

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL

Diversidade fenotípica e parâmetros genéticos de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner no estado do Amazonas.



MANAUS - AM
2022

CAROLINE DE SOUZA BEZERRA

Diversidade fenotípica e parâmetros genéticos de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner no estado do Amazonas.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia Tropical.

Orientadora: Dra. Maria Teresa Gomes Lopes.

Coorientadores: Dr. Mágnio Sávio F. Valente.

Dr. Marcelo Curitiba

Espíndula

MANAUS - AM

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B574d Bezerra, Caroline de Souza
Diversidade fenotípica e parâmetros genéticos de Coffea
canephora Pierre ex A. Froehner no estado do Amazonas / Caroline
de Souza Bezerra . 2022
154 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Lopes
Coorientador: Mágnio Sávio F. Valente
Coorientador: Marcelo Curitiba Espíndula
Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) - Universidade Federal
do Amazonas.

1. Variação fenotípica. 2. Café canéfora. 3. Robusta. 4. Conilon.
5. Elementos minerais. I. Lopes, Maria Teresa Gomes. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

CAROLINE DE SOUZA BEZERRA

Diversidade fenotípica e parâmetros genéticos de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner no estado do Amazonas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Agronomia Tropical, área de concentração em Produção Vegetal.

Aprovada em 09 de maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Dra Maria Teresa Gomes Lopes, Presidente
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)



Dra. Adriana Uchôa Brito, Membro
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia (ICET/UFAM)



Dra. Jozane Lima Santiago, Membro
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)



Dr. Gabriel Dequigiovanni, Membro
EMBRAPA



Dra. Suelen Cristina de Sousa Lima, Membro
Centro de Biotecnologia da Amazônia (CBA)

*“Do rio, fazes o teu sangue (...).
Depois planta-te, germina e cresce
que tua raiz se agarre à terra mais e mais para sempre
e, por último, sê canoa, barco, jangada, solo, jarra, estábulo e homem”.*

Javier Yglesias

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento e conclusão desta pesquisa não teriam sido possíveis sem a colaboração, orientação e parceria, ao longo desses anos, de pessoas ou instituições. Dessa forma, manifesto meu agradecimento a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para que esta tese se tornasse realidade.

Assim, agradeço:

A Deus, por sempre ser meu sustento, auxílio e refúgio, por me manter firme na caminhada, renovando minha fé a todo momento.

Aos meus pais, Maria Iêda e Antônio e ao meu irmão Marco Aurélio, que sempre me incentivam, apoiam e demonstram seu amor por mim. Por sempre acreditarem em mim, em meu potencial e nunca, em momento algum, me desmotivarem. Agradeço de coração por todo apoio emocional, financeiro e por todas as orações que fazem por mim. Agradeço por sempre me exaltarem, serem meu porto seguro e por nunca me terem deixado desistir. Eu realmente sou muito abençoada por tê-los e essa conquista é nossa. Eu amo muito vocês! Obrigada!

Ao meu namorado, João Paulo, agradeço por todo o seu apoio, seu amor em palavras e gestos, por sempre me ouvir atentamente e me acalantar, por sempre acreditar em mim. Essa é mais uma conquista nossa e sei que teremos muitas outras pela frente. Obrigada por ter sido uma força para mim, minha alegria em dias cansativos, meu refúgio de esgotamento mental. Eu te amo muito! Obrigada!

Aos meus familiares (meus avós, tios, tias, primos e primas), eu agradeço de coração. Eu sou muito abençoada por ter uma família tão maravilhosa! Vocês com certeza foram um incentivo nesta longa caminhada e sou muito feliz por compartilhá-la com vocês. Eu os amo muito!

Às minhas tias Iza e Izânia, que para mim, são mais que tias, são outras duas mães, amigas e exemplos de mulheres que tenho em minha vida. Eu agradeço pelas orientações, por todo o amor, incentivo e por terem me auxiliado a me tornar a mulher que sou hoje. Eu amo muito vocês!

Aos meus sogros, cunhados, cunhadas, sobrinhos e sobrinhas, agradeço por todo apoio, amizade e por tornar meus dias mais leves!

Às minhas amigas, Luanna, Cristhiane e Vanessa, eu sou muito grata por ter vocês em minha vida, por todas as conversas, distrações, apoio emocional, companheirismo, parceria e por tornarem meus dias mais leves. Eu amo vocês!

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Gomes Lopes, por todos os ensinamentos e orientações, desde os meus 18 anos. Por sempre cobrar o meu melhor e por acreditar em mim mais do que eu mesma. Agradeço a amizade, parceria, incentivo e por tudo o que vivemos ao longo desses anos. Com certeza eu amadureci bastante sob sua orientação e sei que sem seu esforço, dedicação e capacidade, não seria possível realizar este trabalho tão relevante. Obrigada pela sua dedicação e por ter se tornado uma pessoa muito especial em minha vida!

Ao professor Mágnio Sávio Ferreira Valente, pela orientação na apresentação de resultados. Muito obrigada!

Ao Ricardo Lívio, agradeço por conceder a oportunidade de desenvolver esta pesquisa na Superintendência da Polícia Federal do Amazonas. Por ter compartilhado do seu tempo e conhecimento conosco. Pela confiança depositada em nós e por sua humildade sempre presente, deixando o ambiente mais leve e amigável. Muito Obrigada!

Aos meus colegas do Laboratório de Melhoramento vegetal - MGv da UFAM, Jennifer Tomaz, Maria Marques, Lucinete Gomes, Adriel Lira. Obrigada pela parceria, apoio e incentivo em vários momentos!

À Jennifer Tomaz, eu agradeço de modo especial, pela amizade construída ao longo dos anos, por todo o suporte e companheirismo. Por rir comigo e tornar o ambiente de trabalho muito mais leve e feliz! É uma amizade que pretendo cultivar e levar para a vida. Nem tenho palavras para expressar o quanto sou grata!

À Maria Marques, agradeço a amizade, auxílio em coletas, preparo de amostras, risos e parceria. Muito Obrigada!

À equipe do SETEC-PF-AM, Haroldo, Larissa e Lucas. Obrigada pelo auxílio e confiança ao longo do desenvolvimento da pesquisa!

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia Tropical (PPG-ATR) pela oportunidade de realizar este doutorado, uma etapa tão importante em minha vida.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo financiamento da bolsa de Doutorado.

A todos que de alguma forma contribuíram com meu crescimento pessoal, Luanna, Bianca, Camila, Cris, Vanessa, Maria, Sara, Fernanda, Laura que demonstraram seu amor por gestos ou palavras e com as quais eu tenho memórias felizes! Obrigada!

A todos muito obrigada!

RESUMO

O café é uma das bebidas mais amplamente consumidas no mundo, sendo o segundo produto mais exportado e uma das principais fontes de renda do Brasil. O seu cultivo é uma atividade importante no setor agrícola e extremamente relevante para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro. Dentre as espécies do gênero *Coffea*, destacam-se *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, que representam 99% da produção mundial de café. A espécie *C. canephora* é diplóide, perene, alógama, de fácil propagação vegetativa e apresenta um sistema de autoincompatibilidade do tipo gametofítica que lhe confere alta variabilidade genética, tornando-a objeto de estudo em programas de melhoramento a fim de gerar clones e variedades com habilidades de adaptação, aclimatação, alta produtividade e melhor qualidade de bebida. Alguns parâmetros são afetados pela variabilidade genética da espécie, de modo que os genótipos apresentem respostas variadas sob diferentes condições a que estão submetidos. E um desses parâmetros, é o status nutricional da planta, pois, fatores como acúmulo e absorção de nutrientes bem como a eficiência de seus usos podem ser afetados por fatores genéticos. O trabalho teve como objetivo analisar componentes inorgânicos presentes em solos e em tecidos e frutos de quinze clones de *Coffea canephora*, para, estudar a diversidade fenotípica e parâmetros genéticos, visando selecionar genótipos superiores para estabelecer plantio comercial no estado do Amazonas. Para a análise de adaptação dos clones foram levados em consideração os caracteres quantitativos como: altura total da planta (m), comprimento do ramo ortotrópico (cm) e comprimento do ramo plagiotrópico (cm). Para a quantificação de elementos minerais acumulados e absorvidos por *Coffea canephora*, amostras de solos e tecidos (folhas, raízes e frutos) foram coletadas do experimento estabelecido na fazenda experimental da UFAM e foram submetidos a análise por meio de Fluorescência de Raio-X por reflexão total TXRF. Estes dados foram submetidos a testes de normalidade e homogeneidade de variâncias. Foi realizada seleção massal fenotípica dos genótipos superiores para seleção, considerando a média dos clones para caracteres de altura, componentes inorgânicos das folhas que mostraram diferença significativa, bem como dos dados de produtividade dos clones. Os genótipos foram agrupados pelo método hierárquico das médias das distâncias (UPGMA) e foi realizada dispersão gráfica pelo Método da Análise de Coordenadas Principais (PCA) e análise de escalonamento multidimensional não métrico para análises de componentes inorgânicos. As amostras de solo indicaram altos teores de Al e contaminação por elementos traços, indicando que a espécie pode ser considerada acumuladora e tolerante. Os genótipos de *Coffea canephora* demonstraram a existência de variabilidade genética para altura de planta, acúmulo de Cu, Rb, Hf e I em tecidos foliares e para rendimento e produtividade originais e estimados de grãos. Indicando que há diferença na adaptação e crescimento vegetativo entre os genótipos avaliados na região de Manaus e que há a possibilidade de seleção de genótipo superior.

Palavras-chave: variação fenotípica, café canéfora, Robusta, Conilon, elementos minerais.

