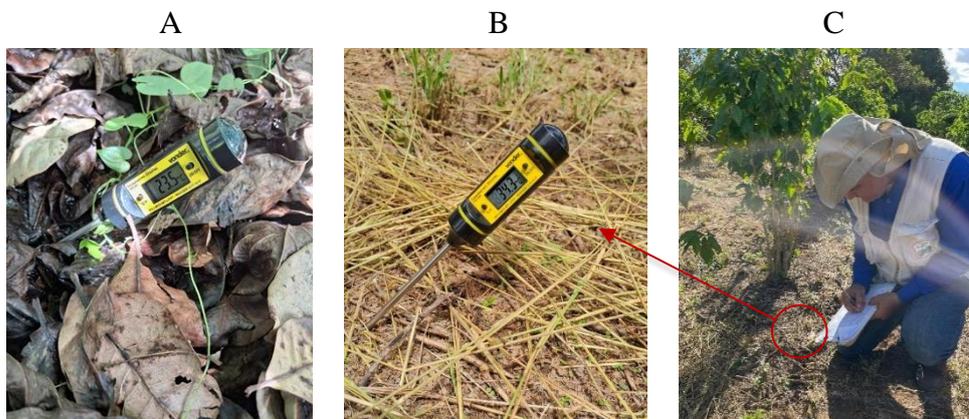
$$\text{Est C} = \frac{(\text{CO} \times \text{Ds} \times e)}{10} \quad (10)$$

Onde: Est C = estoque de carbono orgânico do solo em determinada profundidade (Mg ha⁻¹); CO = teor de carbono orgânico na profundidade amostrada (g kg⁻¹); Ds = densidade do solo na profundidade amostrada (kg dm⁻³); e = espessura da camada considerada (cm).

3.4. **Temperatura do solo**

Para a determinação da temperatura do solo foram utilizados termômetros digitais da marca Vonder®, modelo TVD 300, nas duas subáreas, sombreada e a pleno sol (Figura 15). Os termômetros foram instalados no dia 05 de abril de 2024, na profundidade de 0,05 m, na linha do cafeeiro. As medições foram realizadas simultaneamente nas duas áreas, durante o dia, com intervalos de 30 min entre elas.

Figura 15 - Medição da temperatura do solo em áreas de cultivo de café: A) sombreado; B) em pleno sol; C) dinâmica da coleta de dados



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

3.5. Caracterização química dos solos

Na caracterização química, determinou-se o pH em água, de acordo com o descrito em Teixeira; Campos; Saldanha (2017a), na proporção de 1:2,5, onde 10 g de TFSA foram colocadas num recipiente plástico, adicionando-se 25 mL de água destilada, agitou-se a mistura por 60 segundos e depois deixou-a em repouso por 1 hora; após este período, agitou-a ligeiramente para homogeneizar e proceder a leitura no potenciômetro.

Na determinação do P disponível, utilizou-se a metodologia de acordo com o descrito em Teixeira, Campos; Saldanha (2017b), com solução extratora Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), solução ácida de molibdato de amônio (diluída), onde a fração do teor total de fósforo no solo é correspondente ao teor utilizado pelas plantas. Observa-se a formação de complexo fósforomolibdico de cor azul, obtido após redução do molibdato com ácido ascórbico, com determinação por espectrofotometria. Esta baseia-se no princípio da dissolução de minerais contendo P e/ou deslocamento de P retido nas superfícies sólidas do solo para a solução, por ânions capazes de competir com o P pelos sítios de retenção.

Para determinação dos cátions trocáveis, usamos a metodologia descrita em Teixeira et al. (2017a), onde os cátions trocáveis (Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) são determinados utilizando-se solução extratora, em que o método do KCl 1 mol L⁻¹ é o referencial. Esses cátions adsorvidos são então analisados por métodos volumétricos, de emissão ou absorção atômica. Solução de KCl 1 mol L⁻¹ pesar 74,56 g de cloreto de potássio (KCl), previamente seco em estufa, para cada litro de solução a ser preparada. Para potássio e sódio trocáveis, realizou-se a extração com solução Mehlich-1 e posterior determinação por espectrofotometria de chama.

Em relação a acidez potencial, esta foi caracterizada pela soma da acidez trocável (H⁺ e Al³⁺ que estão retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas) com a acidez não

trocável, que corresponde àquela acidez neutralizada até determinado valor de pH. A acidez não trocável é representada pelo hidrogênio de ligação covalente, associado aos coloides com carga negativa variável e aos compostos de alumínio. A acidez potencial caracteriza o poder tampão de acidez do solo e sua estimativa acurada é fundamental para se estimar a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC). Para a extração da acidez potencial do solo foi utilizado o acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinação volumétrica com solução de NaOH, em presença de fenolftaleína como indicador.

3.6. Variáveis físico-químicas e avaliação sensorial do café arábica

3.6.1. Obtenção das amostras de café

Foram adquiridas três amostras de cerejas em casca secas, *Coffea arabica* cv. Catuaí Vermelho, safras 2023, de cultura convencional, com plantio sombreado e/ou pleno sol e secagem via seca em terreiro, doadas por produtores do distrito de Miracica, Garanhuns-PE (08° 58' 01" S e 36° 37' 34" O), cultivados a uma altitude entre 800 e 900m. Os frutos do café passaram por tratamento pós-colheita de secagem (via seca em terreiro) e acondicionados em embalagem de polipropileno. As amostras recebidas foram descascadas (Figura 16A e 16B) e os grãos crus separados manualmente (Figura 16C) e acondicionadas em embalagens de polipropileno, devidamente identificados e acondicionados, mantidos sob temperatura controlada ($20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C) até momento de remoção da torra e moagem, conforme procedimentos descritos em Sousa e Silva et al. (2011).

Figura 16 - Procedimentos para obtenção do fruto sem casca (grão cru): A) descascador de café manual; B) café em casca “cereja” seca; C) separação do café em grão cru

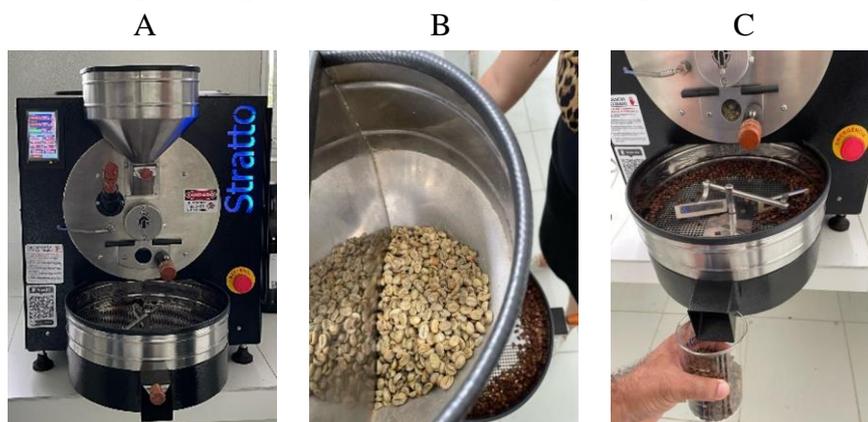


Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

No processo de torra do café foi utilizado o Torrador Elétrico Stratto® (Figura 17A), do Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos do NUBIOTEC (Núcleo de Biotecnologia) da UFRPE. Este equipamento opera com velocidade de rotação de cilindro a 85%, ventilador a

85% e potência a 100%, atingindo a temperatura média final de 207 °C (Figura 17B), por aproximadamente 19 min. Após este tempo sob de 207 °C, segue-se o processo de torrefação de baixa temperatura e tempo longo, até atingir a torra média clara. Os grãos torrados são coletados na base do equipamento (Figura 17C). A Figura 18 ilustra os aspectos dos grãos antes e depois da torra.

Figura 17 - Processo de torra do café em grão cru: A) torrador elétrico stratto®; B) detalhe do funil que leva os grãos para o aquecedor; C) coleta dos grãos após a torra



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

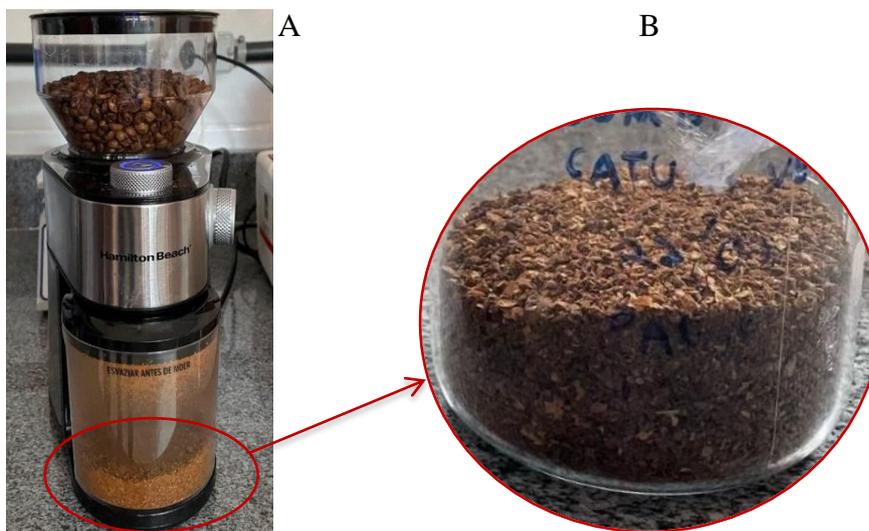
Figura 18 - Aspectos dos grãos: A) café verde (grão cru); e B) café torrado



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

Depois de torrados, os grãos foram mantidos à temperatura de $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$, por 24 horas, em seguida, submetidos à moagem média-fina em Moedor Hamilton Beach Burr Coffee Grinder, Hamilton Beach®, Estados Unidos, EUA (Figura 19).

Figura 19 - Moedor Hamilton Beach Burr Coffee Grinder (A), com detalhe do café torrado (B), e moído para a extração



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

3.6.2. Extração das amostras e análises físico-químicas

Extração das amostras

Foi pesado 0,5 g de café torrado e moído, adicionado 50 mL de água destilada aquecida, a $90^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$, permanecendo em repouso por 3 min, e em seguida, submetido a agitação magnética por 10 min. A amostra foi filtrada e aferida para 100 mL com água (MONTEIRO; TRUGO, 2005 - modificado). A extração foi realizada em triplicata e utilizada nas análises físico-químicas (Figura 20).

Figura 20 - Procedimento de agitação magnética e extração do café para realização das análises físico-químicas



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

Análises físico-químicas do café

Parâmetros clássicos: foram determinados pH (TEKNA pHmetro T-1000®), sólidos solúveis totais em refratômetro portátil (Modelo RT-30ATC) e acidez total titulável expressa em mg/L de ácido tartárico (A.O.A.C., 1995).

Teor de polifenóis totais: foi determinado por leitura de absorvância a 725nm, após diluição do extrato do café a 4 % v/v em água e reação com o reagente fenólico Folin-Ciocalteu estabilizada com solução saturada de carbonato de sódio. O resultado foi expresso, com base na curva analítica, em mg. L⁻¹ de equivalentes de ácido gálico, ($y=0,1373x-0,0522$, $r^2=0,9903$) (GIOVANELLI; BURATTI, 2009).

Teor de flavonóides totais: foi determinada de acordo com Dewanto et al. (2014), por meio de reação cromófora dos flavonoides com soluções de nitrito de sódio, cloreto de alumínio e hidróxido de sódio. As leituras de absorvância das amostras foram realizadas a 510 nm, e a quantificação foi realizado por meio de curva padrão de catequina. As concentrações de falvonóides totais foram expressas em mg/L de equivalentes de catequina ($y = 0,0308x+0,0356$, $r^2=0,9901$).

Teor de taninos totais: foi determinada de acordo com Tiito-Julkunen (1985), utilizando o método de hidrólise ácida e a solução de vanilina como agente cromóforo. As leituras de absorvância das amostras foram realizadas a 500 nm, e a quantificação foi realizado por meio de curva padrão de catequina. As concentrações de taninos totais foram expressas em mg L⁻¹ de equivalentes de catequina ($y=0,0013x+0,0064$, $r^2=0,9988$).

Determinação de atividade antioxidante: a atividade antioxidante foi determinada pelo percentual de inibição do radical DPPH, conforme Porgali; Büyüktuncel (2012), com leitura de absorvância a 517 nm e percentual de inibição calculado pela equação 11.

$$\% \text{ de Inibição DPPH}^* = 100 - [(A^{\text{DPPH}} - A_{\text{café}}) / A^{\text{DPPH}}] \times 100 \quad (11)$$

Onde, A^{DPPH}: absorvância da solução de DPPH* em metanol; Acafé: absorvância da amostra.

Perfil cromatográfico de compostos bioativos: para identificar e quantificar os compostos bioativos foram utilizados dois comprimentos de onda – 272 nm para ácido nicotínico, trigonelina e cafeína, e 325 nm para o ácido 5-cafeoilquínico (5-CQA) e ácido cafeico. As determinações foram realizadas em cromatógrafo líquido de alta (YL Instrument - YL9100 HPLC System), com coluna analítica Sun Fire® C-18, 250 mm × 4,6 mm, 5 μm) fluxo da fase móvel 0,8 mL.min⁻¹, temperatura do forno de 36° C e volume de injeção de 20 μL. A fase móvel foi constituída pela solução A (0,3% v/v de ácido fórmico em água ultrapura) e solução B (metanol), com gradiente para separação dos compostos: 0 a 15 min, 70% A; 15 a 28 min, 56%

A; 28 a 34 min, 56% A; 34 a 55 min, 70% A. A quantificação foi realizada por meio de curva analítica em metanol, com padronização externa (ácido nicotínico - $y=12,748x+441,2$, $r^2=0,996$; trigonelina - $y=18,69x+500,71$, $r^2=0,981$; cafeína - $y=38,939x+2414$, $r^2=0,952$, ácido 5-CQA - $y=91,62x+47,566$, $r^2=0,997$; e ácido cafeico - $y=15,116x-82,626$, $r^2=0,991$) (TRUGO; MACRAE, 1984 - modificado). As amostras foram filtradas a $0,22\mu\text{m}$ antes da injeção.

3.6.3. Análises sensoriais

O projeto foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal Rural de Pernambuco (CEP/UFRPE), sob inscrição nº 33814920.80000.9547, para realização de análises sensoriais de café com julgadores treinados e não treinados (consumidores). Todos os participantes foram devidamente informados sobre os objetivos da pesquisa, leram e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecimento (Apêndice B).