ABSTRACT

Coffee is one of the most widely consumed beverages in the world, being the second most exported product and one of the main sources of income in Brazil. Its cultivation is an important activity in the agricultural sector and extremely relevant for socioeconomic development in Brazil. Among the species of the genus *Coffea*, *Coffea arabica* and *Coffea canephora* stand out, representing 99% of world coffee production. The species *Coffea canephora* is diploid, perennial, allogamous, with easy vegetative propagation and presents a gametophytic self-incompatibility system that gives it a high genetic variability, making it an object of study in breeding programs in order to generate clones and varieties with adaptation skills, acclimatization, high productivity and better beverage quality. Some parameters are affected by the genetic variability that the species presents, so that the genotypes present varied responses under different conditions to which they are submitted. And one of these parameters is the nutritional status of the plant, since factors such as accumulation and absorption of nutrients as well as the efficiency of their use can be affected by genetic factors. Given the above, the objective of this work was to analyze inorganic components present in soils and in tissues and fruits of fifteen clones of *Coffea canephora* established in plantation at the Experimental Farm of UFAM, through the analysis of plant tissues and soils, to study the phenotypic diversity and genetic parameters, aiming to select superior genotypes to establish commercial plantation in the state of Amazonas. For the analysis of adaptation of the clones, quantitative characters were taken into account, such as: total plant height (m), length of the orthotropic branch (cm) and length of the plagiotropic branch (cm). For the quantification of mineral elements accumulated and absorbed by *Coffea canephora*, soil and tissue samples (leaves, roots and fruits) were collected from the experiment established at the UFAM experimental farm and were subjected to analysis by means of X-ray Fluorescence by total dispersion (TXRF). These data were submitted to tests of normality and homogeneity of variances. Phenotypic mass selection of superior genotypes was performed for selection, considering the average of the clones for height characters, inorganic components of the leaves that showed a significant difference, and the clone productivity data. The genotypes were grouped by the hierarchical method of mean distances (UPGMA) and graphical dispersion was performed by the Principal Coordinate Analysis Method (PCA) and non-metric multidimensional scaling analysis for inorganic component analysis. Soil samples indicated high levels of Al and contamination by trace elements, indicating that the species can be considered accumulating and tolerant. The *Coffea canephora* genotypes demonstrated the existence of genetic variability for plant height, accumulation of Cu, Rb, Hf and I in leaf tissues and for original and estimated grain yield and productivity. Indicating that there is a difference in adaptation and vegetative growth between the genotypes evaluated in the region of Manaus and that there is a possibility of selection of a superior genotype.

Key-words: phenotypic variation, coffee canephora, Robusta, Conilon, mineral elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDO. (A) LOCALIZAÇÃO DA FAEXP VIA SATÉLITE; (B) FOTO EM PANORÂMICA DO EXPERIMENTO ESTABELECIDO NA FAZENDA. FONTE: GOOGLE MAPS; FOTO: BEZERRA (2021).	36
FIGURA 2. ALGUNS DOS MATERIAIS COLETADOS PARA ANÁLISE. (A) FOLHAS; (B) RAÍZES FINAS; (C) ÁREA EM DESTAQUE DA COLETA DE SOLO E DE RAÍZES. FOTOS: BEZERRA (2021).....	42
FIGURA 3. AMOSTRAS DE SOLO DESTORROADOS SECANDO EM TEMPERATURA AMBIENTE. FOTOS: BEZERRA (2021).	42
FIGURA 4. PROCESSO DE LAVAGEM DE FOLHAS E RAÍZES. FOTOS: BEZERRA (2021); TOMAZ (2021).	43
FIGURA 5. SECAGEM E PESAGEM DAS AMOSTRAS DE RAÍZES E FOLHAS. FOTOS: BEZERRA (2021).	44
FIGURA 6. PREPARO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE. (A) AMOSTRAS PREVIAMENTE MOÍDAS MANUALMENTE, SENDO ACRESCIDAS DAS ESFERAS MAGNÉTICAS; (B) AMOSTRAS EM PROCESSO DE PULVERIZAÇÃO; (C) PESAGEM DAS AMOSTRAS. FOTOS: BEZERRA (2021).....	45
FIGURA 7. ETAPAS DE SUSPENSÃO DAS AMOSTRAS. (A) ADIÇÃO DE E.G. 1% AQUEOUS TRITON X100 EM CADA AMOSTRA; (B) AMOSTRAS SUSPENSAS; (C) ADIÇÃO DO PADRÃO GÁLIO NAS AMOSTRAS SUSPENSAS; (D) HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS COM AUXÍLIO DO VÓRTEX. FOTOS: BEZERRA (2021).....	45
FIGURA 8. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS. (A) PIPETAGEM DO PVC NOS DISCOS; (B) SECAGEM DOS DISCOS; (C) SECAGEM DOS DISCOS CONTENDO AS AMOSTRAS SUSPENSAS; (D) DISCOS COM AS AMOSTRAS JÁ SECAS; (E) E (F) INJEÇÃO DAS AMOSTRAS NAS COLUNAS DO TXRF. FOTOS: BEZERRA (2022).....	46
FIGURA 9. ESPECTRÔMETRO DE BANCADA UTILIZADO PARA AS ANÁLISES. FOTOS: BEZERRA (2022).	46
FIGURA 10. COMPARAÇÃO DO TEOR DE ALUMÍNIO (AL) (A), SILÍCIO (SI) (B), COBALTO (C), FÓSFORO (P) (D), ENXOFRE (S) (E), CÁLCIO (CA) (F), ESCÂNDIO (SC) (G) E IODO (I) (G), EM RAIZ, FOLHAS, GRÃOS CRUS E TORRADOS DE COFFEA CANEPHORA E SOLO DE ÁREA DE FLORESTA SECUNDÁRIA DESTINADA A PLANTIOS. CAIXAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 25 E 75%, BARRAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 10 E 90%, QUADRADOS CHEIOS MOSTRAM A MEDIANA, CÍRCULOS VAZIOS MOSTRAM OUTLIERS. SIGNIFICATIVO A 5 % PELA ANOVA.	59
FIGURA 11. COMPARAÇÃO DO TEOR DE CLORO (CL) (A), TITÂNIO (TI) (B), CROMO (CR) (C), FERRO (FE) (D), COBRE (CU) (E) E POTÁSSIO (F) EM RAIZ, FOLHA, GRÃO CRU E TORRADO DE COFFEA CANEPHORA E SOLO DE ÁREA DE FLORESTA SECUNDÁRIA DESTINADA A PLANTIOS. CAIXAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 25 E 75%, BARRAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 10 E 90%, QUADRADOS CHEIOS MOSTRAM A MEDIANA, CÍRCULOS VAZIOS MOSTRAM OUTLIERS. SIGNIFICATIVO 5% PELA ANOVA.....	60
FIGURA 12. COMPARAÇÃO DO TEOR DE ESTRÔNCIO (SR) (A), ÍTRIO (Y) (B), BÁRIO (BA) (C), HÁFNIO (HF) (D) E RUBÍDIO (RB) (E) EM RAIZ, FOLHA, GRÃO CRU E TORRADO DE COFFEA CANEPHORA E SOLO DE ÁREA DE FLORESTA SECUNDÁRIA DESTINADA A PLANTIOS. CAIXAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 25 E 75%, BARRAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 10 E 90%, QUADRADOS CHEIOS MOSTRAM A MEDIANA, CÍRCULOS VAZIOS MOSTRAM OUTLIERS. SIGNIFICATIVO A 5% PELA ANOVA.	61

FIGURA 13. COMPARAÇÃO DO TEOR NÍQUEL (NI) (A), SELÊNIO (SE) (B), ZINCO (ZN) (C) E BROMO (BR) (D), EM RAIZ, FOLHA, GRÃO CRU E TORRADO DE COFFEA CANEPHORA E SOLO DE ÁREA DE FLORESTA SECUNDÁRIA DESTINADA A PLANTIOS. CAIXAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 25 E 75%, BARRAS MOSTRAM OS QUARTIS DE 10 E 90%, QUADRADOS CHEIOS MOSTRAM A MEDIANA, CÍRCULOS VAZIOS MOSTRAM OUTLIERS. SIGNIFICATIVO A 5% PELA ANOVA.	62
FIGURA 14. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NO SOLO NA REGIÃO DA RIZOSFERA DAS PLANTAS. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R=0,6741$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO PELO MÉTODO MOJENA (1977).	63
FIGURA 15. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, COM BASE NAS ANÁLISES DO SOLO, NA REGIÃO DA RIZOSFERA.	64
FIGURA 16. ANÁLISE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM AMOSTRAS DE SOLO RIZOSFÉRICO....	64
FIGURA 17. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM AMOSTRAS DE SOLO RIZOSFÉRICO.	65
FIGURA 18. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NAS RAÍZES DAS PLANTAS. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R = 0,7778$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO PELO MÉTODO DE MOJENA (1977).	71
FIGURA 19. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE NAS ANÁLISES DAS RAÍZES.	72
FIGURA 20. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM AMOSTRAS DE RAÍZES DE COFFEA CANEPHORA.....	72
FIGURA 21. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS EM AMOSTRAS DE RAÍZES DE COFFEA CANEPHORA.....	73
FIGURA 22. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NAS FOLHAS DAS PLANTAS. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R = 0,8835$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO PELO MÉTODO DE MOJENA (1977).	93
FIGURA 23. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE NAS ANÁLISES DAS FOLHAS.	95
FIGURA 24. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM FOLHAS DE COFFEA CANEPHORA.	96
FIGURA 25. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM FOLHAS DE COFFEA CANEPHORA.	96
FIGURA 26. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NOS GRÃOS CRU DE CAFÉ. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R = 0,8730$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO PELO MÉTODO	