3.6.3.1. Preparação das amostras

Para cada amostra de café torrado e moído foi preparada bebida com extração a quente, utilizando 8g de café moído para 100mL de água, suporte Melitta e papel de filtro n. 102 (ABIC, 2019). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em garrafas térmicas. Os métodos sensoriais foram conduzidos com temperatura entre 68 e 75°C, e as amostras servidas em copos descartáveis identificados com números aleatórios de três dígitos (DUTCOSKY, 2011).

3.6.3.2. Método de Rede

Cinco degustadores treinados em análise sensorial de café participaram do Método de Rede para identificação dos termos descritivos da bebida a quente elaborada com café arábica. Todos os degustadores fazem parte do NITAAB (Núcleo Interdisciplinar de Tecnologia e Análise de Alimentos e Bebidas). Em sessão única, foram degustadas 2 amostras, apresentadas em copos descartáveis de 50 mL, identificados com números aleatórios de 3 dígitos, contendo 25 mL da amostra. Os degustadores foram orientados a levantar descritores visuais, aromáticos e gustativos, de diferença e similaridade entre as amostras.

Os descritores obtidos foram agrupados, eliminados os termos pouco citados e redundantes, transcritos para linguagem coloquial e utilizados para elaboração da ficha de avaliação do CATA e glossário (VERÍSSIMO et al, 2020).

3.6.3.3. Método CATA (Check-all-that-apply)

Julgadores não treinados, todos consumidores regulares de café, foram recrutados na comunidade acadêmica da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), sendo selecionadas 100 consumidores, com idade entre 18 e 60 anos (HEO et al, 2019; MCCAIN-KEEFER et al, 2020).

Foram realizadas duas sessões para análise sensorial das amostras Pleno Sol (PS), Sombreado (S) e comercial (CM). Os julgadores receberam 25 mL de cada amostra (Figura 21), apresentada de forma monádica, em copos descartáveis de 50 mL, identificada com números aleatórios de três dígitos e a uma temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. As análises foram conduzidas em sala com iluminação branca, tendo o julgador acesso à folha de glossário (Apêndice A) contendo um QR-code que direcionava diretamente para formulário *on line* (Google Forms) que continha o Termo de Consentimento Livre e Esclarecimento (Apêndice B), que após concordância direcionava para a Ficha de Avaliação do CATA (Apêndice C).

Figura 21 - Realização da análise sensorial com consumidores realizado na Cozinha Show do Laboratório de Gastronomia da UFRPE



Fonte: Arquivo pessoal Paulo Marques.

3.7. Análise estatística

Os dados gerados na pesquisa foram submetidos à verificação e constatação da distribuição normal e homecedasticidade, premissas da análise de variância. Posteriormente foi realizada a análise de variância (ANOVA) com as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade utilizando o software SAS, versão *student 2.0*.

Para os dados das análises sensoriais foi utilizado o teste *Check-All-That-Apply* (CATA) onde foi construída a tabela de frequência, realizada análise pelo teste Q de Cochran ($p \leq 0,05$), Análise de Correspondência (AC) e Análise Fatorial Múltipla (AFM). Estas análises estatísticas foram realizadas empregando o XLSTAT® (Addinsoft, New York, NY).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física dos solos

A análise granulométrica indicou que a classe textural das duas áreas experimentais variou entre franco arenoso a franco argiloso arenoso, com decréscimo do teor de areia com a profundidade, acompanhado do incremento na proporção de argila total (Tabela 3).

Tabela 3 - Frações granulométricas, classificação textural e densidades para os solos estudados sob o cultivo do café

Sistemas de manejo	Prof. (m)	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	ADA	GF	Ds	Dp
	%%%	%	g cm ⁻³	
Sombreado	0 - 0,15	75,17	5,32	19,31	Fr Ar	15,10	22,13	1,47A	2,85A
Pleno sol		74,30	3,68	22,02	Fr Arg Ar	17,89	18,69	1,50A	2,68B
Sombreado	0,15-0,30	67,98	6,28	25,74	Fr Arg Ar	19,32	24,93	1,48A	2,72A
Pleno sol		64,93	7,10	27,97	Fr Arg Ar	22,66	18,71	1,47A	2,69A

Prof. = profundidade amostrada; ADA= argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; Fr Ar = Franco arenoso; Fr Arg Ar = Franco Argilo Arenoso; Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas sólidas do solo. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Este comportamento é esperado para a classe dos Argissolos, caracterizados pela presença do horizonte Bt, onde há um aumento nos teores de argila em profundidade (EMBRAPA, 2018). Verifica-se que, em valores absolutos, a argila dispersa em água (ADA) teve o mesmo comportamento da argila total, aumentando em profundidade. Ainda sobre a ADA, nota-se também, para as duas profundidades, que os maiores valores foram encontrados na área de pleno sol em comparação com a sombreada. Estes resultados refletiram nos valores do grau de floculação (GF), que foram baixos, inferiores a 25%, variando entre 24,93 a 18,69%, com maiores valores na área sombreada em comparação com a área a pleno sol, justificados pelo fato desta última ter maiores valores de argila total.

Estes resultados do GF indicam a melhor estruturação dos solos da área sombreada. De fato, na área sob o manejo agroflorestal há maior aporte de material orgânico, que deve ter contribuído para os maiores valores do GF, como discutido em Souza et al. (2024), que avaliaram atributos físicos do solo em diferentes tipos de uso, como floresta e cafezal.

A densidade do solo (Ds) não apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo na profundidade de 0 a 0,15 m, com valores próximos de 1,47 g cm⁻³ no sistema sombreado e 1,50 g cm⁻³ para o sistema a pleno sol. Entretanto a densidade de partículas (Dp) apresentou diferença significativa com valores de 2,85 g cm⁻³ para o sistema sombreado e 2,68 g cm⁻³ para o sistema a pleno sol. Esta diferença pode ser explicada pela maior proporção de areia nessa profundidade no sistema sombreado, o que lhe conferiu classe textural diferente das outras (Franco arenosa).

Na profundidade de 0,15 a 0,30 m, os valores da Ds e Dp foram similares entre os sistemas de manejo e não apresentaram diferença significativa, com valores na área sombreada de 1,48 g cm⁻³ para Ds e 2,72 g cm⁻³ para Dp; e na área a pleno sol com 1,47 g cm⁻³ para Ds e 2,69 g cm⁻³ para Dp.

4.2. Caracterização química dos solos

Avaliando-se as características químicas do solo, observou-se que os valores de pH apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos na profundidade de 0-0,15 m, sendo de 4,36 para o sistema de manejo sombreado e 5,27 para o sistema a pleno sol (Tabela 4). Ainda nesta profundidade, nota-se que não houve diferença significativa para os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ entre os sistemas. Já para K^+ , Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ houve diferença significativa, destacando o potássio com $0,18 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na área sombreada e $0,38 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na área de pleno sol, o que supera o que é recomendado para a cultura no estado de Pernambuco (IPA, 2008).

Tabela 4 - Caracterização química do Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café

Sistema de manejo	Prof. (m)	pH (H ₂ O) (1:2,5)	Ca ²⁺cmol _c kg ⁻¹	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al
Sombreado	0-0,15	4,36 B	1,14 A	0,37 A	0,18 B	0,01 A	0,98 A	6,93 A
Pleno sol		5,27 A	1,38 A	0,42 A	0,38 A	0,02 A	0,55 B	5,81 B
CV (%)		2,73	24,56	27,28	40,44	102,7	12,97	5,78
Sombreado	0,15-0,30	4,82 A	0,52 A	0,12 A	0,12 A	0,01 B	1,96 A	8,24 A
Pleno sol		4,74 A	0,44 A	0,17 A	0,17 A	0,03 A	1,21 A	8,07 A
CV (%)		19,45	36,86	52,98	27,25	35,46	9,13	8,46

Prof. = profundidade amostrada; Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade

Para a profundidade de 0,15-0,30 m, não houve diferença significativa para as medidas de pH, com valores entre 4,82 (sistema sombreado) e 4,74 (sistema de manejo a pleno sol). Também não foi observada diferença significativa para os outros resultados, exceto para o Na^+ , que apresentou valores de 0,01 e $0,03 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o sistema sombreado e pleno sol, respectivamente. Nesta profundidade, destacamos o Al^{3+} com 1,96 e $1,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o sistema sombreado e pleno sol, nesta ordem, superando a soma de bases e conferindo o caráter álico ao solo (SALGADO et al., 2006).

A soma de bases (SB) na profundidade 0-0,15 m foi significativamente maior no sistema a pleno sol, com $2,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, em comparação com o sistema sombreado, que apresentou $1,71 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 5).

Tabela 5 - Complexo sortivo do solo e fósforo disponível em um Argissolo Amarelo nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café

Sistema de manejo	Prof. (m)	SBcmol _c kg ⁻¹	t	T	m%	V	PST	P _{disp.} mg kg ⁻¹
Sombreado		1,71 B	2,68 A	8,65 A	37,12 A	19,71 B	0,12 A	4,67 B
Pleno sol	0-0,15	2,20 A	2,76 A	8,02 B	20,24 B	27,49 A	0,21 A	7,78 A
CV (%)		16,67	10,54	4,36	18,99	14,69	101,76	36,55
Sombreado		0,76 A	2,06 A	9,03 A	63,50 A	8,53 A	0,07 B	3,82 A
Pleno sol	0,15-0,30	0,80 A	2,01 A	8,88 A	60,80 A	8,91 A	0,27 A	3,34 A
CV (%)		30,52	10,29	8,20	13,32	28,58	30,83	18,02

Prof. = profundidade amostrada; SB = Soma de bases; t = Capacidade de troca de cátions efetiva; T = Capacidade de troca de cátions total; m = Saturação por alumínio; V = Saturação por bases; PST = Percentual de sódio trocável; P_{disp.} = Fósforo disponível. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Em relação às demais variáveis químicas, para a mesma profundidade 0-0,15 m, percebe-se que os valores da capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de manejo, com valores de 2,68 e 2,76 cmol_c kg⁻¹ para os sistemas sombreado e pleno sol, respectivamente. No entanto, a CTC total (T) foi maior no sistema sombreado (8,65 cmol_c kg⁻¹) em comparação ao pleno sol (8,02 cmol_c kg⁻¹). Seguindo a mesma tendência, a saturação por alumínio (m) também foi significativamente maior no sistema sombreado (37,12%) em comparação ao pleno sol (20,24%).

Por outro lado, os valores da saturação por bases (V) foram maiores no sistema a pleno sol (27,49%) em comparação ao sombreado (19,71%); o mesmo ocorrendo com o fósforo disponível (P_{disp.}), cujos valores foram maiores no solo da área a pleno sol (7,78 mg kg⁻¹) quando confrontados com aqueles da área sombreada (4,67 mg kg⁻¹). Entretanto, os valores do percentual de sódio trocável (PST) não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de manejos, com valores de 0,12 e 0,21 % para o sombreado e a pleno sol, respectivamente.

Esses resultados indicam que o sistema a pleno sol tende a ter maior saturação por bases e menor saturação por alumínio, o que pode favorecer a disponibilidade de nutrientes para as plantas (BARRETO et al., 2019; SOUZA et al., 2024). Algumas combinações de plantas em consórcio podem causar ainda o empobrecimento do solo (SCHWENDENER et al., 2005).

Na profundidade de 0,15-0,30 m, exceto para o PST, os demais parâmetros analisados não apresentaram diferenças significativas entre os solos sob os manejos adotados. Assim, a SB foi de 0,76 cmol_c kg⁻¹ no sistema sombreado e 0,80 cmol_c kg⁻¹ no sistema a pleno sol; t foi de 2,06 à 2,01 cmol_c kg⁻¹, para sombreado e a pleno sol, respectivamente. Os valores da T foram

de 9,03 e 8,88 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (sombreado e a pleno sol, respectivamente); enquanto os da V foi de 8,53 a 8,91%, na mesma ordem (Tabela 5).

Ainda na mesma profundidade, a saturação por alumínio (m) foi de 63,5 % (sombreado) e 60,80% (pleno sol), o que indica solos álicos (m >50%), condição esta que é prejudicial às plantas, causando um “engrossamento” das raízes, constituindo um fator limitante ao crescimento das plantas. A presença do Al^{3+} reduz o crescimento e o desenvolvimento das raízes e diminui a absorção de nutrientes, o que é desfavorável para o desenvolvimento de plantas sensíveis a esse elemento. Isso afeta a produção agrícola que, para obter altos rendimentos, necessita de substratos que possibilitem o desenvolvimento das raízes sem obstáculos químicos e/ou físicos (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001).

No entanto, o PST apresentou diferença significativa, com valores de 0,07 % para o sistema sombreado e 0,27 % para o a pleno sol. Esse aumento do PST no sistema a pleno sol pode indicar um risco potencial de degradação da estrutura do solo sob esta área, devido ao acúmulo de sódio trocável (ALMEIDA, 2010). Já os valores do $P_{\text{disp.}}$ não apresentaram diferenças significativas, sendo com 3,82 mg kg^{-1} (sombreado) e 3,34 mg kg^{-1} (pleno sol).

Na tabela 6 observamos que na profundidade de 0-0,15 m a saturação por cálcio, magnésio e potássio estão equilibradas. Em Malavolta (2006), afirma que para você buscar solos altamente produtivos, devemos saturar o cálcio entre 50 e 60%, o magnésio entre 10% e 15% e o potássio de 3% a 5%. Já na camada de 0,15 – 0,30 m, os baixos valores de saturação por cálcio dão espaço para o alumínio (Tabela 5) onde a saturação por alumínio chega na casa dos 60% indicando caráter álico (SALGADO et al., 2006).

Tabela 6 - Saturação por cálcio, magnésio e potássio nos diferentes sistemas de manejo sob o cultivo do café

Sistema de manejo	prof. (m)	Ca%	Mg%	K%
Sombreado	0-0,15	42,54	13,81	6,72
Pleno sol		50,00	15,22	13,77
Sombreado	0,15-0,30	25,24	5,83	5,83
Pleno sol		21,89	8,46	8,46

Prof. = profundidade amostrada; Ca% = Saturação por cálcio; Mg% = Saturação por magnésio; K% = Saturação por potássio

Os altos valores de saturação por potássio se devem, provavelmente, ao sistema de adubação que é feita com esterco bovino e “cama de galinha” composta por casca de arroz, fezes e restos

de ração das aves, aplicados anualmente na medida de 6 Mg ha⁻¹, mesmo resultado encontrado em Carvalho et al. (2011).

4.3. Atributos físicos dos solos

Além da caracterização física dos solos (Tabela 3), nesta seção foram utilizados outros atributos físicos que são indispensáveis para basear as discussões entre os efeitos do sistema de manejo e a qualidade do café; avaliando se estes manejos interferem nestes atributos físicos.

4.3.1. Porosidade total do solo (Pt) e sua distribuição em tamanho de poros (DTP) e condutividade hidráulica dos solos (Ksat)

Na profundidade de 0-0,15 m, a Pt foi significativamente maior no sistema a pleno sol (47,54%) em comparação ao sistema sombreado (43,08%). A DTP revelou que a macroporosidade (Macro) foi maior no sistema sombreado (10,48%) do que no pleno sol (8,45%), indicando uma melhor aeração e infiltração de água nessa profundidade. A maior concentração de macroporos nesta camada resulta numa maior infiltração de água no solo (CAMPANHA et al., 2007). A mesoporosidade (Meso) foi mais elevada no pleno sol (16,52%) em comparação ao sombreado (11,76%), assim como a microporosidade (Micro), que se apresentou maior no sistema pleno sol (23,52%) comparado com o sombreado (21,55%), o que também pode influenciar positivamente na retenção de água disponível para as plantas (Tabela 7).

Tabela 7 - Porosidade total, distribuição de tamanho de poros e condutividade hidráulica (Ksat) em amostras do Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café

Sistemas de manejo	Prof. (m)	Pt%	Macro	Meso	Micro	Ksat (mm h ⁻¹)
Sombreado		43,08 B	10,48 A	11,76 B	21,55 B	11,19 A
Pleno sol	0 - 0,15	47,54 A	8,45 B	16,52 A	23,52 A	4,91 B
CV (%)		6,58	22,60	16,38	10,34	53,90
Sombreado		43,11 B	8,09 A	11,95 B	23,74 B	13,17 A
Pleno sol	0,15-0,30	46,98 A	6,18 B	15,68 A	25,88 A	2,97 B
CV (%)		5,31	33,25	15,10	7,51	63,64

Prof. = profundidade da coleta do solo; Pt = Porosidade total do solo; Macro = Macroporosidade; Meso = Mesoporosidade; Micro = Microporosidade; Ksat = Condutividade hidráulica saturada do solo. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Esses resultados concordam com a maior proporção microporos do solo, ou seja, poros responsáveis pela retenção de água no solo (HILLEL, 2003). Em condições de sequeiro, o déficit hídrico das plantas é um problema grave e atual, devido a ocorrência de mudanças

climáticas, como o prolongamento de períodos de estiagem. Assim, um solo com maior capacidade de retenção de água seria menos limitante às plantas do cafeeiro, com maior potencial produtivo (SOUZA et al.,2015).

Ainda em relação à profundidade de 0-0,15 m, percebe-se que, apesar da menor Pt dos solos da área sombreada (43,08%), esta apresentou os maiores valores de Macro (10,48%), o que provavelmente explica o comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) nesta área, cujos valores foram significativamente maiores (11,19 mm h⁻¹) em comparação ao pleno sol (4,91 mm h⁻¹). Neste contexto, esses maiores valores da Macro indicam uma melhor capacidade de drenagem no sistema sombreado nessa profundidade.

Esta mesma condição foi observada para a K_{sat} na profundidade 0,15-0,30 m, com valores significativamente maiores no sistema sombreado (13,17 mm h⁻¹) em comparação ao pleno sol (2,97 mm h⁻¹), sugerindo novamente melhor capacidade de infiltração e drenagem no solo da área sombreada.

Analisando os demais parâmetros para a profundidade de 0,15-0,30 m, constata-se que a Pt manteve a mesma condição dos solos da camada superficial (0 - 0,15 m), com maiores valores para o sistema a pleno sol (46,98%) em comparação ao sombreado (43,11%). O mesmo aconteceu com a Meso, com os valores de pleno sol maiores (15,68%) que o sombreado (11,95%), e a Micro com valores superiores no sistema pleno sol (25,88%) em relação ao sistema sombreado (23,74%). Entretanto, os Macro, como observado na camada superficial, os maiores valores foram encontrados na área sombreada (8,09%) quando associados com a pleno sol (6,18%), justificando, mais uma vez, os maiores valores de K_{sat} nesta área (13,17 mm h⁻¹).

4.3.2. Resistência do solo à penetração de raízes (RP), resistência tênsil de agregados do solo (RT) e umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados da RP (URP)

A RP e a RT são indicadores importantes da compactação e da estabilidade estrutural do solo, enquanto a umidade gravimétrica do solo, determinada no momento da coleta dos dados para a RP (U_{RP}) influencia diretamente a RP, bem como a coesão dos agregados do solo (EMBRAPA, 2018). Neste contexto, observa-se que o solo na profundidade de 0-0,15 m, o sistema a pleno sol apresentou U_{RP} significativamente menor (12,73%) em comparação ao sistema sombreado (15,34%), mas que não foi suficiente para influenciar os valores da RP, uma vez que não houve diferenças significativas entre os sistemas, tendo-se 1,52 MPa na área a pleno sol e 1,36 MPa para a sombreada (Tabela 8).

Tabela 8 - Resistência do solo à penetração de raízes, resistência tênsil de agregados e umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados para o Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café

Sistemas de manejo	Prof. (m)	U_{RP} %	RP MPa	RT kPa
Sombreado	0 - 0,15	15,34 A	1,36 A	16,70 A
Pleno sol		12,73 B	1,52 A	16,25 A
CV (%)		11,25	24,36	43,35
Sombreado	0,15-0,30	15,30 A	1,31 A	13,71 A
Pleno sol		13,12 B	1,42 A	12,68 A
CV (%)		9,49	28,04	47,27

Prof. = profundidade da coleta do solo; U_{RP} = Umidade gravimétrica no momento da coleta dos dados; RP = Resistência do solo à penetração de raízes; RT = Resistência tênsil. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Com relação a RP medida na profundidade 0,15-0,30 m percebe-se que seus valores diminuíram em relação à superfície, porém, não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas, com 1,31 MPa na área sombreada e 1,42 MPa a pleno sol (Tabela 8). Desse modo, considerando que os valores de RP nas duas profundidades ficaram abaixo de 2 MPa, valor crítico e limitador ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998; FIGUEIREDO et al., 2011), pode-se inferir que o estado atual da compactação dos solos sob os manejos adotados é considerado satisfatório (DRESCHER et al., 2012).

Quanto à RT, considerando a camada superficial (0,15-0,30 m), os seus valores também não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas, com 16,70 kPa para o sombreado e 16,25 kPa para o pleno sol.

4.3.3. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice geral de estabilidade dos agregados (IGEA)

Para a profundidade de 0-0,15 m, tanto o DMP quanto o DMG não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de manejo sombreado e a pleno sol (Tabela 9).

Tabela 9 - Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice geral de estabilidade de agregados dos solos estudados sob o cultivo do café

Sistemas de manejo	Prof. (m)	DMPmm.....	DMG	IGEA %
Sombreado	0 - 0,15	3,45 A	3,23 A	0,98 A
Pleno sol		3,51 A	3,34 A	0,99 A
CV (%)		3,02	6,02	0,59
Sombreado	0,15-0,30	3,47 A	3,24 A	0,98 A
Pleno sol		3,45 A	3,21 A	0,99 A
CV (%)		2,54	5,46	0,60

Prof. = profundidade amostrada; DMP = Diâmetro médio ponderado; DMG = Diâmetro médio geométrico; IGEA = Índice geral de estabilidade de agregados. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Ambos os sistemas mostraram valores próximos de DMP (3,45 a 3,51 mm) e DMG (3,23 a 3,34 mm), indicando uma distribuição de tamanho de agregados similar. O IGEA também não apresentou diferenças entre os sistemas, com valores entre 0,98 e 0,99%, refletindo boa estabilidade dos agregados na camada superficial do solo. De fato, o DMP e o DMG são indicadores importantes da distribuição de tamanho de partículas no solo, refletindo a estrutura física e a estabilidade dos agregados. Por sua vez, o IGEA avalia a resistência dos agregados à degradação sob condições de estresse, sendo crucial para entender a capacidade do solo em manter sua estrutura frente às práticas de manejo (BRONICK; LAL, 2005).

Na profundidade de 0,15-0,30 m, os resultados foram consistentes com a camada superficial. Tanto o DMP quanto o DMG não mostraram diferenças significativas entre os sistemas sombreado e a pleno sol, com valores de 3,47 e 3,45 mm para DMP, sendo 3,24 e 3,21 mm para DMG. O IGEA também se manteve similar entre os sistemas, com valores de 0,98 e 0,99%, indicando que a estabilidade dos agregados não foi afetada significativamente pela profundidade (Tabela 9). Assim, os atributos relacionados à estrutura de agregados do solo sugerem que o manejo entre os sistemas sombreado e pleno sol não influenciou de maneira substancial a distribuição de tamanho de partículas e a estabilidade dos agregados.

4.3.4. Carbono como componente chave na qualidade estrutural do solo

Na profundidade de 0-0,15 m, observamos que os valores de COT, MO e Est.C dos solos sob os manejos não diferiram entre si estatisticamente. Especificamente, o COT foi de 23,50 g kg⁻¹ no sistema sombreado e 22,28 g kg⁻¹ no sistema a pleno sol. A MO foi de 44,66 g kg⁻¹ no sistema sombreado e 42,33 g kg⁻¹ no sistema a pleno sol. O Est.C foi de 52,18 Mg ha⁻¹ no sistema sombreado e 50,13 Mg ha⁻¹ no sistema a pleno sol (Tabela 10).

Tabela 10 - Carbono orgânico total (COT), Matéria orgânica (MO) e Estoque de carbono (Est.C) em amostras do Argissolo Amarelo dos solos estudados sob o cultivo do café

Sistema de manejo	Prof. (m)	COT	MO	Est.C
	 g kg ⁻¹		Mg ha ⁻¹
Sombreado	0-0,15	23,50 A	44,66 A	52,18 A
Pleno sol		22,28 A	42,33 A	50,13 A
CV (%)		8,80	8,80	7,86
Sombreado	0,15-0,30	19,95 A	37,90 A	44,29 A
Pleno sol		19,75 A	37,53 A	43,56 A
CV (%)		6,40	6,40	5,57

Prof. = profundidade amostrada; COT = Carbono orgânico total; MO = Matéria orgânica; Est.C = Estoque de carbono. Letras idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si para os sistemas de manejo na mesma profundidade pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

A presença de cobertura vegetal densa e sombreamento pode reduzir a taxa de decomposição da matéria orgânica, favorecendo o acúmulo de carbono no solo (LAL, 2004). Na profundidade de 0,15-0,30 m, os valores de COT, MO e Est.C também não mostraram diferenças significativas no sistema sombreado em comparação ao pleno sol. O COT foi de 19,95 g kg⁻¹ no sistema sombreado e 19,75 g kg⁻¹ no sistema a pleno sol. A MO foi de 37,90 g kg⁻¹ no sistema sombreado e 37,53 g kg⁻¹ no sistema a pleno sol. Já o Est.C foi 44,29 Mg ha⁻¹ no sistema sombreado e 43,56 Mg ha⁻¹ no sistema a pleno sol.

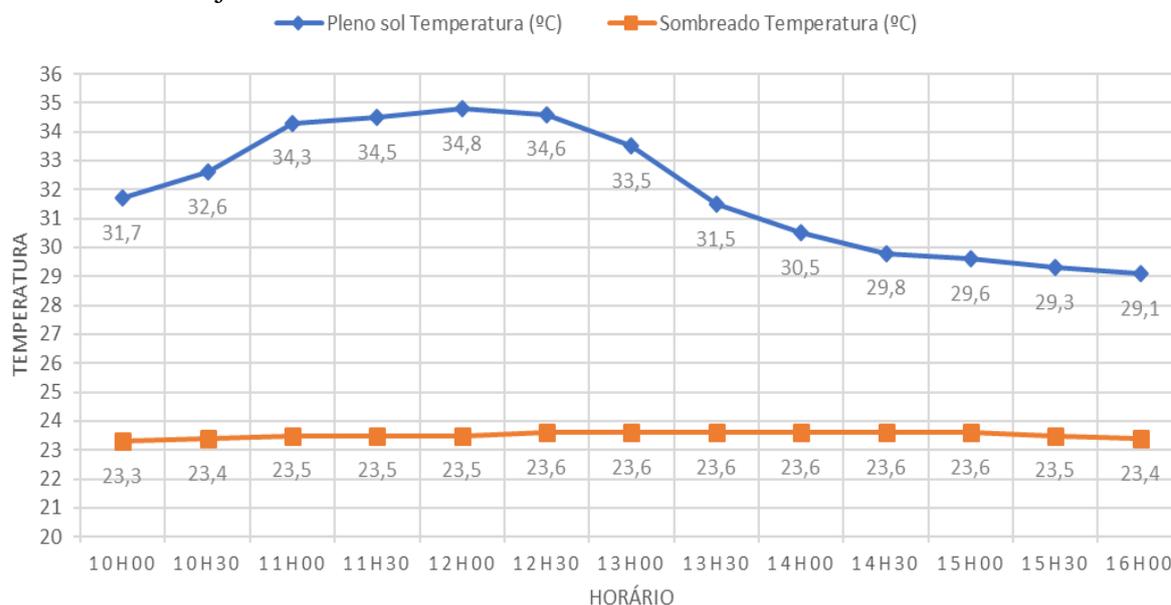
Esses resultados mostram que, a adição de material orgânico (cama de galinha) nos dois sistemas, geraram uma acumulação de carbono, mesmo em camadas mais profundas. Esse comportamento pode ser explicado pela menor oxidação da matéria orgânica devido às condições microclimáticas mais favoráveis nos dois sistemas (SIX et al., 2002).

A análise dos atributos químicos do solo, especificamente o COT, a MO e o Est.C, é fundamental para avaliar a qualidade e a saúde do solo. Estes parâmetros são indicadores da capacidade do solo de sustentar atividades biológicas, influenciar a fertilidade e a estrutura do solo, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono (LAL, 2004; SIX et al., 2002).