MOJENA (1977).....	98
FIGURA 27. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, COM BASE NAS ANÁLISES DOS GRÃOS CRU.....	99
FIGURA 28. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM GRÃOS E CASCAS CRUS DE COFFEA CANEPHORA.....	100
FIGURA 29. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) EM GRÃOS E CASCAS CRUS DE COFFEA CANEPHORA.....	100
FIGURA 30. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NOS GRÃOS TORRADOS DE CAFÉ. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R = 0,9126$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO POR MOJENA (1977).....	101
FIGURA 31. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, COM BASE NAS ANÁLISES DOS GRÃOS E CASCAS TORRADOS.	102
FIGURA 32. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA), COM BASE NAS AMOSTRAS DE GRÃOS E CASCAS TORRADAS DE COFFEA CANEPHORA.	102
FIGURA 33. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA), COM BASE NAS AMOSTRAS DE GRÃOS E CASCAS TORRADAS DE COFFEA CANEPHORA.	103
FIGURA 34. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE COMPONENTES INORGÂNICOS PARA FOLHAS E GRÃOS E CASCAS CRUS E TORRADO DE 15 GENÓTIPOS DE C. CANEPHORA.....	112
FIGURA 35. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (UPGMA) A PARTIR DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA MÉDIA ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA COM BASE EM ANÁLISES DE MASSA SECA DAS PLANTAS. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO COFENÉTICA: $R = 0,8921$. A LINHA HORIZONTAL TRACEJADA REPRESENTA O CORTE ESTIMADO PELO MÉTODO DE MOJENA (1977).....	115
FIGURA 36. ANÁLISE DE ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL NÃO-MÉTRICO DAS DISTÂNCIAS GENÉTICAS ENTRE QUINZE GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, COM BASE NAS ANÁLISES DE MASSA SECA.	116
FIGURA 37. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) – MASSA SECA DE 15 GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA.....	116
FIGURA 38. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) – MASSA SECA DE COFFEA CANEPHORA.	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. GENÓTIPOS AVALIADOS DE CLONES DE COFFEA CANEPHORA INSTALADOS NA FAZENDA EXPERIMENTAL DA UFAM, AMAZONAS. E A ORIGEM DE DEZ CULTIVARES.	37
TABELA 2. ESQUEMA RESUMIDO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EXPERIMENTO DE 15 CLONES DE COFFEA CANEPHORA.....	38
TABELA 3. ESQUEMA RESUMIDO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA CONJUNTA 15 CLONES DE COFFEA CANEPHORA EM DOIS ANOS (AMBIENTE) DE AVALIAÇÃO.....	39
TABELA 4. QUADRADOS MÉDIOS E PARÂMETROS GENÉTICOS PARA COMPRIMENTO DO RAMO PLAGIOTRÓPICO/LATERAL (CRP), COMPRIMENTO DA HASTE RAMO ORTOTRÓPICO/PRINCIPAL (CRO) E ALTURA DA PLANTA (AP) DE CLONES DE COFFEA CANEPHORA, AVALIADOS NO EXPERIMENTO EM MANAUS – AM, EM 2019.	50
TABELA 5. QUADRADOS MÉDIOS E PARÂMETROS GENÉTICOS PARA COMPRIMENTO DO RAMO PLAGIOTRÓPICO/LATERAL, COMPRIMENTO DO RAMO ORTOTRÓPICO/PRINCIPAL E ALTURA DA PLANTA DE CLONES DE COFFEA CANEPHORA, AVALIADOS NO EXPERIMENTO EM MANAUS – AM, EM 2021.	51
TABELA 6. QUADRADOS MÉDIOS E PARÂMETROS GENÉTICOS E AMBIENTAIS DA ANÁLISE CONJUNTA PARA COMPRIMENTO DO RAMO PLAGIOTRÓPICO/LATERAL, COMPRIMENTO DO RAMO ORTOTRÓPICO/PRINCIPAL E ALTURA DA PLANTA DE CLONES DE COFFEA CANEPHORA, AVALIADOS NO EXPERIMENTO EM MANAUS-AM, EM 2020 E 2021.	52
TABELA 7. COMPARATIVO DAS MÉDIAS DOS DOIS ANOS DE AVALIAÇÃO PARA OS PARÂMETROS COMPRIMENTO DO RAMO PLAGIOTRÓPICO/LATERAL, COMPRIMENTO DA HASTE ORTOTRÓPICO/PRINCIPAL E ALTURA DA PLANTA DE CLONES DE COFFEA CANEPHORA, AVALIADOS EM EXPERIMENTO ESTABELECIDO EM MANAUS –AM.	54
TABELA 8. QUADRADOS MÉDIOS E PARÂMETROS GENÉTICOS DE 19 ELEMENTOS QUÍMICOS AVALIADOS EM FOLHAS DE 15 GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA.	88
TABELA 9. VALORES MÉDIOS DAS CONCENTRAÇÕES DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM FOLHAS DE 15 GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, AVALIADOS EM MANAUS- AM.....	92
TABELA 10. CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NAS FOLHAS PARA DIVERGÊNCIA ENTRE 15 GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, PELA ESTATÍSTICA (S.J) PROPOSTA POR SINGH (1981).	94
TABELA 11. MASSA SECA FOLIAR (MSF), MASSA SECA RAIZ (MSR), MASSA SECA TOTAL (MST), RAZÃO MASSA FOLIAR (RMF), RAZÃO MASSA RAIZ (RMR) DE CLONES DE C. CANEPHORA, EM G KG ⁻¹	114
TABELA 12. QUADRADOS MÉDIOS E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GENÉTICOS E FENOTÍPICOS DE CARACTERÍSTICAS AVALIADAS EM GENÓTIPOS DE COFFEA CANEPHORA, EXPERIMENTO CONDUZIDO EM 2020/2021	122
TABELA 13. COMPARATIVOS DAS MÉDIAS PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS PRODUTIVIDADE ORIGINAL E ESTIMADA DOS CLONES DE COFFEA CANEPHORA.	123

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

Al - Alumínio

As - Arsnio

Ba - Bário

Br - Bromo

Ca - Cálcio

Co - Cobalto

Cu - Cobre

Cl - Cloro

Cr - Cromo

TE - Elementos traços

Fe - Ferro

Ge - Germânio

Hf - Háfnio

I - Iodo

K - Potássio

Mg - Magnésio

mg kg⁻¹ -

mg planta⁻¹ -

MSF - Massa Seca Foliar

MSR - Massa Seca Raiz

Ni - Níquel

Nb - Nióbio

P - Fósforo

Pb - Chumbo

Rb - Rubídio

RMF - Razão Massa Foliar

RMR - Razão Massa Razão

S - Enxofre

Se - Selnio

Si - Silício

Sb - Antinmio

Sc - Escândio

Sr - Estrôncio

Ti - Titânio

TXRF – Método de Fluorescência de Raios - X por Reflexão Total

Y - Itrio

Yb - Itérbio

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo geral	22
2.2	Objetivos específicos	22
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1	A família Rubiaceae Juss	22
3.2	O gênero <i>Coffea</i>	24
3.3	A espécie <i>Coffea canephora</i> Pierre ex Froehner	24
3.4	A importância socioeconômica de <i>Coffea canephora</i>	26
3.5	Distribuição natural e estrutura populacional de <i>Coffea canephora</i>	27
3.6	Autoincompatibilidade de <i>Coffea canephora</i>	28
3.7	Diversidade Genética de <i>Coffea canephora</i>	30
3.8	Melhoramento genético de <i>Coffea canephora</i>	31
3.9	Espectroscopia de fluorescência de raios-x de reflexão total (TXRF).	32
3.10	Eficiência de absorção, translocação e utilização de elementos na planta.	34
4.	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	Área de estudo	36
4.2	Material vegetal e análise de adaptação dos clones	37
4.3	Condução do Experimento.....	37
4.4	Análises estatísticas e genéticas do ensaio de campo	38
4.4.1	Análise de normalidade	38
4.4.2	Análise de variância e teste de médias.....	38
4.4.3	Estimativas dos parâmetros genéticos	39
4.4.4	Correlações genéticas e ambientais	40
4.5	Material vegetal e amostragem de solo, raízes rizosféricas, folhas e frutos para análise em TXRF.	41
4.6	Massa seca e acúmulo de nutrientes nas plantas.....	43
4.7	Análise pelo método analítico de fluorescência de raios-X por reflexão total (TXRF)	44
4.7.1	Preparo do material para leitura.....	44
4.7.2	Suspensão das amostras	45
4.7.3	Método analítico de fluorescência de raios-X de reflexão total (TXRF).	46
4.8	Análises estatísticas e genéticas dos dados.....	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1	Adaptabilidade dos clones	49

5.2	Análise de solos rizosféricos, tecidos das plantas (raiz e folhas) e frutos de <i>Coffea canephora</i>	56
5.2.1	Componentes inorgânicos em solos rizosféricos de <i>Coffea canephora</i>	62
5.2.2	Componentes inorgânicos em raízes de <i>Coffea canephora</i>	71
5.2.3	Componentes inorgânicos em folhas de <i>Coffea canephora</i>	81
5.2.4	Componentes inorgânicos em grãos e cascas crus e torrados de clones de <i>Coffea canephora</i>	97
5.3	Correlação entre concentrações de nutrientes de folhas, grãos e cascas crus e torrados.	110
5.4	Componentes de massa seca de <i>Coffea canephora</i>	113
5.5	Produtividade de dos genótipos de <i>Coffea canephora</i>	117
5.6	Correlações entre biomassa, produção e concentração foliar de nutrientes de <i>Coffea canephora</i>	124
6.	CONCLUSÕES	127
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo, é o segundo maior produto exportado e uma das principais fontes de renda de países desenvolvidos (PENDERGAST, 2009; MISHRA e SLATER, 2012; HUDED et al., 2020; ABEELE et al., 2021). Por ser uma das commodities mais comercializadas, é uma atividade importante no setor agrícola e extremamente relevante no contexto de desenvolvimento socioeconômico no Brasil, especialmente no estado do Espírito Santo, onde se tornou componente principal do agronegócio (FERRÃO et al., 2021).

O Brasil é o maior produtor de café no mundo, sendo responsável por aproximadamente 35% da produção mundial (International Coffe Organization – ICO, 2021). No ano de 2021, a safra de café foi estimada em 2,93 milhões de toneladas, das quais, *C. canephora* foi responsável por 0,93 milhões de toneladas, representando um aumento de 13,8% em relação ao ano de 2020. No estado do Espírito Santo é onde se encontra a maior área destinada ao *Coffea canephora*, com 273,7 mil hectares, representando 76% da produção nacional, seguido por Rondônia, com 71,7 mil hectares (FERRÃO et al., 2021; CONAB, 2021; CONAB, 2022).

O café (Eudicotiledônea) pertence ao gênero *coffea* da família das angiospermas Rubiaceae. Dentro deste gênero, são encontradas mais de 124 espécies catalogadas na literatura, contudo, destacam-se duas do ponto de vista comercial, econômico e social, que são: *C. arabica* e *C. canephora* (DAVIS et al., 2019; FERRÃO et al., 2021), as quais, juntas, correspondem a mais de 90% da produção de café no mundo (MORAIS et al., 2012). As outras espécies, por sua vez, apresentam importância em programas de melhoramento genético para hibridização e transferência de genes (FERRÃO et al., 2019; MISTRO et al., 2019).

A espécie *C. canephora* é originada da floresta tropical de planície da África e estende-se desde o oeste da África Central até a República Democrática do Congo e, ainda, passa por Uganda e norte da Tanzânia até o norte de Angola (CUBRY et al., 2013; HUDED et al., 2020). No Brasil, a espécie foi introduzida em 1912 e, em 1985, o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER) iniciou o programa de melhoramento a fim de explorar sua grande variabilidade por meio de diversas estratégias de seleção e reprodução (FERRÃO et al., 2019).

O cultivo clonal de *C. canephora* se expandiu na Amazônia Ocidental na última década, especialmente em Rondônia, onde foram selecionados clones superiores, com

alto desempenho agrônomo para as condições edafoclimáticas da região. Neste estado, a Embrapa desenvolveu e recomendou para plantio, dez cultivares híbridas de cafeeiros adaptados as condições de Rondônia, Acre, Sul do Amazonas e Norte e noroeste de Mato Grosso. O desenvolvimento dessas cultivares é o resultado de dezesseis anos de pesquisas e estudos, por meio de hibridização controlada entre plantas-mãe de *C. canephora* do banco de germoplasma ativo da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2020). Assim como Rondônia, devido a condições climáticas semelhantes, o Amazonas é um estado que possui potencial para atingir um local de destaque na produção nacional de café, uma vez que também tem forte apelo econômico e social na região, além de gerar uma renda considerável capaz de reduzir a pressão sobre a floresta.

Coffea canephora é uma espécie diplóide, perene, alógama, de fácil propagação vegetativa, autoincompatibilidade do tipo gametofítico (MORAES et al., 2020; FERRÃO et al., 2021) com alta variabilidade genética e se reproduz por fertilização cruzada. Essas suas características facilitam a produção de genótipos altamente heterozigotos (GILES et al., 2018; SALLES et al., 2021), gerando clones e variedades que possuem habilidades de adaptação e aclimação (RAMALHO et al., 2014).

Alguns parâmetros são afetados pela variabilidade genética que ocorre em *C. canephora*, induzindo respostas diferentes durante o desenvolvimento de genótipos sob diferentes condições de solo, água, temperatura e outros (BONOMO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2018; SALLES et al., 2021). Um desses parâmetros, que é significativo e altamente influenciável, é o status nutricional da planta (SALLES et al., 2021). Estudos realizados indicam que a tolerância à baixa disponibilidade de nutrientes (COLODETTI et al., 2014; MARTINS et al., 2015), eficiência de absorção e uso de nutrientes (MARTINS et al., 2016), acúmulo de conteúdo nutricional em folhas e galhos (OLIOSI et al., 2020) e qualidade da bebida (MARTINEZ et al., 2014), podem ser afetados por fatores genéticos.

Análises químicas do solo auxiliam na estimativa de nutrientes disponíveis para as plantas, já as análises foliares indicam o atual status nutricional da planta (PARTELLI et al., 2013) e, a análise de tecidos tem sido mais considerada por ser um método direto para avaliar este status (SILVA et al., 2020). Dessa forma, novas pesquisas estão sendo executadas com o auxílio de equipamentos mais tecnológicos, com o intuito de realizar análises multielementares de clones que estejam em processo de adaptação. Esses estudos de compostos inorgânicos permitem que se possa identificar o clone superior e a relação direta destes elementos com a planta associando ao processo de adaptação e crescimento

vegetativo dos clones de *C. canephora*. A capacidade de absorção de um nutriente depende da disponibilidade do mesmo no solo, mas depende também do potencial genético da planta em absorvê-lo, assim é possível observar variabilidade genética para a absorção de nutrientes.

Para que as concentrações de elementos no sistema solo-raiz-folhas e frutos possam ser quantificadas de modo eficaz, diferentes tecnologias são utilizadas, destacando-se a espectrometria de fluorescência de raios-X de reflexão total (TXRF) (PASHKHOVA et al. 2020). Esta ferramenta é considerada uma técnica analítica, devido à praticidade, precisão e confiabilidade que apresenta. Além disso, tem sido considerada a mais vantajosa para análises multielementares por detectar quase todos os elementos da tabela periódica, desde o sódio ao urânio em grande parte (MARGUI et al., 2019; LARA-ALMAZÁN et al., 2021).

A alta reprodutibilidade dos resultados da técnica TXRF, entre 1 e 2%, a sua rapidez na medição (100 a 1000s para análise multielementar), o requerimento de pequena quantidade de amostra para ser analisada, entre 5 e 20 μL , o ótimo custo-benefício e a análise facilitada pelo método de padrão interno (adição de uma quantidade conhecida de um elemento) têm elevado potencial de aplicação em várias áreas da ciência. Oportunamente, apresentamos de forma inédita a correlação entre os elementos essenciais presentes nas plantas e os parâmetros genéticos por meio do TXRF (STOSNACH, 2006; ALOV, 2011; FERNÁNDEZ-RUIZ et al., 2018; PASHKOVA et al., 2020; LARA-ALMAZÁN et al., 2021; MALTSEV et al., 2021).

Uma aplicação muito comum do TXRF é a análise de líquidos, contudo, métodos diferentes têm sido aplicados e se provaram adequados para uso em análises ambientais, inclusive em plantas (LARA-ALMAZÁN et al., 2021). Assim, amostras sólidas também são bem viáveis de serem analisadas com o auxílio de um padrão interno, dessa forma, o TXRF tem sido aplicado para análise de solos, sedimentos, argila, raízes, folhas e frutos (PASHKOVA et al., 2020).

Com o desenvolvimento de pesquisas acerca das espécies vegetais, o cultivo comercial de café no Brasil, inclusive no Amazonas, torna-se viável com o uso de clones, novas cultivares, entre outros, possibilitando o desenvolvimento de uma produção rentável e ambientalmente correta. Contudo, com excessão da região sul so Amazonas que já possui clones recomendados, a região de Manaus e outros municípios ainda não têm té genótipos clonais recomendados embora as condições edafoclimáticas sejam semelhantes às do estado de Rondônia e das regiões do sul do estado, não é viável

recomendar o plantio de genótipos selecionados sem que sejam avaliados em seu local de destino. Neste sentido, faz-se necessário avaliar clones de *C. canephora*, no município de Manaus, para inferir sobre a adaptação local e o crescimento vegetativo.

Diante disso, o objetivo no trabalho foi analisar componentes inorgânicos presentes em solos e em tecidos e frutos de quinze clones de *Coffea canephora* para estudar a diversidade fenotípica e parâmetros genéticos, visando selecionar genótipos superiores para estabelecer plantio comercial no estado do Amazonas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a diversidade fenotípica e parâmetros genéticos em clones de *Coffea canephora* por meio de componentes inorgânicos.

2.2 Objetivos específicos

- I. Estimar parâmetros genéticos para seleção em clones de *Coffea canephora* para caracteres de adaptação dos clones;
- II. Identificar e quantificar os elementos químicos presentes em amostras de solo rizosférico e tecidos (folhas, raízes e grãos) de clones de *Coffea canephora* por meio do método de Fluorescência de raio X por reflexão total (TXRF);
- III. Caracterizar a diversidade fenotípica dos clones de *Coffea canephora* para componentes inorgânicos
- IV. Correlacionar caracteres fenotípicos com os componentes inorgânicos estudados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A família Rubiaceae Juss

Esta família está inserida na ordem *Gentianales*, que por sua vez está agrupada em 3 ordens: *Garryales*, *Lamiales* e *Loganiaceae*, nos grupos monofiléticos informais: asterids e euasterids (THE ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP, 1988; VARGAS e

MARTINS, 2020). Atualmente, Rubiaceae destaca-se como uma das maiores famílias e assim ocupa o quarto lugar em diversidade entre as Angiospermas (DELPRETE e JARDIM, 2012; ROBBRECHT, 2018; FONSECA et al., 2020). Conta com mais de 13 mil espécies distribuídas em mais de 600 gêneros (GOVAERTS et al., 2016; FONSECA et al., 2020).