4.3.5. Temperatura do solo

A temperatura do solo foi mais baixa no sistema agroflorestal, onde verifica-se a influência do sombreamento e também do acúmulo de matéria orgânica no solo, sobretudo das folhas advindas das árvores que estão no sistema. Percebe-se uma variação mínima da temperatura durante o dia, onde a máxima foi de 23,6°C e mínima 23,3°C (Figura 22).

Figura 22 - Variação diurna da temperatura do solo na profundidade de 0,05 m nos dois sistemas de manejo da cultura do café



As maiores variações na temperatura ocorreram na área de pleno sol, onde a temperatura máxima do solo chegou a 34,8°C e a mínima 29,1°C, com uma amplitude térmica no solo de 5,7°C, enquanto que na área sombreada a amplitude térmica foi de 0,3°C.

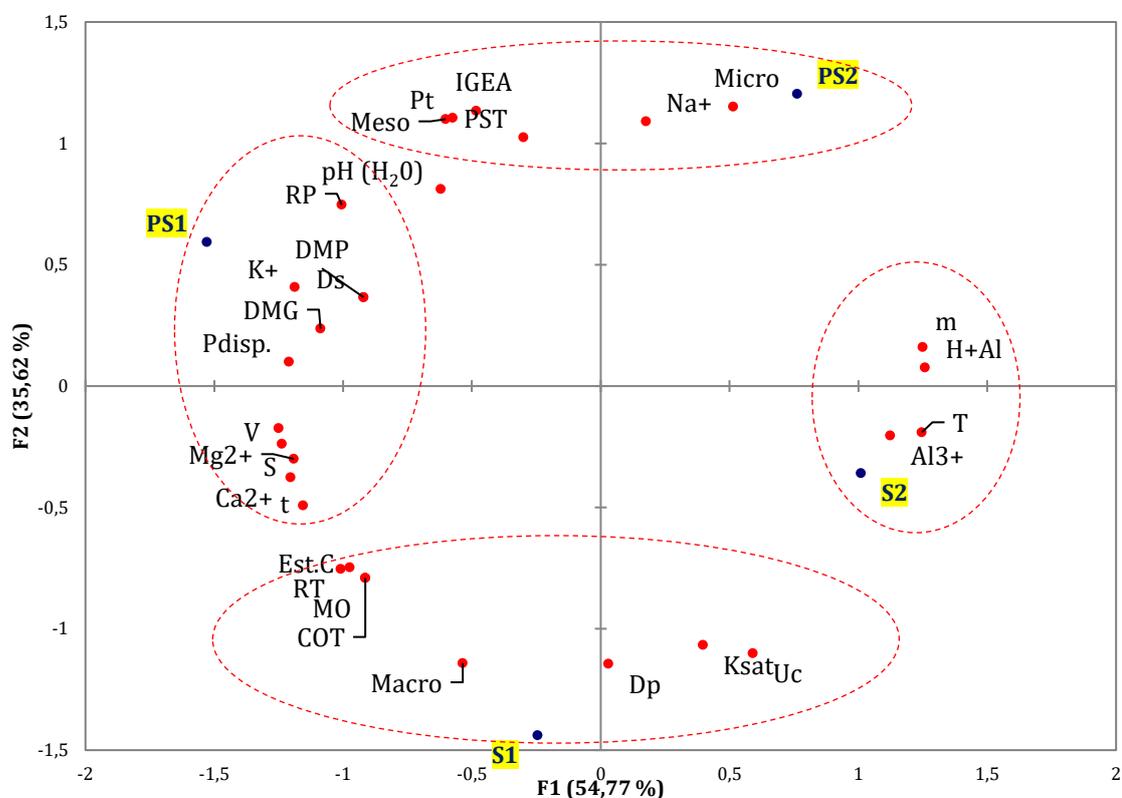
O sombreamento e a cobertura vegetal, considerada uma prática conservacionista, proporciona inúmeros benefícios ao solo, dentre os quais podemos citar, a menor ocorrência de plantas daninhas, redução da perda de água do solo, contribuindo para a manutenção da umidade, incrementos na matéria orgânica do solo, que por sua vez beneficia os microrganismos do solo, responsáveis pela ciclagem de nutrientes (SOUZA DE OLIVEIRA et al., 2019; VIEIRA et al., 2020). Além disso, contribui para a conservação dos atributos físicos do solo, diminuindo a compactação a desagregação e elevando a porosidade e a capacidade de infiltração do solo (COLLIER et al., 2011).

4.4 Análise multivariada para caracterização dos tipos de solo

A Figura 23 apresenta a análise de componentes principais (ACP), considerando a influência dos parâmetros físicos e químicos do solo na discriminação do solo de cultivo de cafeeiros cultivados em sistemas de cultivo a pleno sol e sombreado, em duas profundidades 0 a 0,15 m e 0,15 a 0,30 m. As duas primeiras componentes principais explicaram 90,39% da variância total dos dados, da qual a primeira componente (CP1) representou 54,77% e a segunda componente (CP2) 35,62%, e separam as amostras em função das variáveis estudadas.

Analisando os *Loadings e Scores* observa-se que a CP1 positiva caracterizou a amostras de solo na profundidade de 0,15 a 0,30 m da área de cultivo em sistema sombreado (S2) por meio de fatores químicos iônicos (capacidade de troca iônica total – T) e a presença de alumínio (saturação de alumínio – m, íon de alumínio - Al^{3+} , e H+Al). Já CP1 negativa caracterizou o solo da área de cultivo a pleno sol e profundidade de 0 a 0,15 m pelas características físicas - resistência do solo à penetração das raízes (RP) e diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico (DMP e DMG), íons de potássio, magnésio e cálcio (K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}), fósforo disponível (P_{disp}), soma de bases e saturação por bases (S e V) e capacidade de troca iônica efetiva (t).

Figura 23 - Contribuição das variáveis e distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo de área de cafezal com plantio a pleno sol e sombreado, em duas dimensões no sistema de coordenadas definido pela primeira e segunda componente principal



PS1: pleno sol (0 a 0,15 m); PS2: pleno sol (0,15 a 0,30 m); S1: sombreado (0 a 0,15 m); S2: sombreado (0,15 a 0,30 m); Pt: porosidade total do solo; Macro: macroporosidade; Meso: mesoporosidade; Micro: microporosidade; Ds: densidade do solo; Dp: densidade da partícula; Ksat: condutividade hidráulica saturada do solo; Uc = U_{RP} : umidade gravimétrica no momento da coleta; RP: resistência do solo à penetração de raízes; RT: resistência tênsil do agregado; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio gravimétrico; IGEA: índice geral de estabilidade de agregados; pH_{H2O}: pH em água; H+Al: S: soma de bases; t: capacidade de troca iônica efetiva; T: capacidade de troca iônica total; m: saturação de alumínio; V: saturação de bases; PST: percentual de sódio trocável; P_{disp}: fósforo disponível; COT: carbono orgânico total; MO: matéria orgânica; Est.C: estoque de carbono.

A segunda componente principal (CP2) caracteriza na parte positiva o solo da área de cultivo a pleno sol e profundidade de 0,15 a 0,30 m pelas características físicas de porosidade total (Pt), presença de mesoporos e microporos (Meso e Micro) e índice geral de estabilidade de agregados (IGEA), e pelas variáveis químicas relacionadas ao sódio (Na⁺ e PST). Enquanto CP2 negativa caracteriza o solo na profundidade de 0 a 0,15 m da área de cultivo em sistema sombreado (S1) apenas por características físicas, com maior presença de macroporos (Macro), densidade das partículas sólidas do solo (Dp), resistência tênsil dos agregados do solo (RT), condutividade hidráulica saturada (Ksat) e umidade gravimétrica, determinada no momento da coleta de dados da RP em campo (U_{RP} = Uc), além das variáveis estoque de carbono (Est.C), matéria orgânica (MO) e carbono orgânico total (COT).

4.5. Caracterização química, cromática e sensorial do café

4.5.1. Parâmetros químicos

A Tabela 11 apresenta dos resultados dos parâmetros clássicos (pH, acidez total titulável e sólidos solúveis totais) de grãos de café arábica (*cv.* Catuaí Vermelho), provenientes de cafezais cultivados sob o sistema convencional (pleno sol) e sistema agroflorestal (sombreado), e amostra de café comercial. Esses parâmetros são importantes para avaliar a qualidade do café, uma vez que a bebida deve apresentar equilíbrio entre doçura, acidez e amargor.

Tabela 11 - Parâmetros clássicos de grãos de café arábica (*cv.* Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial

Procedência das Amostras	pH	Acidez titulável (mg ácido tartárico/100 g)	SST (°Brix)
Pleno sol	4,90 ± 0,00 ^b	203,05 ± 0,05 ^b	0,20 ± 0,00 ^a
Sombreado	4,90 ± 0,01 ^b	303,00 ± 0,05 ^a	0,20 ± 0,00 ^a
Comercial	5,50 ± 0,01 ^a	203,00 ± 0,06 ^b	0,20 ± 0,00 ^a

Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os sistemas de cultivo a pleno sol e sombreado apresentam pH significativamente ($p < 0,05$) mais ácido, o que possibilita maior percepção de acidez na bebida elaborada com esses cafés. A acidez total titulável é o somatório de ácidos inorgânicos e orgânicos não voláteis, sendo estes últimos os principais responsáveis pela característica de acidez no café. Esses ácidos, tem origem nos frutos de café durante seu processo de maturação (majoritários ácidos clorogênicos, quínico, cítrico e málico) e torra dos grãos de café (ácidos glutárico, itacônico, mesacônico, succínico e fumárico) (FARAH, 2019; CLARKE; VITZTHUM, 2001).

O café arábica em média apresenta acidez de 94,70 a 301,07 % (ELIAS et al., 2022). As diferenças observadas nos níveis de acidez total titulável podem ser explicadas por fatores como o estágio de maturação dos grãos, condições edafoclimáticas de cultivo, práticas agrícolas empregadas nas etapas de beneficiamento e secagem, e ainda, tipo de torra empregado, fazendo com que ocorra uma maior ou menor degradação dos ácidos orgânicos presentes nos grãos de café (POISSON et al., 2017).

O teor de sólidos solúveis totais (SST) dos cafés não apresentam variação significativa ($p < 0,05$) entre as amostras. Esse parâmetro físico-químico tem relação com o “corpo” e percepção de doçura da bebida, percepções sensoriais que possuem forte influência na decisão de compra por parte do consumidor, além disso está relacionado com o rendimento industrial (SANTOS et al., 2020).

A concentração de fenólicos totais, flavonoides totais e classes de flavonoides (taninos, flavonóis e antocianinas) estão apresentados na Tabela 12.

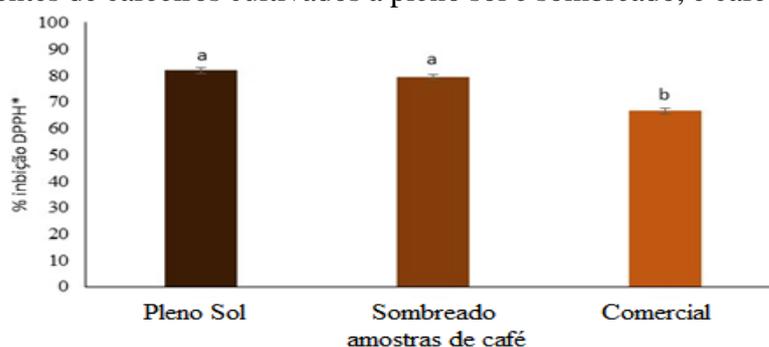
Tabela 12 - Classes de compostos fenólicos de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial

Procedência das Amostras	PT (mg de ácido gálico g ⁻¹)	FLAT (mg de catequina g ⁻¹)	TT (mg de catequina g ⁻¹)	FlvT (mg de quercetina g ⁻¹)	AntT (mg de cianidina g ⁻¹)
Pleno Sol	26,03 ± 0,75 ^{a,b}	21,28 ± 0,12 ^b	10,10 ± 0,29 ^b	2,00 ± 0,08 ^b	ND
Sombreado	24,78 ± 1,14 ^b	21,61 ± 0,31 ^b	10,93 ± 0,50 ^{a,b}	2,13 ± 0,05 ^b	ND
Co	28,17 ± 0,98 ^a	25,81 ± 0,11 ^a	11,54 ± 0,46 ^a	2,43 ± 0,03 ^a	ND

Co: comercial; PT: polifenóis totais; FLAT: flavonoides totais; TT: taninos totais; FlvT: flavonóis totais; AntT: antocianinas totais; ND: não detectado. Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

O café arábica contém compostos fenólicos em concentrações significativas (ALAMRI, ROZAN E BAYOMY, 2022), sendo esses compostos importantes para a saúde humana, por serem antioxidantes, reduzindo o estresse oxidativo e potencialmente prevenir doenças relacionadas à saúde, como doenças cardiovasculares, neurológicas, diabetes e câncer (WANG et al., 2018). Os flavonoides trazem benefícios à saúde do consumidor de café por apresentarem atividade antioxidante, capacidade de sequestrar espécies reativas de oxigênio e eletrófilos, capacidade de inibir a nitrosação, capacidade de quelar metais, potencial de produzir peróxidos em presença de alguns metais e de modular a atividade de algumas enzimas celulares (FENNEMA et al., 2010), e não diferem significativamente em função do manejo, pleno sol e sombreamento (Tabela 12). Apesar das concentrações dos compostos fenólicos dos cafés não diferirem entre os manejos, estes apresentaram diferenças significativas em relação ao café comercial (Tabela 12), a atividade antioxidante *in vitro* apresenta valores significativamente maiores nos sistemas pleno sol e sombreado (Figura 24).

Figura 24 - Atividade antioxidante de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial



PL: pleno sol; SM: sombreado; Co: comercial. Médias com letra diferente diferem significativamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

O elevado consumo mundial da bebida café tem contribuído para estudos referentes aos potenciais efeitos benéficos para a saúde (FUKUSHIMA et al., 2009; MAKSIMOWSKI et al., 2022). Muitos desses efeitos estão relacionados com a atividade antioxidante decorrente do conteúdo de compostos antioxidantes, incluindo ácidos clorogênicos, polifenóis e cafeína, que são capazes de neutralizar os radicais livres no organismo, ajudando a prevenir danos celulares e reduzir o risco de algumas doenças degenerativas não transmissíveis.