No Brasil, é uma espécie muito bem representada por ocorrer em cerca de 130 gêneros e 2.000 espécies. Possui uma ampla distribuição geográfica e apresenta relevante importância econômica e social (LIMA et al., 2010), por possuir espécies com potenciais medicinais, além é claro, de ser a família do café (SOUZA e LORENZI, 2008; ANDRADE et al., 2020), uma potência econômica em nosso país.

Rubiaceae pode ser reconhecida por apresentar hábitos de crescimento variados, desde ervas até mesmo a árvores de médio porte, ou ainda mais raramente lianas ou epífitas (TAYLOR et al., 2007; FONSECA et al., 2020). Pode ser mais facilmente reconhecida pela presença de folhas simples, opostas, com margem inteira e quase sempre com estípulas interpeciolares (FERREIRA JUNIOR e VIEIRA, 2015; LAFETÁ et al., 2020), que são consideradas essenciais taxonomicamente no reconhecimento de gêneros desta família, pelo fato de apresentarem morfologias típicas (VITARELLI e SANTOS, 2009), suas flores são diclamídeas, com cálice gamossépalo, coroa gamopétala, androceu isostêmone e ovário ínfero (OLIVEIRA et al., 2014; ZAPPI et al., 2014; FONSECA et al., 2020). Já seus frutos, podem ser do tipo carnudos, dispersos pelos animais a frutos secos, como nozes e cápsulas, as últimas, muitas vezes possuem sementes pequenas e dispersão do tipo anemocoria (ROBBRECHT, 1988; ERIKSSON e BREMER, 1991; WIKSTRÖM et al., 2020).

Espécies representativas desta família podem ser encontradas em todas as regiões do mundo, até mesmo nas ilhas subantárticas (GOVAERTS et al., 2018; WIKSTRÖM et al., 2020), entretanto, apresentam uma distribuição geográfica mais significativa nas regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo (MENDOZA et al., 2004; DAVIS et al., 2009; FONSECA et al., 2020).

É uma família rica em espécies, de grande importância e representatividade em levantamentos e se faz presente nas mais diferentes formações vegetais de nosso território brasileiro (FONSECA et al., 2020). Sua importância econômica e ecológica a torna um relevante objeto de estudo.

3.2 O gênero *Coffea*

Os primeiros registros sobre café foram encontrados em um manuscrito no Iêmen, em 575, contudo, suas primeiras descrições se deram pelo botânico Prospero Albino, nos anos de 1591-92. Sua primeira classificação foi dada em 1716, mas em 1737 o gênero foi reclassificado por Carl Von Lineé (MARTINS, 2008). Uma das compilações taxonômicas mais impressionantes e relevantes deste gênero, foi escrita por August Chevalier, o qual, dividia *Coffea* em quatro secções e cinco subsecções (BERTHAUD e CHARRIER, 1985).

Pesquisas atuais, inovadoras e relevantes, com o uso de marcadores moleculares levaram a reformulação das divisões do gênero *Coffea*. Assim, passou a se subdividir então em apenas dois subgêneros: *Coffea* e *Baracoffea* (MAURIN et al., 2007), os quais, compreendem mais de cem espécies, que são encontradas em regiões tropicais de todo o mundo (DAVIS et al., 2011; SOUZA et al., 2017). Estas espécies por sua vez, normalmente são árvores ou arbustos perenes, de madeira resistente e densa, apresentam uma ramificação plagiotrópica, inflorescências axilares pareadas, flores do tipo hermafroditas e de coloração branca. Seus frutos apresentam duas sementes que por sua vez, possuem apenas um sulco longitudinal na superfície plana (DAVIS et al., 2006; MAURIN et al., 2007).

Dentro destas mais de cem espécies, apenas duas são distribuídas comercialmente para consumo: *Coffea arabica* L e *Coffea canephora* Pierre ex. Froehner, conhecidas popularmente como arábica e robusta, respectivamente. A espécie *C. arabica* é mais conhecida por possuir um grão de melhor qualidade com aroma intenso, assim, possui maior valor comercial. Já *C. canephora* possui um sabor mais amargo e forte, logo, apresenta menor valor comercial (FERRÃO et al., 2019; LEMOS et al., 2020). Juntas, estas duas espécies representam 99% da produção de grãos de café no mundo (DAMATTA e RAMALHO, 2006; RAMALHO et al., 2013; MARTINS et al., 2014; MARTINS et al., 2015).

3.3 A espécie *Coffea canephora* Pierre ex Froehner

Esta espécie corresponde a aproximadamente 30% a 40% da produção de café no mundo e é caracterizada por possuir elevado vigor vegetativo e alta produtividade (MARCOLAN e ESPINDULA, 2015; ALVES et al., 2018; ICO, 2021). Tem origem da Guiné, na bacia do congo, onde há uma alta concentração de genótipos. Foi inicialmente descrita como *Coffea canephora* Pierre, em 1985, contudo, no ano de 1900, foi

caracterizada e renomeada por Albrecht Froehner, assim, ficou descrita como *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (DAVIS et al., 2006).

Coffea canephora encontra-se distribuída em regiões quentes e úmidas, é uma espécie que tolera várias doenças e que se adapta melhor em condições tropicais de altas temperaturas, e baixas altitudes, além disso, apresenta uma maior adaptabilidade e uma vasta distribuição geográfica comparada com outras espécies do gênero (FERRÃO et al., 2019). No Brasil, foi introduzida por Jerônimo Monteiro, no Espírito Santo, no ano de 1912 (BANDES, 1987; FERRÃO et al., 2007; MERLO, 2012, VARGAS, 2012; FERRÃO et al., 2019). Mas, foi somente em 1972 que os primeiros rendimentos significativos da espécie foram registrados no país (FERRÃO et al., 2019). Atualmente encontra-se cultivos da espécie em regiões de menores altitudes e temperaturas mais elevadas, de 22 °C a 26 °C (FERRÃO et al., 2017b).

Coffea canephora é uma espécie alógama, perene, de porte arbustivo e caule lenhoso. Normalmente são multicaules, e em condições de temperatura e precipitação elevadas, a planta pode atingir até 5 m de altura. Suas folhas são verdes de um tom mais clara, elípticas, lanceoladas, com bordas bem onduladas e nervuras salientes. Suas flores são brancas, normalmente em grande número por inflorescência e axila foliar. Seus frutos possuem quantidade e formato variados devido à genética da espécie. Apresenta ainda uma maior capacidade de adaptação às condições adversas e possui um maior teor de cafeína e sólidos solúveis quando comparadas com *Coffea arabica* (BERTHAUD, 1986; FAZUOLI, 1986; MONTAGON; LEROY e YAPO, 1992; FERRÃO et al., 2019). Além disso, difere de *C. arabica* pela presença de multicaules, folhas maiores e flores autoincompatíveis, assim, a multiplicação se deve por meio de polinização cruzada. Os frutos são mais esféricos, menores e com coloração vermelha, amarela e laranja quando maduros, suas sementes são de tamanho variável (CARVALHO, 1946; FERRÃO et al., 2007; FERRÃO et al., 2019).

É uma espécie que detém de variedades clonais e sintéticas (FERRÃO et al., 2017a). No Brasil, já existem mais de dez cultivares devidamente registradas no Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA), assim, apresenta relevante importância econômica e social e vem se destacando no mercado mundial e brasileiro, por isso, requer mais estudos a cerca de sua diversidade genética, capacidade de adaptação em outras regiões, uma melhor compreensão de sua autoincompatibilidade, entre outros.

3.4 A importância socioeconômica de *Coffea canephora*

O café é um dos principais produtos industriais do mundo, atualmente fazendo parte do mercado de 80 países e 4 continentes, sendo assim, uma das bebidas mais apreciadas e consumidas no mundo. Possui diferentes aromas e sabores e é uma importante fonte de receita econômica para muitos países em desenvolvimento (ANDERSON e SMITH, 2002; BICHO et al., 2013; BABOVA et al., 2016; ICO, 2019a; LEMOS et al., 2020). Existem muitas espécies incluídas no gênero *coffea*, contudo, a produção de café tem como base três principais espécies, entre elas: *Coffea arabica*, *Coffea canephora* Pierre ex. A. Froehner e *Coffea liberica* (DAVIS et al., 2006; BABOVA et al., 2016).

As espécies comerciais mais importantes para a produção de café são: a arábica, que corresponde a 95% da produção de café no mundo pelo fato de apresentar uma bebida de melhor qualidade com aroma intenso e conseqüentemente oferece uma bebida de maior valor comercial (VEGA et al., 2003; BABOVA et al., 2016; LEMOS et al., 2020). E por outro lado, tem-se *C. canephora*, uma espécie que apresenta um sabor mais forte e mais amargo e se caracteriza por ter um elevado vigor vegetativo e alta produtividade (RIBEIRO et al., 2014; ALVES et al., 2018; FERRÃO et al., 2019; LEMOS et al., 2020). Nos últimos dez anos, apresentou aumento de produtividade com mais de 90% (CONAB, 2019).

A área destinada à produção de café em 2022 é de 1,82 milhão de hectares, representando um aumento em comparação à safra passada. Já a produtividade média nacional prevista é de 30,6 scs/ha, valor 16,1% maior em relação à safra anterior (CONAB, 2022). No ano de 2019-2020 foram produzidas 167,4 milhões de sacas de café, sendo que 42,8 % desse total correspondia a *C. canephora*, (ICO, 2019) e este percentual representa 71,72 milhões de sacas a mais que a safra anterior (JAEGGI et al., 2020).

Embora *C. arábica* seja mais cultivada no Brasil, *C. canephora* tem apresentado potencial para o aumento da produção nacional visto que a estimativa para este ano de 2022 é de aumento de 4% na área total cultivada, alcançando 427 mil hectares. Desse total, 389,2 mil hectares e estão em produção, e 37,8 mil estão em formação e a produtividade média dessa espécie, para esta temporada, está estimada em 43,6 scs/ha (CONAB, 2022). No Espírito Santo está concentrada a maior área destinada ao *C. canephora* no país, que contribui com aproximadamente 76% da produção brasileira. Espera-se cerca de 285,4 mil hectares no estado, seguido por Rondônia, com 71,7 mil

hectares e a Bahia, com 42,6 mil hectares (CONAB, 2022). E quanto à produção desses plantios, estima-se para o ano de 2022, 16.959,2 mil sacas de café beneficiado, aumento de 4% em relação ao ano de 2021 (CONAB, 2022).

A importância econômica do *C. canephora* se deve especialmente o seu uso como matéria-prima básica na indústria do café solúvel e como um componente importante na composição de blends de *C. arabica* (RIBEIRO et al., 2014; DALAZEN et al., 2020). A Amazônia Ocidental, composta pelo Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima representa cerca de 42,97% da extensão territorial da Amazônia brasileira (SUFRAMA, 2017). E nesta região, o *C. canephora* é produzido em maior escala em Rondônia, que produz aproximadamente 2,3 milhões de sacas, equivalente a 90% do café da área (CONAB, 2022). Os clones estabelecidos e que crescem no estado de Rondônia tornaram-se a base genética para a renovação de plantações de café na Amazônia Ocidental (ESPINDULA et al., 2017; DALAZEN et al., 2019; DALAZEN et al., 2020). E esses clones estão permitindo o desenvolvimento de estudos no estado do Amazonas, buscando-se identificar o clone que melhor se adaptou à região e assim dar início a plantios em maior escala e obter rendimentos significativos.

Como visto, *C. canephora* é uma espécie rústica e possui algumas vantagens sobre o *C. arabica*, dentre elas: menor variação durante o ciclo de bienalidade, maior rusticidade, capacidade de adaptação em outras regiões, alta produtividade, entre outros. Uma vez que é uma espécie que apresenta potencial produtivo e de adaptação, gerará renda para o Estado do Amazonas bem como necessitará de mão de obra capacitada e assim movimentará a economia do estado.

3.5 Distribuição natural e estrutura populacional de *Coffea canephora*

Quando se encontra em condições naturais, esta espécie terá suas subpopulações organizadas em um pequeno grupo composto por plantas matrizes, com uma pequena quantidade de progênies espalhadas por uma área de tamanho limitado. O seu fluxo gênico interpopulacional é baixo, já que a dispersão de pólen vai ocorrer preferencialmente dentro dos limites das subpopulações, contudo, a dispersão de sementes por sua vez, conta com o auxílio de aves e mamíferos e assim, alcançam maiores distâncias (BERTHAUD, 1986).

Coffea canephora possui relevância econômica e social, além disso, apresenta também razões genéticas para que seja uma espécie muito visada e considerada para estudos de seleção genômica, melhoramento genético, dentre outros, uma vez que dentro

do gênero *Coffea*, é a que apresenta ploidia e maior variabilidade genética quando comparada com a *C. arabica* (TRAN et al., 2016; CARNEIRO et al., 2019). Desta forma, estudos de diversidade genética e estrutura populacional são empregados para avaliações acerca da espécie, tanto em populações naturais quanto em coleções de germoplasma (BERTHAUD, 1986; DUSSERT et al., 1999; FERRÃO et al., 2019) e concluem que a espécie estrutura suas populações em dois grupos: Guineano (Guiné e Costa do Marfim) e Congolês (Região central da África), que diferem entre si quanto ao tamanho das flores e frutos, vigor, porte, qualidade da bebida e tolerância ao estresse hídrico e à seca (MUSOLI et al., 2010).

A estrutura dos grupos de *C. canephora* está diretamente relacionada com o isolamento geográfico e os eventos que sucederam ao longo de 18 mil anos. Em populações naturais, estes grupos estão separados pelo conhecido intervalo de Dahomey, localizado entre os blocos da floresta do centro e do oeste africano (MAURIN et al., 2007). Este comportamento foi observado também em outras espécies de *Coffea* o que formulou a “Teoria do Refúgio” a qual afirma que a distribuição da floresta africana não foi estável durante alguns períodos geológicos, o que ocasionou fenômenos de expansão e retração de sua área. Durante a etapa de expansão, a recolonização da espécie ocorreria então em áreas mais oportunas ao seu desenvolvimento, ou seja, onde a floresta conseguiu se manter durante os períodos mais desfavoráveis. Uma vez que estas populações se encontravam isoladas nestas áreas, elas deixaram de compartilhar eventos de mutação e combinação (BERTHAUD e CHARRIER, 1985). As forças evolutivas que ocorreram sob estas condições ambientais diferenciadas, auxiliaram com a fixação de alelos particulares, os quais ofereceram vantagens adaptativas aos indivíduos de cada população e conseqüentemente diferenciando-as (GOMEZ et al., 2009).

3.6 Autoincompatibilidade de *Coffea canephora*

O *C. canephora* é uma espécie diplóide, estritamente alógama e que possui um sistema de autoincompatibilidade (MAURIN et al., 2007), que consiste na impossibilidade de as flores de uma planta serem fecundadas com seu próprio pólen, ou seja, não formam sementes viáveis quando fertilizadas com seu próprio pólen (VIEIRA et al., 2021). Esta característica é considerada como um sistema de manutenção de variabilidade genética da espécie, dessa forma, populações de *C. canephora*, expressam uma grande variabilidade e indivíduos altamente heterozigotos (CONAGIN e MENDES,

1961; BERTHAUD, 1980; FERRÃO et al., 2007; SOUZA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2018).

A capacidade de impedir a autofecundação é uma característica importante do sistema reprodutivo de *C. canephora* pois é visto como um mecanismo de defesa para evitar efeitos nocivos da “consanguinidade” (NOWAK et al., 2011; SOUZA et al., 2021). E as primeiras observações acerca desta característica em plantas de *C. canephora*, se deu nas Índias Holandesas, em que o plantio estabelecido, fracassou quanto à produção (MENDES; 1942; FERRÃO et al., 2007). Assim, no ano de 1943, deu-se início à pesquisa e estudos para melhor compreensão dos sistemas de autoincompatibilidade da espécie (CONAGIN e MENDES, 1961). Pesquisas desenvolvidas aos longos dos anos, puderam comprovar que a autoincompatibilidade em *C. canephora* é do tipo gametofítica e a reação de autoincompatibilidade ocorre entre o tubo polínico e o estilete quando possuem o mesmo alelo (COULIBALY et al., 2002; VIEIRA et al. 2021).

A autoincompatibilidade de *C. canephora* é controlada por um único gene multialélico, identificado pela letra S (RÊGO et al., 2000; COULIBALY et al., 2003). Assim, existe a incapacidade de autofecundação e de cruzamentos entre indivíduos que possuam estes alelos (FERRÃO et al., 2007; STOFFELEN et al., 2009; NOWAK et al., 2011; FERRÃO et al., 2019; SOUZA et al., 2021). Alguns pesquisadores, como Asquini et al. (2011) e Nowak et al. (2011), acreditam que este mecanismo de autoincompatibilidade em espécies da família Rubiaceae, especialmente *C. canephora*, está relacionado com as proteínas S-RNAses.

C. canephora apresenta então alta variabilidade natural devido a ocorrência de cruzamentos naturais entre e dentro populações (IVOGLIO et al., 2008; SOUZA, 2005; FERRÃO et al., 2019). Logo, esta diversidade genética é de interesse de programas de melhoramento, já que compreende genes que podem ser utilizados para criar genótipos (IVOGLIO et al., 2008). Inclusive, considera-se nestes programas, a transferência de características desejáveis de *C. canephora* para *C. arabica* (HERRERA et al., 2002), salientando assim, a importância de que se realize mais estudos, pois, embora já se tenha feito muito, ainda há a necessidade de obtenção de dados para uma melhor compreensão dos mecanismos de autoincompatibilidade presentes em *C. canephora* para que a qualidade e rendimento das safras desta espécie seja melhorada (FERRÃO et al., 2019).

3.7 Diversidade Genética de *Coffea canephora*

Ter conhecimento da diversidade genética de uma espécie é fundamental para programas de melhoramento, pois auxiliará na conservação e nas estratégias de usos dos recursos genéticos. A diversidade genética entre um grupo de progenitores tem como objetivo a identificação de combinações híbridas que apresentem maior efeito heterótico e maior heterozigose (CRUZ et al., 2014). Assim, a variabilidade genética total que ocorre em uma população ou espécie que tenha sido submetida a algum processo evolutivo pode ser considerado como diversidade e variabilidade genética (MORALES; VALOIS; NASS, 1997; FERRÃO et al., 2019).

Coffea canephora se caracteriza por possuir ampla variabilidade entre e dentro populações naturais, além de ter uma das distribuições geográficas mais amplas, o que a torna uma excelente fonte de alelos para que novas cultivares possam ser desenvolvidas, assim como, *C. arabica* possa ser melhorada geneticamente. Além de ser uma planta altamente alógama, muitas populações selvagens de *C. canephora* foram submetidas ao cultivo, tornando o intercâmbio de material genético bastante intenso (BERTHAUD e CHARRIER, 1985; MAURIN et al., 2007; FERRÃO et al., 2019).