4.5.2. Parâmetros cromáticos

Um dos parâmetros de qualidade do café é a coloração, sendo os parâmetros cromáticos obtidos pelo sistema CIELab apresentados na Tabela 13. As amostras apresentam menor luminosidade, conseqüentemente maior intensidade de cor, além de valores positivos das coordenadas a^* e b^* , indicando coloração alaranjada.

Tabela 13 - Parâmetros cromáticos pelo sistema CIELab de grãos de café arábica (cv. Catuaí Vermelho) torrados e moídos, provenientes de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreado, e café arábica comercial

Procedência das amostras	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
Pleno Sol	$25,63 \pm 0,22^{a,b}$	$11,67 \pm 0,05^b$	$27,88 \pm 0,20^b$	$30,20 \pm 0,20^b$	$16,01 \pm 0,05^b$
Sombreado	$27,55 \pm 0,24^b$	$11,42 \pm 0,01^b$	$27,52 \pm 0,02^{a,b}$	$29,80 \pm 0,02^b$	$11,35 \pm 0,55^b$
Co	$25,19 \pm 0,04^a$	$11,21 \pm 0,07^a$	$28,34 \pm 0,04^a$	$30,50 \pm 0,01^a$	$8,75 \pm 0,20^a$

Co: comercial; L^* : luminosidade (0 - preto a 100 - branco); a^* : coordenada vermelho-verde; b^* : coordenada amarelo-azul; C^* : intensidade de cor; H° : ângulo de tonalidade. Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

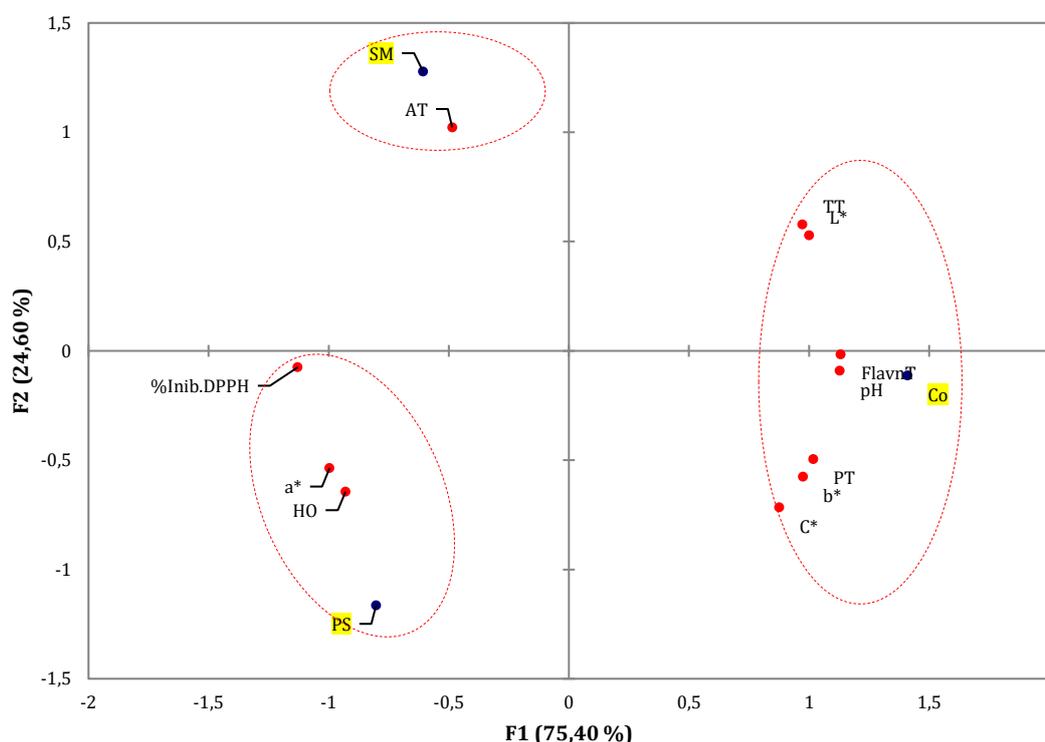
A coloração é o principal atributo que pode descrever o café, desde cru até a bebida pronta, sendo muito utilizada para determinar e descrever o grau de torra do grão (ELIAS et al., 2022). Considerando a luminosidade (L^*), com variação de 0 (preto) a 100 (branco), as amostras de café analisadas apresentam baixa luminosidade, ou seja, são amostras mais escuras, tendo o café, provenientes do sistema de cultivo a pleno sol, não apresentado diferença significativa ($p < 0,05$) quando comparado com o café comercial e o do sombreado. Os valores positivos de a^* (vermelho) e b^* (amarelo), e o ângulo da tonalidade (H°) demonstram que as amostras possuem coloração alaranjada, não havendo diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas de manejo (Tabela 13). A percepção de um café alaranjado e com intensidade de cor tem relação desejável pelo consumidor com o café arábica, independente das influências relacionadas aos hábitos pessoais e fatores culturais e socioeconômicos (ELIAS et al., 2022).

4.5.3. Análise multivariada para caracterização físico-química e cromática do café

A Figura 25 apresenta a análise de componentes principais (ACP), considerando a

influência dos parâmetros clássicos, composição fenólica, atividade antioxidante e parâmetros cromáticos, com variação significativa entre as amostras (Tabelas 10, 11 e 12, e Figura 24), na discriminação do café arábica comercial, pleno sol e sombreado. As duas primeiras componentes principais explicaram 100,0% da variância total dos dados, da qual a primeira componente (CP1) representou 75,40% e a segunda componente (CP2) 24,60% (Figura 25).

Figura 25 - Contribuição das variáveis e distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo de área de cafezal com plantio convencional a pleno sol e sombreado, em duas dimensões no sistema de coordenadas definido pela primeira e segunda componente principal



pH: potencial hidrogeniônico; AT: acidez total; PT: polifenóis totais; FlavnT: flavonóides totais; TT: taninos totais; %Inib. DPPH: percentual de inibição do DPPH*; L*: luminosidade; a*: coordenada cromática vermelho-verde; b*: coordenada cromática amarelo-azul; C*: croma; H°: ângulo da tonalidade; PS: pleno sol; SM: sombreado; Co: comercial.

Analisando os *Loadings* e *Scores* observa-se que a componente principal 1 positiva (CP1) caracterizou o café arábica comercial pela intensidade da cor amarelada (L*, C* e b*), acidez (pH) e amargor (taninos totais, flavonoides totais e taninos totais).

O café obtido do sistema sombreado (SM) foi caracterizado por PC2 positiva pela acidez total, demonstrando que a condição de cultivo com menor incidência de radiação solar não favorece a maturação das cerejas de café. PC1 negativa caracterizou o café proveniente do sistema de cultivo a pleno sol pela atividade antioxidantes (% de inibição do DPPH*), coloração avermelhada (coordenada a*) e tonalidade (H°). A separação das amostras de café dos sistemas

de cultivo pleno sol e sombreado pelos parâmetros físico-químicos e cromáticos ressalta a influência da exposição à radiação solar do cafeeiro nas características dos grãos de café.

4.5.4. Perfil de compostos bioativos do café

A composição dos compostos bioativos, majoritários no café torrado e benéficos à saúde humana, tem grande influência no estímulo ao consumo da bebida e apresentam variações em função do manejo agrônomico, condições edafoclimáticas de cultivo e processamento pós-colheita. A Tabela 14 apresenta a concentração dos principais compostos bioativos do café.

Tabela 14 - Compostos bioativos de grãos torrados e moídos de café arábica cv. Catuai vermelho cultivados a pleno sol e sombreado

Amostras	Concentração (mg 100g ⁻¹)				
	Ácido Nicotínico	Trigonelina	Cafeína	5-CQA	Ácido Cafeico
Pleno Sol	29,00 ± 0,07 ^a	451,05 ± 1,63 ^b	187,09 ± 1,67 ^a	149,47 ± 1,13 ^a	68,01 ± 0,99 ^b
Sombreado	29,13 ± 0,24 ^a	459,06 ± 2,53 ^a	179,82 ± 0,29 ^b	143,64 ± 0,23 ^b	73,80 ± 0,02 ^a

5-CQA: ácido 5-cafeioquinico. Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo teste de t-Student.

Todos os compostos estudados apresentam diferença significativa ($p < 0,05$), no grão de café torrado, em função do sistema de cultivo, a exceção do ácido nicotínico. Esse ácido (vitamina B3) está presente em maior concentração no grão torrado por ser obtido pela decomposição térmica da trigonelina (GIRMA; GURE; WEDAJO, 2020).

O sistema de condução com sombreamento preservou a trigonelina e o ácido cafeico (Tabela 14) no grão de café, que mesmo após o processo de torra apresentou valores significativamente ($p < 0,05$) superior ao café proveniente de sistema a pleno sol. A trigonelina é o segundo alcaloide do café com forte influência na percepção sensorial, pois, durante a etapa de torrefação sofre degradação formando diversos compostos voláteis derivados da piridina, pirrol e ácido nicotínico (SKOWRON et al, 2020).

Os cafeeiros cultivados a pleno sol foram capazes de produzir grãos de café, que após torrados, apresentam concentrações significativamente mais elevadas de cafeína e 5-CQA (tabela 14). A cafeína, alcaloide de ocorrência natural no café, apresenta propriedades com efeitos benéficos à saúde humana, tais como a estimulação dos receptores de adenosina no cérebro, causando efeito sobre o coração e os sistemas renal, vascular periférico e central, gastrointestinal e respiratório (SKOWRON et al, 2020). Já o 5-CQA, ácido clorogênico em maior concentração no café, é o principal composto fenólico do café com elevada ação antioxidante e capaz de inibir doenças degenerativas não transmissíveis (WU et al., 2022).

Agnoletti et al. (2019) ao avaliarem o teor de cafeína da espécie arábica observaram uma presença mais expressiva após o processo de torra. A legislação brasileira determina um teor mínimo de 0,7% de cafeína para os cafés torrados e moídos (BRASIL, 2010), estando os cafés analisados, independente do sistema de cultivo, dentro do preconizado pela Legislação. A quantidade de cafeína em grãos de café é essencialmente dependente de fatores agrônômicos, variedade da planta, etapas de plantio colheita e beneficiamento, além de aspectos genéticos e sazonais (CHENG et al., 2016).

Para a bebida de café, além desses aspectos, as variáveis de extração como, proporção água-café, moagem, temperatura de água durante preparo, tempo de preparo dentre outros, podem afetar o teor final de cafeína nas bebidas (WANG et al., 2016; ANGELONI et al., 2019).

4.5.5. Caracterização sensorial do café

Entre os atributos visuais, as três amostras de café, proveniente de cafeeiros cultivados a pleno sol e sombreamento, e comercial, não apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$). Entre os atributos olfativos, os consumidores não treinados perceberam diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre os atributos: Aroma torrado, no qual o maior percentual dessa percepção foi na amostra de café comercial e a menor foi na amostra em pleno sol, que, por sua vez, apresentou maior percentual de aroma frutado em relação às demais.

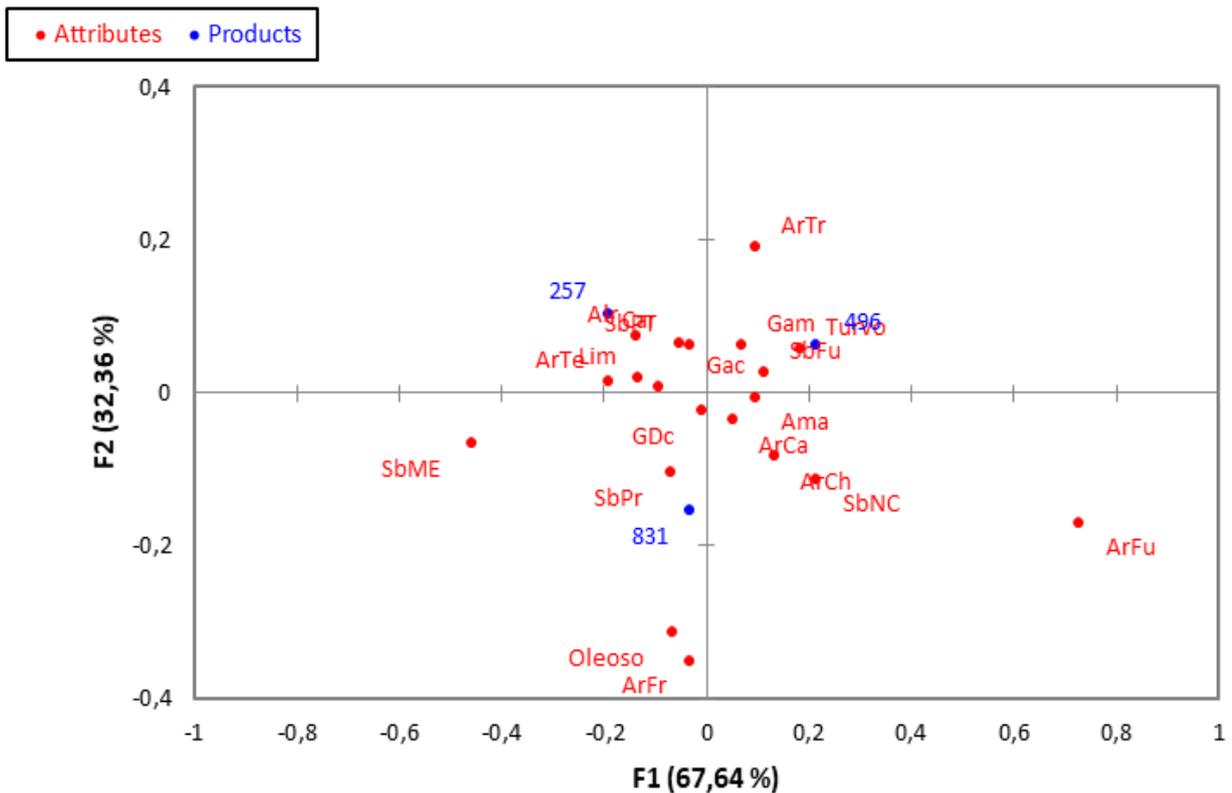
O aroma de fumaça não foi encontrado na amostra de café sombreado, e apresentou o maior percentual na amostra de café comercial e pleno sol, respectivamente. O atributo sensorial de fumaça é frequentemente associado a um aroma de queimado, o que se apresenta como uma vantagem do manejo sombreado. Ademais, as cultivares desenvolvidas neste trabalho apresentaram um sabor característico de mel de engenho, identificado no método de rede e por consumidores não treinados, e que pode significar um atributo sensorial interessante na região relacionado à tipicidade.

A análise de correspondência (AC), Figura 26, apresenta clara distinção entre as amostras, separadas nos quadrantes, e explica 100% da variância dos dados. Os consumidores não treinados foram capazes de identificar diferenças sensoriais entre as amostras de café por diferentes sistemas de manejo.

Na Figura 26, os atributos que se encontram mais próximos do número das amostras apresentam maior correlação, com isso é possível identificar uma maior concentração de atributos próximos às amostras de café produzido com sombreamento e café comercial. A amostra de café produzido a Pleno Sol, por sua vez, apresentou maior relação entre os atributos sabor persistente e gosto doce. No entanto, as amostras de café sombreado, que apresentou

sabor de pão tostado, gosto ácido; e café comercial, apresentou maior percepção de turbidez, sabor de fumaça e gosto amargo.

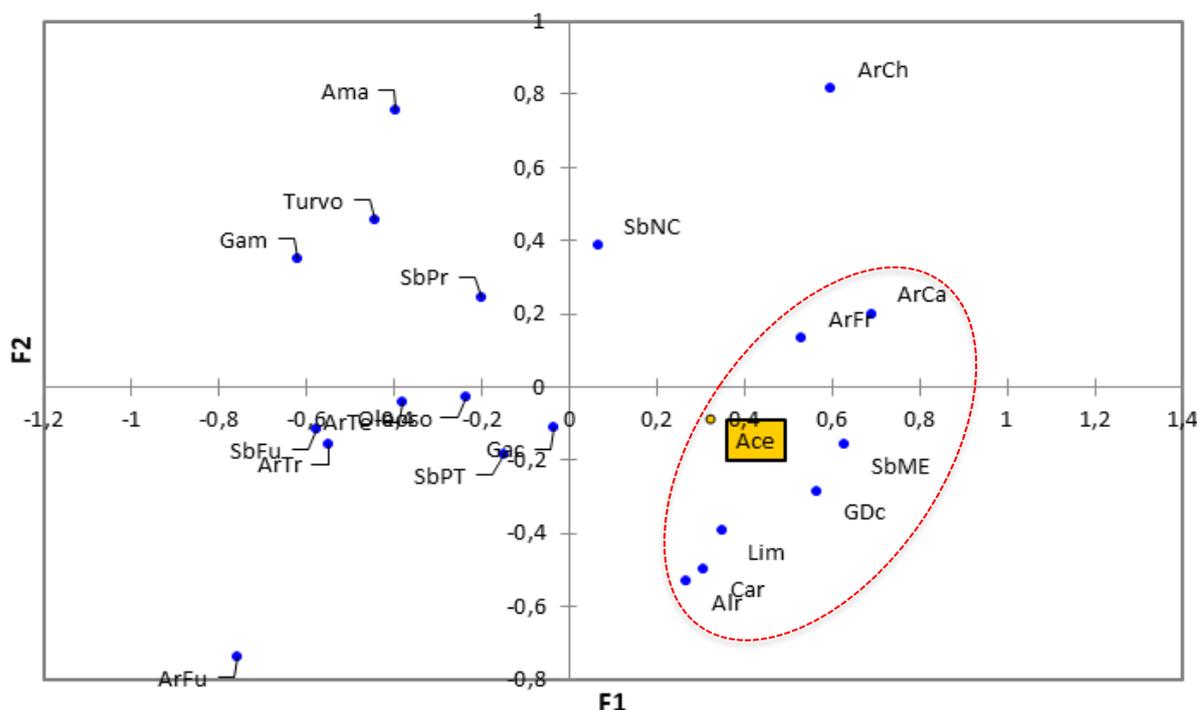
Figura 26 - Análise dos componentes principais, na qual os pontos em vermelho ilustram os atributos e os pontos em azul as amostras, sendo 257 (Café sombreado), 496 (Café comercial) e 831 (Café a pleno sol)



257: Café sob manejo sombreado; 496: Café comercial da região, *blend* de café com diferentes manejos; 831: Café sob manejo a pleno sol; Visuais – Alr: Alaranjado; Car: Caramelo; Lim: Límpido; Oleoso; Tur: Turvo; Ama: Amarronzada; Olfativos: ArTr: Aroma Torrado; ArFr: Aroma Frutado; ArFu: Aroma de Fumaça; ArCa: Aroma de Caramelo; ArCh: Aroma de Chocolate; ArTe: Aroma Terroso; Gustativos: GDc: Gosto Doce; Gac: Gosto Ácido; Gam: Gosto Amargo; SbPT: Sabor de Pão Tostado; SbPr: Sabor Persistente; SbFu: Sabor de Fumaça; SbME: Sabor de Mel de Engenho; SbNC: Sabor de Nibs de Cacau.

Os atributos que se concentram do lado oposto da aceitação estão: Gosto amargo, Turvo, Sabor persistente e Amarronzado. Embora a figura 27 apresente uma concentração desses atributos nas amostras 496 e 831, a tabela 13 não aponta diferença estatística entre as amostras para os mesmos atributos, o que condiz com uma maior presença, mas não uma diferença estatística significativa.

Figura 27 - Correlação entre atributos e grau de aceitação (Ace) entre consumidores não treinados



Ace: Aceitação. Atributos: Visuais – Alr: Alaranjado; Car: Caramelo; Lim: Límpido; Oleoso: Oleoso; Tur: Turvo; Ama: Amarronzada; Olfativos: ArTr: Aroma Torrado; ArFr: Aroma Frutado; ArFu: Aroma de Fumaça; ArCa: Aroma de Caramelo; ArCh: Aroma de Chocolate; ArTe: Aroma Terroso; Gustativos: GDC: Gosto Doce; GAc: Gosto Ácido; Gam: Gosto Amargo; SbPT: Sabor de Pão Tostado; SbPr: Sabor Persistente; SbFu: Sabor de Fumaça; SbME: Sabor de Mel de Engenho; SbNC: Sabor de Nibs de Cacau.

A bebida de café é geralmente preparada a partir da extração de café torrado e moído, por diferentes métodos de preparo os quais consistem em um processo de extração sólido-líquido, envolvendo: absorção de água pelo café moído; transferência em massa de sólidos solúveis do café moído para a água quente; e separação do extrato resultante dos sólidos (ANGELONI et al., 2019).

Os atributos que estão correlacionados ao grau de aceitação dos consumidores (Figura 27) são a cor de caramelo-alaranjado, limpidez, gosto doce relacionado ao sabor de mel de engenho, aroma frutado e aroma de caramelo. Por sua vez, no quadrante oposto, estão os atributos menos aceitos pelos consumidores, como a bebida turva, amarronzada, com gosto amargo e sabor persistente.

Os dados obtidos por meio da análise sensorial aceitaram uma das hipóteses dessa pesquisa, na qual o consumidor não treinado pôde identificar a diferença entre os atributos sensoriais dos cafés que são da mesma cultivar (cv. Catuaí vermelho) e da mesma região, entretanto, cultivados sob sistema de manejo agrônômico diferente, ou seja, convencional (pleno sol) e agroflorestal (sombreado).

5. CONCLUSÕES

O sistema de manejo teve influência em alguns atributos do solo, como a condutividade hidráulica (K_{sat}) que foi significativamente maior no sistema sombreado em comparação ao pleno sol, o que indica uma melhor capacidade de drenagem no manejo agroflorestal nas duas profundidades estudadas (0-0,15m e 0,15-0,30m), consonante com o maior percentual de macroporos (poros de drenagem), apesar do maior percentual de porosidade total ser identificado no solo sob cultivo convencional.

A umidade gravimétrica (U) também foi significativamente maior no sistema agroflorestal. A temperatura do solo foi mais baixa no sistema agroflorestal, com diferença de 11,3 °C entre os sistemas no período mais quente do dia. Para os demais atributos físicos, não houve diferença significativa para a qualidade estrutural do solo.

O consumidor não treinado pôde identificar, por meio da análise sensorial do café, a diferença entre os atributos sensoriais da bebida oriunda de mesma variedade e região, sob diferentes sistemas de manejo. O grau de aceitação foi maior na amostra de café cultivado a pleno sol (convencional), sendo os atributos com maior grau de aceitação, o gosto doce e sabor de mel de engenho.

Os atributos físicos do solo não influenciaram diretamente na qualidade da bebida, sendo necessário mais estudos para avaliar outras variáveis possivelmente mais correlacionadas.

REFERÊNCIAS

- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café, FAQ-Portaria 570, **PADRÃO OFICIAL DE CLASSIFICAÇÃO DO CAFÉ TORRADO** (2019). Link de Acesso: https://www.abic.com.br/wp-content/uploads/2022/07/abicfaq_portaria-570.pdf. Visto em: 02 de abr. de 2024.
- AGNOLETTI, B. Z.; OLIVEIRA, E. C. S.; PINHEIRO, P. F. SARAIVA, S. H. Discriminação de Café Arábica e Conilon Utilizando Propriedades Físico-Químicas Aliadas à Quimiometria. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 3, 2019. DOI:10.21577/1984-6835.20190057
- ALFARO-VILLATORO, M. A. Produção de café em sistema agroflorestal. **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 36p. (Documentos, 187), 2004. ISBN: 978-85-7035-420-4
- ALAMRI, E.; ROZAN, M.; BAYOMY, H. A study of chemical Composition, Antioxidants, and volatile compounds in roasted Arabic coffee. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, p.3133–3139, 2022. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.03.025
- ALMEIDA, B. G.; SILVA, A. P.; RAINE, S. R.; FIGUEIREDO, G. C. Evaluation of automotive varnish as a coat Eng for density measurements of soil clods. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 73:449–452. 2009. DOI: 10.2136/sssaj 2008.0191
- ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Porosidade. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017a. p.82-94. ISBN: 978-85-7035-771-7
- ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília:** Embrapa Informação Tecnológica, 2017b. p.65-75. ISBN: 978-85-7035-771-7.
- ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação.** Embrapa Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas BA.p.31-33 2010. ISBN: 978-85-7158-024-4
- ALMEIDA-COUTO, J. M. F., RESSUTE, J. B., BELLUCO, C. Z., NASCIMENTO, M. G., ZAGO, I. C. C., COSTA, J. C. M., SILVA, J. M., MADRONA, G. S. Discriminação da cor e categorização do padrão de torra de cafés torrados e moídos comerciais. **Brazilian Journal of Development**, 6, (2), 7863-7869. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-188>
- ANDRADE, A. D.; FARIA, R. de O.; ALONSO, D. J. C.; FERRAZ, G. A. e S.; HERRERA, M. A. D.; SILVA, F. M. da. Spatial variability of soil penetration resistance in coffee growing. **Coffee Science** - ISSN 1984-3909, [S. I.], v. 13, n. 3, p. 341–348, 2018. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1456>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ANGELONI, G.; GUERRINI, L.; MASELLA, P.; BELLUMORI, M.; DALUISO, S.; PARENTI, A.; INNOCENTI, M. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods. **Food Research International**, v. 116 p. 1327 – 1335, 2019.

ANGELONI, G.; GUERRINI, L.; MASELLA, P.; BELLUMORI, M.; PARENTI, A.; INNOCENTI, M. Characterization and comparison of cold brew and cold drip coffee extraction methods. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 99 (1), 391 – 399. 2019.

A.O.A.C. - Association of Official Methods Analytical Chemists. **Official methods of analysis**. Virgínia, 1995.

BARRETO, A. B., TAVARES, D. D., DA SILVA, P. L. F., DE OLIVEIRA, F. P., MARTINS, A. F., PEREIRA, W. E. Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 7(3). 2019. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3575228>

BEAR, J. **Dynamics of fluid in porous media**. Soil Science, v 120 (2), p. 162-163. 1975. ISBN 044400114X, 9780444001146

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>

BRASIL. **Regulamento técnico para o café torrado em grão e para o café torrado e moído**. Brasília. <http://sistemaswebagricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=794116535>. (2010)

BRIZZI, R. R.; PORTOCARRERO, H.; SOUZA, A. P.; COSTA, A. J. S. T.; RANGEL, L. A. Avaliação macro e microestrutural de solos sob diferentes usos a partir de análises físicas, microscopia eletrônica e espectroscopia por energia dispersiva. Raega - **O Espaço Geográfico em Análise**, v.46, n.1, p.25–40, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v46i1.53023>

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3–22, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

BSCA - Associação Brasileira de Cafés Especiais. **Regiões produtoras de cafés especiais**. Disponível em: <https://www.bsca.com.br/page/regioes>. Acesso em: 10 jul. 2024.

CAMPANHA, M. M., SANTOS, R.H.S., DE FREITAS, G.B., MARTINEZ, H.E.P., JARAMILLO-BOTERO, C. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais cultivados em sistema agroflorestral e em monocultura, na Zona da Mata MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 805-812, set./out. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000500004>

CARNEIRO, M. A. C., SOUZA, E. D., REIS, E. F., PEREIRA, H. S., AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:147-157, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000100016

CARVALHO, L. C. C. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café**. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

CARVALHO, E.R., REZENDE, P.M.de, ANDRADE, M.J.B., PASSOS, A.M.A., OLIVEIRA, J.A. Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agronômicas da soja e nutrientes no solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 930-939, out-dez, 2011. ISSN 1806-6690.

CHENG, B., FURTADO, A., SMYTH, H. E. HENRY, R. J. Influence of genotype and environment on coffee quality. **Trends in Food Science & Technology**, 57, 20-30. 2016.

CLARKE, R.; VITZTHUM, O.G. **Café: desenvolvimentos recentes**. John Wiley e Filhos, 2001.

COELHO, M.S., MENDONÇA, E.D., LIMA, P.C., GUIMARÃES, G.P., & CARDOSO, I.M. Qualidade da matéria orgânica de solos sob cultivo de café consorciado com adubos verdes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1576-1586, 2013.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600014>

COLAZO, J.C.; BUSCHIAZZO, D. The Impact of Agriculture on Soil Texture Due to Wind Erosion. **Land Degradation & Development**, v.26, p. 62-70, 2014.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2297>

COLLIER, L. S.; KIKUCHI, F. Y.; BENÍCIO, L. P. F.; SOUZA, S. A. de. Consórcio e sucessão de milho e feijão-de-porco como alternativa de cultivo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 306–313, 2011. Disponível em:
<https://revistas.ufg.br/pat/article/view/8706>. Acesso em: 8 jul. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, Brasília, DF, v. 10, n. 4 quarto levantamento, dez 2023. ISSN 2318-7913

CORDOBA, N., PATAQUIVA, L., CORALIA, O., MORENO, F. L., RUIZ, R. Y. Effect of grinding, extraction time and type of coffee on the physicochemical and flavour characteristics of cold brew coffee. **Scientific reports**, 9(1), 1-12.2019.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J. H; TOPP, G. C. (Ed). *Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods*. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p. 671-720, 2002.