A exploração de vigor híbrido do cruzamento de material selvagem introduzido em lavoura com o cultivado proporcionou o surgimento de genótipos que antes não existiam na natureza. Assim, tornou-se possível reunir em uma única planta, as melhores características de cada uma das variedades. Dentre elas: arquitetura de copa, precocidade, resistência à seca, vigor e resistência a pragas, são algumas das características de *C. canephora* que têm se destacado em estudos realizados em campo (SOUZA et al., 2013; FERRÃO et al., 2019), dessa forma, os híbridos destacam-se em relação a seus genitores (MONTAGNON et al., 2008).

Na década de 20, Vavilov realizou expedições de levantamento e coleta de germoplasma com o intuito de quantificar e caracterizar as espécies cultivadas, assim, identificou grande diversidade em algumas regiões do mundo, determinando oito centros de origem de espécies (ALLARD, 1971; FERRÃO et al., 2019). Além dos centros de origem, existem os centros de diversidade, que são regiões onde as espécies foram domesticadas. E como visto anteriormente, a África Central, mais especificamente, a bacia do congo, é o centro de diversidade genética de *C. canephora* (BERTHAUD e CHARRIER, 1985; FERRÃO et al., 2019).

A partir de 1960, a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO), começaram a se preocupar com a perda de variabilidade genética do

café, então, coletas de germoplasma se intensificaram. No Brasil, em 1985, o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), iniciou um programa de pesquisa da variabilidade genética do *C. canephora*, através de seleção e estratégias de melhoramento e após trinta e cinco anos de pesquisas, o resultado que se tem, é de nove cultivares clonais e duas seminais, o que possibilitou o desenvolvimento da cultura no estado do Espírito Santo (FERRÃO et al., 2021). O instituto ainda mantém um banco de germoplasma estabelecido em campo, incluindo cultivares, clones, progênies e híbridos.

No mundo existem também vários bancos de germoplasma ou coleções registradas com *C. canephora*, contendo quantidades significativas de acessos, sendo, no INCAPER, 375 acessos, IAC são 1.000 e por fim, CERNAGEN com 19 (FERRÃO et al., 2019).

Para o melhoramento genético de *C. canephora*, a análise de variabilidade genética em acessos, junto com a manutenção e caracterização de bancos de germoplasma é de extrema importância para que a diversidade genética possa ser explorada e as características desejadas da coleção atual possam ser selecionadas para o desenvolvimento de novos genótipos, compondo assim, variedades clonais (MARCOLAN e ESPÍNDULA, 2015; FERRÃO et al., 2021), possibilitando assim que a espécie possa ser adaptada e estabelecida em outros estados, como está acontecendo em Rondônia e Amazonas.

3.8 Melhoramento genético de *Coffea canephora*

O melhoramento genético de espécies vegetais é uma ciência que objetiva manipular plantas com base em interesses econômicos e sociais da humanidade. Para que seja um sucesso, é necessário que se tenha conhecimento da diversidade genética do germoplasma da espécie que será submetida ao processo, bem como ter bem estabelecido, os métodos a serem utilizados na pesquisa e a estrutura para manter o programa de melhoramento (FERRÃO et al., 2019).

O melhoramento genético tem participado de modo efetivo e fundamental acerca das diferentes características das plantas do gênero *Coffea*, ao longo dos anos, estudos de melhoramento genético estavam sendo direcionados especificamente para o café arábica, a fim de se obter cultivares resistentes a doenças, mais produtivas e estáveis. Tendo como os principais métodos utilizados nas pesquisas: introdução, seleção de plantas individuais

com teste de progênie, método genealógico, retrocruzamento e métodos de seleção recorrente (SAKIYAMA et al., 2005; FERRÃO et al., 2019).

Coffea canephora por ser uma espécie alógama com autoincompatibilidade, tem se destacado pelo seu alto vigor vegetativo, maior rusticidade, dentre outras características vantajosas, e por possuir diferenças biológicas quando comparado com o arábica, o seu melhoramento tem sido focado no aumento de produtividade, resistência à seca, uniformidade de maturação e qualidade de bebida (FERRÃO et al., 2019).

Os programas de melhoramento genético desta espécie tiveram início por volta de 1900, quando as primeiras plantas foram levadas da África para a ilha Java (CHARRIER e BERTHAUD, 1985). Atualmente, as principais técnicas utilizadas são: seleção massal, clonal e entre e dentro de progênes de meios-irmãos, introdução de germoplasma e seleção adaptativa, hibridação, método de retrocruzamento seleção recorrente e recorrente recíproca (FERRÃO et al., 2019).

Com o avanço da tecnologia e do interesse comercial em *C. canephora*, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando o seu melhoramento. Por exemplo: pesquisas de seleção genômica ampla no melhoramento de *C. canephora* (CARNEIRO et al., 2019). Seleção de clones de canephora para produção superior de café beneficiado foi realizado por Silva et al. (2018). E uma outra pesquisa desenvolvida por Rocha et al. (2021), teve como objetivo quantificar a associação entre o ganho de seleção estimado em condições experimentais e o ganho de seleção realizado em campo, buscando quantificar a eficiência do melhoramento do *Coffea canephora* e assim, selecionaram um clone com maior potencial agrônômico. Há também estudos de estimativas de parâmetros genéticos, diversidade e estudos de herança na espécie.

A obtenção de maiores ganhos genéticos com programas de melhoramento de *C. canephora* só será possível se houverem ações que priorizem as pesquisas com esta espécie que possui grande importância social e econômica no mundo.

3.9 Espectroscopia de fluorescência de raios-x de reflexão total (TXRF).

O café (*Coffea canephora*) é uma das bebidas mais consumidas mundialmente (MISHRA e SLATER, 2012; HUDED et al., 2020), E contém elementos considerados essenciais para o corpo (OLIOSI et al., 2020), como $N > K > Ca > P = Mg = S$ e $Fe > B > Mn > Cu > Zn$ (SANTOS et al., 2021b). E quando ocorre o desequilíbrio nutricional, esses elementos tendem a se acumular nos tecidos das plantas (OLIOSI et al., 2020),

ocasionando uma série de processos metabólicos indesejáveis que podem interferir na qualidade da bebida (MARTINEZ et al., 2014).

A utilização de técnicas que visam identificar, quantificar e discriminar elementos que prejudicam a produção em plantas do cafeeiro, bem como a saúde humana é imprescindível para bom desempenho dos programas de melhoramento. Além da preocupação com a qualidade da bebida, o *C. canephora* é uma planta com alta variabilidade genética para seleção de genótipos superiores para vários caracteres. Dessa forma, estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de se selecionar um material genético adaptado às nossas condições edafoclimáticas, que seja produtivo e forneça bebida de qualidade. Assim, o status nutricional da planta é um aspecto relevante no melhoramento do cafeeiro, pois como citado anteriormente, é um fator altamente influenciável pela variabilidade genética.

Diversas técnicas como a espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) têm sido empregadas na análise multielementar, como por exemplo, a fluorescência de raios-X dispersiva de energia convencional (EDXRF) (RAJAPAKSHA et al., 2017), fluorescência de raios-X dispersiva de comprimento de onda (WDXRF) (SHALTOUT et al., 2012) e fluorescência de raios-X de reflexão total (TXRF) (MALTSEV et al., 2021; WINKLER et al., 2020; DALIPI et al., 2018; MARGUÍ). Dentre elas, a fluorescência de raios-X de reflexão total (TXRF) por ser uma técnica analítica de alta praticidade, precisão e confiabilidade (LARA-ALMAZÁN et al., 2021), tem sido amplamente utilizada para a análise da composição elementar de alimentos vegetais (DALIPI et al., 2017; BORGESE et al., 2015).

O TXRF apresenta uma modificação geométrica da fluorescência convencional de raios-X por dispersão de energia (EDXRF), cujos ângulos estão abaixo do ângulo crítico de reflexão total o que reduz os ruídos de fundo, resultando em alta sensibilidade e redução significativas dos efeitos de matriz (KLOCKENKÄMPER E VON BOHLEN, 2014). É uma ferramenta muito utilizada devido sua análise multielementar simultânea, por detectar quase todos os elementos da tabela periódica com baixos limites de detecção (MARGUI et al., 2019). A alta reprodutibilidade dos resultados, os curtos tempos de medição e a pequena quantidade de amostra necessária a ser analisada, torna o TXRF uma das técnicas mais vantajosas para uso em análise multielementar (FERNÁNDEZ-RUIZ et al., 2018). Além disso, apresenta uma quantificação simplificada com a utilização de padrão interno, como por exemplo, o gálio (Ga) considerando a sensibilidade relativa do elemento (DALIPI et al., 2017).

O TXRF é aplicado em diversas análises e tem se mostrado adequado para diferentes amostras ambientais, como por exemplo: folhas de chá e ervas, plantas aquáticas, alimentos vegetais, plantas medicinais, entre outros (PASHKOVA et al., 2020). Ter o conhecimento da composição elementar de plantas tem se tornado algo de interesse geral, principalmente de plantas que são consumidas, como especiarias, chás e o próprio café. Elementos essenciais como Mn, Fe, Cu, Zn, Ni, Cr, P, K e Ca geralmente são procurados pois são fundamentais para o crescimento da planta, contudo, uma alta ingestão desses elementos pode ser tóxico, inclusive, podem alterar o sabor de bebidas como os chás e café (DE LA CALLE et al., 2013). A distribuição e o acúmulo de certos elementos em diferentes partes de uma mesma planta têm sido determinados para várias espécies vegetais (DE LA CALLEE et al., 2013).