DEWANTO, V.; WU, X.; ADOM, K. K.; LIU, R. H. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 10, p. 3010-3014, 2014. DOI: 10.1021/jf0115589

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; TIVET F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T.M.; GONÇALVES, D.R.P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment** 621 1559–1567, 2018. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.10.072

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N.F.B.; HARMS, M.G.; MIARA, S.; BAVOSO, M.A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C.Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. **R. Bras. Ciência do Solo**, 35:437-445, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200013>

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M. In: **Sistema plantio direto no Brasil** [livro eletrônico]. -- 1. ed. -- Passo Fundo, RS : Aldeia Norte Editora, 2022. p.13-52. ISBN 978-65-87818-01-6.

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M. Indicadores da fertilidade biológica do solo. **REVISTA PLANTIO DIRETO**. v. 1, p. 4-7, 2020. Disponível em: <https://plantiodireto.com.br/artigos/49>. Acesso em: 10 jul. 2024.

DE SOUZA, J. M.; PEREIRA, L. R. Capacidade de água disponível no solo em diferentes usos e amostras de solo. **Water Resources and Irrigation Management-WRIM**, v. 7, n. 2-3, p. 14-19, 2018. ISSN 2316-6886

DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. 3.ed. São Paulo: Companhia da Letras, 1997. ISSN 1984- 5634

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Res.**, New York, v.31, n. 2, p. 139-147, 1985. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6)

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G.L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.6, p.1836-1844, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600018>

DUTCOSKY, SILVIA DEBONI. **Análise Sensorial de Alimentos** / Silvia Deboni Dutcosky. 3. ed. rev. e ampl. – Curitiba: Champagnat, 2011. 426 p. 21 cm. ISBN 978-85-54945-47-3

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000300030>

ELIAS, A.M.T., SILVA, M.E.S., NETO, V.F.M., SANTOS, W.W.V., OLIVEIRA, R.L., PORTO, T.S., SILVA, S.P. Utilização do planejamento fatorial para avaliação do impacto do processo de torrefação no perfil físico-químico de blends de café. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, e174111133245, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33245>

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529–538, 1995. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. - Brasília, DF. 2018. 356 p. ISBN: 978-85-7035-817-2

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Produção mundial de café para safra 2023**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/88547345/producao-mundial-de-cafe-para-safra-2023-2024-totaliza-1714-milhoes-de-sacas-de-60kg>. (2023). Acesso em: 11 jul. 2024.

FARAH, A. (Ed.). 2019. **Coffee: production, quality and chemistry**. Cambridge: Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/9781782622437. Visto em: 17 de junho de 2024.

FARAHANI, E., EMAMI, H., KELLER, T., FOTOVAT, A., KHORASSANI, R., 2018a. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I: Results of an Iranian soil. **International Agrophysics**, 32: 57 – 67. DOI: 10.1515/intag-2016-0091.

FARAHANI, E., EMAMI, H., KELLER, T. 2018b. Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, 32: 69–80. DOI: 10.1515/in-tag-2016-0092

FARAHANI, E., EMAMI, H., FOTOVAT, A., KHORASSANI, R., 2019. Effect of different K:Na ratios in soil on dispersive charge, cation exchange and zeta potential. **European Journal of Soil Science**, 70: 311–320. DOI: 10.1111/ejss.12735

FENNEMA, O. R.; PARKIN, K. L.; DAMODARAN, S. **Química de Alimentos de Fennema**, 4a edição. Editora Artmed, 2010.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado técnico, 69).

FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; MORAES, S. O.; ALMEIDA, B. G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: procedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil aggregates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.35, n.2, p.373-387, 2011.

FONTANA, A.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K.; ALMEIDA, B. G.; CORREA, J. C. O.; OLIVEIRA, E. M. Preparo de amostras e separação de terra fina, cascalho e calhaus. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.21-27. ISBN: 978-85-7035-771-7.

FUKUSHIMA, Y., O., T.; YONEKAWA, Y.; YONEMOTO, K.; AIZAWA, H.; MORI, Y., WATANABE, M.; TAKEUCHI, M.; HASEGAWA, M.; TAGUCHI, C.; KONDO, K. (2009). Coffee and green tea as a large source of antioxidant polyphenols in the Japanese population. **Journal of agricultural and food chemistry**, 57(4), 1253–1259. <https://doi.org/10.1021/jf802418j>

GIOVANELLI, G.; BURATTI, S. Comparison of polyphenolic composition and antioxidant activity of wild Italian blueberries and some cultivated varieties. **Food Chemistry**, v. 112, n. 4, p. 903–908, 15, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.066>

GIRMA, B.; GURE, A.; WEDAJO, F. Influence of altitude on caffeine, 5 - caffeoylquinic acid, and nicotinic acid contents of Arabica coffee varieties. **Journal of Chemistry**, v. 2020, n. 1, p. 3904761, 2020.

HAILE, M.; Bae, H.M.; KANG, W.H. Comparison of the antioxidant activities and volatile compounds of coffee beans obtained using digestive bio-processing (elephant dung coffee) and commonly known processing methods. **Antioxidants**, v. 9, n. 5, p. 408, 2020.

HEO, J., CHOI, K. S., WANG, S., ADHIKARI, K., & LEE, J. (2019). Cold brew coffee: Consumer acceptability and characterization using the check-all-that-apply (CATA) Method. **Foods**, 8(8). <https://doi.org/10.3390/foods8080344>

HILLEL, D. **Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations**. New York: Academic Press, 1998. 771p.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam: Elsevier, 2003. 494 p

IAC - Instituto Agronômico de Campinas - **Histórico do desenvolvimento do cultivo do café no Brasil**. / Alcides Carvalho. P.8. 2007 (Documentos IAC, 34). ISSN: 1809-7693

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de café em Pernambuco**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cafe/pe>. Acesso em: 10 jul. 2024.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados meteorológicos**. Brasília-DF (2024). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 11 jul. 2024.

IPA – INSTITUTO AGRONOMICO DE PERNAMBUCO. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 3 ed. 2008 p.131. ISBN 978-85-60827-01-5

JÁCOME, M. G. O.; MANTOVANI, J. R.; SILVA, A. B. da; REZENDE, T. T.; LANDGRAF, P. R. C. Soil attributes and coffee yield in an agroforestry system. **Coffee Science** - ISSN 1984-3909, [S. l.], v. 15, p. e151676, 2020. DOI: 10.25186/v15i.1676. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1676>. Acesso em: 14 jul. 2024.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). **Soil Science Society American Journal**, 61:4-10, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. **Aggregate stability and size distribution**. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, v. 5, p. 425-442, 1986.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; BASEGGIO, M. Ensaio de Proctor normal—análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 12, n. 2, p. 199-203, 2013. ISSN 1676-9732

KHATOUNIAN, C. A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 2001. ISBN 85-88581-26-4 3 A

- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, 304(5677), 1623- 627.2004
https://www.researchgate.net/publication/8515631_Soil_Carbon_Sequestration_Impacts_on_Global_Climate_Change_and_Food_Security
- MAKSIMOWSKI, D.; POCHURA, N.; OZIEMBLOWSKI, M.; NAWIRSK-
OLSZARNSKA, A.; SZUMMY, A. Coffee Roasting and Extraction as a Factor in Cold Brew Coffee Quality. **Applied Sciences**, v. 12, p. 2582,2022.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. ISBN, 8531800471, 9788531800474
- MARCELO, V. F.; ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUZA, W. L. S. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliacrilamida: qualidade física ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. Rio de Janeiro, n 42, p. 12-25, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820160009>
- MARTINS, P. M. M., BATISTA, N. N., MIGUEL, M. G. D. C. P., SIMÃO, J. B. P., SOARES, J. R., SCHWAN, R. F. (2020). Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees. **Food research international** (Ottawa, Ont.), 129, 108872. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108872>
- MCCAIN-KEEFER, H. R., MEALS, S., & DRAKE, M. A. (2020). The sensory properties and consumer acceptance of cold brew coffee. **Journal of Sensory Studies**, 35(6). <https://doi.org/10.1111/joss.12604>
- MELLONI, R.; COSTA, N.R.; MELLONI, E.G.P.; LEMES, M.C.S.; ALVARENGA, M.I.N.; NETO, J.N. Sistemas agroflorestais cafeeiro-araucária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 784-795, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832392>
- MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria Orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.
- MICHELMAN, J., CARLSEN, Z. The New Rules of Coffee – A Morden Guide for Everyone. **Ten Speed Press**, 159, 63. 2018. ISBN 0399581634. 9780399581632
- MONTEIRO, M. C.; TRUGO, L. C. Determinação de compostos bioativos em amostras comerciais de café torrado. **Química nova**, v. 28, p. 637-641, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000400016>
- NABAVINIA, F., EMAMI, H., ASTARAE, A., LAKZIAN, A. Effect of tannery wastes and biochar on soil chemical and physicochemical properties and growth traits of radish. **Int. Agrophys.**, (2015).29(3), 333-339. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0040>
- NIMMO, J.R., PERKINS, K. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), **Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods, Soil Science Society of America Book Series 5**, SSSA, Madison, p. 317 - 328. 2002.

NUNES, A. L. P.; CORTEZ, G.L.S; ZARO, G.C.; ZORZENONE, T.O.; MELO, T.R. Soil morphostructural characterization and coffee root distribution under agroforestry system with *Hevea Brasiliensis*. **Scientia Agricola**, v. 78, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0150>

OIC-Programa de melhoria da qualidade do café. **International Coffee Organization** - London 2019 - Disponível em: <https://www.ico.org/pt/sustainable_coffee_p.asp>. Acesso em: 15 jun.2022.

PAIS, P.S.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; DOS SANTOS, G.A.; DIAS, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALCANTARA, E.N. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1949-1957, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600011>

PORGALI, E.; BÜYÜKTUNCEL, E. Determination of phenolic composition and antioxidant capacity of native red wines by high performance liquid chromatography and spectrophotometric methods. **Food Research International**, v. 45, n. 1, p. 145–154, jan. 2012. DOI:10.1016/j.foodres.2011.10.025

POISSON, L., BLANK, I., DUNKEL, A., HOFMANN, T. The Roast – Creating the Beans' Signature. **The Craft and Science of Coffee**. Academic Press, 273-309. (2017) ISBN: 978-0-12-803520-7

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 549p. 2006. ISBN: 85-213-0004

REICHERT, J. M.; REINERT, D.J; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente** 27; p. 029-048, 2003.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity pressure head relationship. **Ground Water Monitoring Review**, v.6, p.84-95, 1986. DOI:10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Constant head well permeameter (vadose zone). In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. Eds, *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*, p. 844-858. **Soil Science Society of America, Inc.**, Wisconsin, 2002.

RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, v.84, p.355–363, 2004.

RODRÍGUEZ-GARAY, F. A.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; RUBIANO-SANABRIA, Y. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo no rendimento e qualidade de café. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 17, n. 2, p. 237-254, 2016.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE J.H, TOPP G.C, editors. SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4 Physical methods. Madison: **Soil Science Society of America**; 2002. p.692-698

SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SIQUEIRA, J. O. Avaliação da eficiência simbiótica de fungos endomicorrízicos para o cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.221-228, 1995.

SALGADO, B. G.; MACEDO, R.L.G.; ALVARENGA, M.I.N.; VENTURIN, N. Avaliação da fertilidade dos solos de sistemas agroflorestais com cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em Lavras-MG. **Revista Árvore**, v. 30, p. 343-349, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-6762200600030000>.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 100p. ISBN 978-85-86504-03-7

SANTOS, T. R.; TURCATO, C.S.; CASTOR, G.R.; BRAVIN, N.P. Avaliação dos atributos físicos do solo nos sistemas de produção de cafeeiros fertirrigado, irrigado, sequeiro submetidos a fertilização potássica. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019. ISSN: 1984-9249

SANTOS, W.W.V., COUTO, E.L., SILVA, F.M., ROCHA, M.E.M., SILVA, M.S.L., ALVES, R.O., SILVA, S.P. Efeito do tempo de extração de café a frio nas características físico-químicas da bebida cold brew. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, e335111536948, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36948>

SANTOS, W.W.V., ELIAS, A.M.T., DONATO, M.V.L.C., MEDEIROS, A.L.T., BARROS, D.N., SILVA, M.E.S., SILVA, S.P. Influência das condições de torra e do processo extrativo em blends de café. **Brazilian Journal of Development** Curitiba, v. 6, n. 5, p.25079-25092, may. 2020. ISSN 2525-8761

SILVA, E. A.; DAMATTA, F. M.; DUCATTI, C.; REGAZZI, A. J.; BARROS, R. S. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, v. 89, p. 349-357, 2004.

SILVA, R. F. **Comportamento físico-hídrico de solos submetidos ao preparo e manejo sob lavoura cafeeira** / Rodrigo Fonseca da Silva. - 2018. 80 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

SILVA, R. F. Changes in soil profile hydraulic properties and porosity as affected by deep tillage soil preparation and Brachiaria grass intercropping in a recent coffee plantation on a naturally dense Inceptisol. **Soil and Tillage Research**, v. 213. 2021.

SIX, J., CONANT, R. T., PAUL, E. A., & PAUSTIAN, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, 241(2), 155-176. 2002. DOI: 10.1023/A:1016125726789

SCHWENDENER, C. M., LEHMANN, J., DE CAMARGO, P.B., LUIZAO, R.C.C., FERNANDES, E.C.M. Nitrogen transfer between high- and low-quality leaves on a nutrient-poor Oxisol determined by ^{15}N enrichment. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 787-794, Apr. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.10.011>

SKOWRON, M. J.; FRANKOWSKI, R.; ZGOŁA-GRZEŚKOWIAK, A. Comparison of methylxantines, trigonelline, nicotinic acid and nicotinamide contents in brews of green and processed Arabica and Robusta coffee beans – Influence of steaming, decaffeination and roasting processes on coffee beans. **LWT - Food Science and Technology**, v. 125, 129334, 2020.

SOUZA, G. S. de.; DAN, M. L.; ARAÚJO, J. B. S. Qualidade física do solo sob café Conilon consorciado e em monocultivo. **Coffee Science**, v.11, n. 2, p. 180. 2015. ISSN 1984-3909 2

SOUZA, G.S.; MARTINS, R.L.; SARNAGLIA, G.R.; FONSECA, S.B.; GONÇALVES, P.T.; PINHO, L.G.R. Avaliação de atributos físicos do solo em áreas sob diferentes usos e manejos na bacia do Rio Doce. **Revista Ifes Ciência**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 01–11, 2024. DOI: 10.36524/ric.v10i1.2262. Disponível em: <https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/2262>. Acesso em: 3 jul. 2024.

SOUZA DE OLIVEIRA, K. A.; DANIEL, D. F.; DALLACORT, R.; BARBIERI, J. D.; TIEPPO, R. C.; DE ARAÚJO, D. V. Influência da cobertura de braquiária na temperatura do solo cultivado com milho verde. **Acta Iguazu**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 105–125, 2019. DOI: 10.48075/actaiguaz.v8i3.20652. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/20652>. Acesso em: 8 jul. 2024.

SOUSA E SILVA, J.; LOPES, R.P.; DONZELES, S.M.L.; COSTA, C.A. **Infraestrutura mínima para produção de café com qualidade: Opção para a cafeicultura familiar** - Brasília, DF: Consórcio Pesquisa Café, 2011. p.45-52 - ISBN: 978-85-61519-01-8

TEIXEIRA, O. R., PASSOS, F. R., MENDES, F. Q. Qualidade físico-química e microscópica de 14 marcas comerciais de café torrado e moído. **Coffee Science**, 11, 396-403. 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/13711>. Acesso em 13 Jul. 2024

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; SALDANHA, M. F. C. pH do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017a. Parte II - cap. 1, p. 199-202. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; SALDANHA, M. F. C. Fósforo disponível. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017b. Parte II - cap. 2, p. 203-208. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; BIANCHI, PÉREZ, D, V. S.R.; SALDANHA, M. F. C.; Cátions trocáveis. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017c. Parte II - cap. 3, p. 209-232. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; SALDANHA, M. F. C.; PÉREZ, D, V. Complexo Sortivo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017. Parte II - cap. 6, p. 240-244. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. 574p. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TIITTO-JULKUNEN, R. Phenolic constituents in the leaves of Northern Willows: Methods for the analysis of certain phenolics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.33, n.2, p.213-217, 1985. doi:10.1021/jf00062a013

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; SOUZA, C. A. S. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p.1039-1047, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600008>

THEODORO, V. C. A.; MENDES, A. N. G.; GUIMARÃES, R. J. Resposta de lavouras cafeeiras em transição agroecológica a diferentes manejos de solo. **Coffee Science**, v. 4, n. 1, p. 56-66, 2009.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>.

TRUGO, L.C.; MACRAE, R. A study of the effect of roasting on the chlorogenic acid composition of coffee using HPLC. **Food Chemistry** v. 15, p. 219-227, 1984. DOI:10.1016/0308-8146(84)90006-2

VAN LIER, Q. J. **Física do solo - baseada em processos**. 1 ed., 2020. v.1. 413p. ISBN: 978-65-00-11263-4

VERÍSSIMO, C. M.; MORAIS, S. M.; LIMA, L. L. A.; PEREIRA, G. E.; MACIEL, M. I. S. A short training as an enhancer of sensory ability: The case of red wine consumers. **Journal of Sensory Studies**, e12629, 2020. DOI: 10.1111/joss.12629

VIANA, J.H.M.; TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; Densidade de partículas. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2017. Parte I - cap. 8, p. 76-81. ISBN: 978-85-7035-771-7.

VIEIRA, F. F.; DALLACORT, R.; BARBIERI, J. D.; DALCHIAVON, F. C.; DANIEL, D. F. Temperatura e umidade do solo em função do uso de cobertura morta no cultivo de milho. **Científica**, Dracena, SP, v. 48, n. 3, p. 188–199, 2020. DOI: 10.15361/1984-5529.2020 v48 n3 p188-199. Disponível em:

<https://cientifica.dracena.unesp.br/index.php/cientifica/article/view/1264>. Acesso em: 8 jul. 2024.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science, Baltimore**, v. 37, p. 29-38, 1934.

WANG, L.; DING, L.; XUE, C.; MA, S.; DU, Z.; ZHANG, T.; LIU, J. Corn gluten hydrolysate regulates the expressions of antioxidant defense and ROS metabolism relevant genes in H₂O₂-induced HepG2 cells. **Journal of Functional Foods**, v.42, p.362-370, 2018.

WANG, X., WILLIAM, J., FU, Y., LIM, L-T. Effects of capsule parameters on coffee extraction in single-serve brewer. **Food Research International**, . 89(1), 797-805.2016.

WATTS, C.W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, p. 73- 84, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>

WU, H., GU, J., BK, A., NAWAZ, M. A., BARROW, C. J., DUNSHEA, F. R., & SULERIA, H. A. R. (2022). Effect of processing on bioaccessibility and bioavailability - of bioactive compounds in coffee beans. In **Food Bioscience** (Vol. 46). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101373>

YADESSA, A., BURKHARDT, J., BEKELE, E., HUNDERA, K., GOLDBACH, H.E. (2020). The major factors influencing coffee quality in Ethiopia: The case of wild Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) from its natural habitat of southwest and southeast afro-montane rainforests. **African Journal of Plant Science**, 14, 213-230. DOI:10.5897/ajps2020.1976.

YEOMANS, J.C., BREMMER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, p.1467-1476, 1988.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Glossário dos termos descritores da Ficha do CATA

Atributo	Definição
VISUAL	
Turvo	Aquilo que não é transparente, nítido ou límpido
Límpido	Aquilo que é claro, transparente
Coloração amarronzada	Cor que pode ser do marrom mais claro ao mais forte
Coloração alaranjada	Cor que pode ser do laranja mais claro ao mais forte
OLFATIVO	
Aroma de bombom de caramelo	Aroma de calda de açúcar fervendo, usado para produção de um doce conhecido como Embaré
Aroma de especiarias	Aroma acentuado devido à presença de óleos essenciais ex: cravo, canela, anis
Aroma torrado	Aroma de algo que tostou um pouco e que acabou de sair do forno ex: pão torrado
Aroma de mel de engenho/melaço	Aroma marcante e doce proveniente da cana de açúcar não fermentada
Aroma de chocolate ao leite	Sabor de cacau menos presente por causa do leite que traz doçura
Aroma de baunilha	Aroma doce e balsâmico bastante suave
Aroma terroso	Os aromas minerais e orgânicos lembram terra molhada
Aroma de doce de leite	Aroma lácteo e adocicado
Aroma de castanhas	Aroma adocicado e marcante que lembra as demais oleaginosas como nozes e amendoim
GUSTATIVO	
Gosto amargo	Gosto básico característico da cafeína
Gosto doce	Gosto levemente adocicado, como de bebidas com açúcar
Gosto ácido	Gosto característico do limão, causa salivação na boca
Textura aveludada	Sensação macia, untuosa e viscosa na boca, como de um veludo
Sensação de adstringência	Sensação de travor e aspereza na boca, como de um caju
Sabor persistente	Sabor que permanece na boca após 20s após engoli-lo
Sabor de mel de engenho	Sabor marcante e doce proveniente da cana de açúcar não fermentada
Sabor de bombom de caramelo	Sabor de calda de açúcar fervendo, usado para produção de um doce conhecido como Embaré
Sabor de chocolate ao leite	Sabor de cacau menos presente por causa do leite que traz a doçura
Sabor de castanhas	Sabor adocicado e marcante que lembra as demais oleaginosas como nozes e amendoim
Sabor de fumaça	Sabor defumado, encontrado em alimentos grelhados
Sabor de especiarias	Sabor acentuado devido à presença de óleos essenciais ex: cravo, canela, anis
Sabor de doce de leite	Sabor lácteo e adocicado
Sabor torrado	Sabor de algo que tostou um pouco e que acabou de sair do forno
Encorpado	Na língua, o café encorpado tem peso pronunciado, viscosidade e sensação amanteigada

APÊNDICE B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Ficha CATA

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Convidamos V. Sa. a participar da pesquisa **Condição estrutural de solos sob cultivo de *Coffea arabica* L. em sistema agroflorestal e convencional**, sob responsabilidade do pesquisador **Paulo Henrique Ribeiro Marques** e sua equipe, coorientada pela Professora Luciana Leite de Andrade Lima tendo por objetivo de Medir as variáveis sensoriais do café arábica sob diferentes condições de cultivo.

Para realização deste trabalho usaremos o seguinte método: aplicação de ficha de avaliação de cafés. Os testes serão realizados no Laboratório de Análise Sensorial de Alimentos do DCD/UFRPE, e conduzidos em cabines individuais. As amostras serão servidas à temperatura tradicional de serviço, em copos de café descartáveis, contendo aproximadamente 25 mL da bebida, acompanhados de água e bolacha sem sal para limpeza do palato.

Esclarecemos que manteremos em anonimato, sob sigilo absoluto, durante e após o término do estudo, todos os dados que identifiquem o sujeito da pesquisa usando apenas, para divulgação, os dados inerentes ao desenvolvimento do estudo. Informamos também que após o término da pesquisa, serão destruídos de todo e qualquer tipo de mídia que possa vir a identificá-lo tais como filmagens, fotos, gravações, não restando nada que venha a comprometer o anonimato de sua participação.

Quanto aos riscos e desconfortos, caso haja alguma reação alérgica não identificada aos compostos utilizados ou leve desconforto o mesmo será sanado com a ingestão de água disponibilizada no momento da análise e caso a mesma se agrave o participante será encaminhado para uma unidade médica de atendimento mais próxima.

Os benefícios esperados com o resultado desta pesquisa são a divulgação e esclarecimento sobre a atual variedade de café existente em Pernambuco.

O(A) senhor(a) terá os seguintes direitos: a garantia de esclarecimento e resposta a qualquer pergunta; a liberdade de abandonar a pesquisa a qualquer momento sem prejuízo para si ou para seu tratamento (se for o caso); a garantia de que em caso haja algum dano a sua pessoa (ou o dependente), os prejuízos serão assumidos pelos pesquisadores ou pela instituição responsável. Inclusive, acompanhamento médico e hospitalar (se for o caso). Caso haja gastos adicionais, eles serão absorvidos pela pesquisadora.

RibeiroMarques, R. Dom Manoel de Medeiros, s/n – Dois Irmão, Recife/PE, fone: (81) 3320-6284, e-mail: phr.marques@gmail.com; ou a orientadora Luciana Leite de Andrade Lima, R. Dom Manoel de Medeiros, s/n – Dois Irmão, Recife/PE, fone: (81) 3320-6536, e-mail: lucianalima.ufpe@gmail.com.

Caso suas dúvidas não sejam resolvidas pelos pesquisadores ou seus direitos sejam negados, favor recorrer ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Pernambuco, localizado à Av. Agamenon Magalhães, S/N, Santo Amaro, Recife-PE, telefone 81-3183-3775 ou ainda através do e-mail comite.etica@upe.br.

luciana.lalima@ufrpe.br [Mudar de conta](#)



Não compartilhado

* Indica uma pergunta obrigatória

Após ter recebido todos os esclarecimentos e ciente dos meus direitos, concordo em participar desta pesquisa, bem como autorizo a divulgação e a publicação de toda informação por mim transmitida, exceto dados pessoais, em publicações e eventos de caráter científico. Desta forma, assino este termo, juntamente com a pesquisadora, em duas vias de igual teor, ficando uma via sob meu poder e outra em poder da pesquisadora. *

Sim, autorizo

Não autorizo

Nome *

Sua resposta

APÊNDICE C - Ficha de avaliação do CATA (Check-All-That-Apply)

12/07/2024, 13:24

Ficha CATA

RibeiroMarques, R. Dom Manoel de Medeiros, s/n – Dois Irmão, Recife/PE, fone: (81) 3320-6284, e-mail: phr.marques@gmail.com; ou a orientadora Luciana Leite de Andrade Lima, R. Dom Manoel de Medeiros, s/n – Dois Irmão, Recife/PE, fone: (81) 3320-6536, e-mail: lucianalima.ufpe@gmail.com.

Caso suas dúvidas não sejam resolvidas pelos pesquisadores ou seus direitos sejam negados, favor recorrer ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade de Pernambuco, localizado à Av. Agamenon Magalhães, S/N, Santo Amaro, Recife-PE, telefone 81-3183-3775 ou ainda através do e-mail comite.etica@upe.br.

luciana.lalima@ufrpe.br [Mudar de conta](#)



Não compartilhado

*** Indica uma pergunta obrigatória**

Após ter recebido todos os esclarecimentos e ciente dos meus direitos, concordo em ***** participar desta pesquisa, bem como autorizo a divulgação e a publicação de toda informação por mim transmitida, exceto dados pessoais, em publicações e eventos de caráter científico. Desta forma, assino este termo, juntamente com a pesquisadora, em duas vias de igual teor, ficando uma via sob meu poder e outra em poder da pesquisadora.

Sim, autorizo

Não autorizo

Nome *****

Sua resposta

Próxima

Limpar formulário

Olfativo *

*

- Aroma Terroso
- Aroma Torrado
- Aroma de Chocolate
- Aroma de Caramelo
- Aroma Frutado
- Aroma de Fumaça

Gustativo*

- Sabor de Fumaça
- Sabor Persistente
- Gosto Doce
- Sabor de Nibis de Cacau
- Sabor de Pão Tostado
- Sabor de Mel de Engenho
- Gosto Ácido
- Gosto Amargo

Neste momento, avalie o quanto você gostou do café, de acordo com a escala abaixo. *

- Gostei muito
- Gostei
- Nem gostei, nem desgostei
- Desgostei pouco
- Desgostei muito

Avalie também, a sua intenção de compra, de acordo com a escala abaixo. *

- Certamente compraria
- Possivelmente compraria
- Compraria
- Possivelmente não compraria
- Certamente não compraria

Comentários

Sua resposta

[Voltar](#)

[Enviar](#)

[Limpar formulário](#)