Ao se selecionar o genótipo de café superior, por exemplo, busca-se associar estimativas de parâmetros genéticos com a análise multielementar dos clones para assim, identificar quais clones apresentaram melhor uso dos elementos, absorção, translocação e outros. E para esta finalidade, o TXRF tem se mostrado a ferramenta eleita por inúmeros benefícios e motivos já citados anteriormente. Consequentemente, visto todas as vantagens do TXRF, atualmente há uma maior demanda para a determinação multielementar de folhas, raízes, frutos, solos e outros. E com o auxílio deste equipamento, pesquisas científicas muito relevantes estão se tornando corriqueiras, inclusive para identificação de espécies da Amazônia que possam apresentar ação fitorremediadora ou até mesmo para seleção de genótipo superior para implementação de plantio comercial.

3.10 Eficiência de absorção, translocação e utilização de elementos na planta.

Para o estabelecimento de um plantio comercial, várias tecnologias são aplicadas, dentre elas: irrigação, controle de pragas e doenças, seleção de genótipos superiores e densidade de plantio (LÓPEZ-LIMA et al., 2020), o manejo nutricional adequado também é relevante para esta finalidade (PARTELLI et al., 2018; SILVA et al., 2021). O status nutricional de uma planta pode ser determinado pelo conteúdo presente em tecidos vegetais.

As folhas são consideradas os órgãos vegetais principais para uma adequada diagnose nutricional e a correta interpretação de uma análise foliar se torna uma ferramenta de suma importância para que os plantios de café possam receber a adubação

adequada. E para este fim, são utilizados níveis críticos e faixas de suficiência (PARTELLI et al., 2016; PARTELLI et al., 2018), contudo, esses valores de referência não levam em consideração a diversidade genética de *Coffea canephora*, a qual é uma espécie alógama e que apresenta autoincompatibilidade (GOMES et al., 2016; SILVA et al., 2021).

Altos rendimentos são observados em lavouras de café por meio do uso de genótipos desenvolvidos ao longo dos anos através de melhoramento genético (PARTELLI et al., 2020; SANTOS et al., 2021b). A alta variabilidade genética dentro de *C. canephora* permite a identificação de plantas com características diferentes (GILES et al., 2018; GILES et al., 2019; MARTINS et al., 2019). Os genótipos que são utilizados em plantios comerciais se diferem quanto a: tolerância à seca (MARTINS et al., 2019), acúmulo de biomassa e nutrientes (PARTELLI et al., 2014; MARRÉ et al., 2015), crescimento vegetativo (PARTELLI et al., 2013), absorção e eficiência do uso de nutrientes (AMARAL et al., 2011; MARTINS et al., 2016), sendo a variância genotípica um dos principais fatores que causam diferença nutricional entre espécies (FAGERIA et al., 1998; SILVA et al., 2021).

Esta grande diversidade permite a seleção e introdução de genótipos superiores na cadeia produtiva do café (SANTOS et al., 2021b), já que as etapas de absorção, transporte e redistribuição de nutrientes nas plantas são controladas geneticamente, assim, os genótipos podem ser então selecionados e utilizados para que se tenha um uso mais eficiente dos nutrientes que forem disponibilizados para as plantas (GABELMAN et al., 1983; SILVA et al., 2021).

Os genótipos altamente produtivos possuem exigências nutricionais elevadas (GOMES et al., 2016), e podem variar ou não entre as cultivares. E fatores como: duração do ciclo reprodutivo (PARTELLI et al., 2014; MARRÉ et al., 2015), anatomia vegetal (AMARAL et al., 2011) e fases fenológicas são alguns dos mecanismos responsáveis pela variação nutricional em genótipos de café (OLIOSI et al., 2020), podendo variar em concentração e requerer um elemento em maior ou menor quantidade (DALCOMO et al., 2017; GILES et al., 2019).

De modo geral, N, Ca e K são absorvidos em maiores quantidades por *C. canephora*, enquanto P, Mg e S são requeridas em menores quantidades (BRAGANÇA et al., 2008; PARTELLI et al., 2014; COVRE et al., 2016; SANTOS et al., 2021b). Para que as plantas realizem o uso eficiente dos nutrientes, alguns mecanismos podem estar associados a características morfológicas e fisiológicas delas, e assim, fornecer subsídio

para o manejo nutricional adequado (ROZANE et al., 2007; NUNES et al., 2013). Como por exemplo, a análise floral evita maiores perdas nutricionais durante o crescimento vegetativo (MALAVOLTA et al., 2002; DUBBERSTEIN et al., 2016).

A análise de grãos é uma característica relevante para seleção na espécie, pois gera respostas essenciais sobre os nutrientes responsáveis pela produtividade das culturas (COVRE et al., 2016). As folhas são mais utilizadas nas análises em cafeeiros pois são os órgãos que estão fisiologicamente ativos e presentes em todos os ciclos fenológicos da cultura, fornecendo um monitoramento do estado nutricional em que a planta se encontra (MALAVOLTA et al., 2002; DUBBERSTEIN et al., 2016; SANTOS et al., 2021b).

Entendendo que a capacidade de absorção, translocação e utilização de elementos na planta está diretamente conectada com a variabilidade genética, tornam-se necessárias as pesquisas envolvendo genótipos com potencial de adaptação, especialmente em regiões com limitação nutricional (TOMAZ et al., 2011; MARTIS et al., 2013b). Entretanto, não existem muitos métodos para que os genótipos eficientes possam ser identificados simultaneamente, assim, durante o estudo de adaptação de clones em determinada região, é possível observar, com o auxílio do TXRF o comportamento de clones de *C. canephora* em relação à absorção, translocação e uso de nutrientes e assim correlacioná-los, identificando então um genótipo superior.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da UFAM-FAEXP/UFAM, localizada entre as coordenadas 2°38'20''S 2°39'10''S 60°40'W 60°30'W, no km 38 da Rodovia BR 174, Ramal, Pres. Figueiredo, AM (Figura 1).

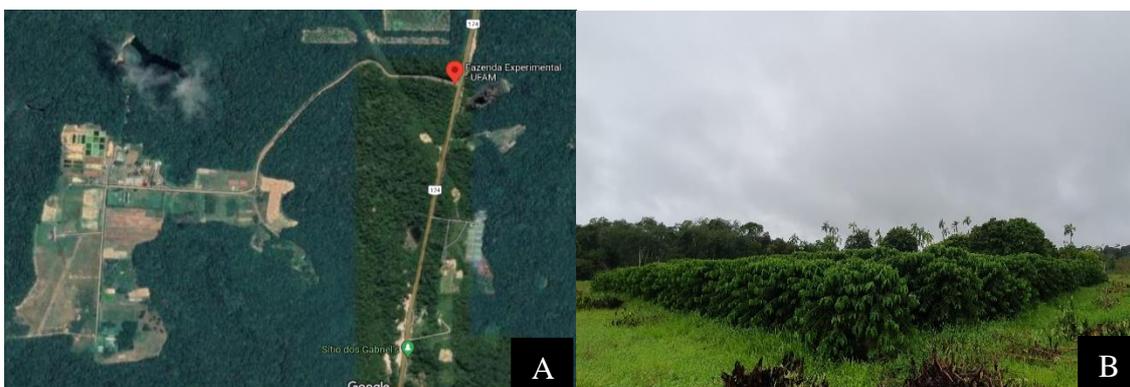


Figura 1.Área de estudo. **(A)** Localização da FAEXP via satélite; **(B)** Foto em panorâmica do experimento estabelecido na fazenda. **Fonte:** Google Maps; **Foto:** BEZERRA (2021).

4.2 Material vegetal e análise de adaptação dos clones

Os quinze genótipos clonais foram propagados por estaquia, sendo dez híbridos (Conilon x Robusta) oriundos do Programa de Melhoramento de *C. canephora* da Embrapa Rondônia e cinco clones que compõem a cultivar Conilon – BRS Ouro Preto.

Para a análise de adaptação dos clones foram levados em consideração os caracteres quantitativos como: altura total da planta (m), comprimento da haste ortotrópica (cm) e comprimento do ramo plagiotrópico (cm), com o auxílio de uma régua hipsométrica, graduada em centímetros. Estes dados, foram, submetidos a testes de normalidade e homogeneidade de variância.

4.3 Condução do Experimento

Foram estudados quinze genótipos clonais de *C. canephora* (Tabela 1). Para este experimento foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, e cada parcela foi composta por dez plantas úteis, o espaçamento utilizado foi de 3 x 1,0 m, com covas de 50 x 50 x 80 cm. O experimento contou com 600 plantas úteis e foram adicionadas duas fileiras de bordadura em cada bloco. O manejo, a condução e os tratamentos culturais no experimento foram realizados de acordo com as necessidades e as recomendações técnicas para a cultura. O experimento não foi irrigado.

Tabela 1. Genótipos avaliados de clones de *Coffea canephora* instalados na Fazenda experimental da UFAM, Amazonas. E a origem de dez cultivares.

Clones utilizados no experimento		
Identificação	Cultivar	Origem
C1	BRS 3137	Polinização aberta
C2	BRS 3213	Encapa03x Robusta2258
C3	BRS 1216	Encapa03xRobusta1675
C4	BRS 2314	Encapa03xRobusta640
C5	BRS 3210	Encapa03xRobusta2258
C6	BRS 3220	Encapa03xRobusta1675
C7	BRS 2336	Polinização aberta
C8	BRS 2299	Conilon – BRS Ouro Preto *
C9	BRS 3193	Polinização aberta
C10	Clone 12	Encapa03xRobusta2258
C11	BRS 2357	Conilon BRS Ouro Preto *
C12	RO_C125	Conilon – BRS Ouro Preto
C13	RO_C160	Conilon – BRS Ouro Preto
C14	Clone 9	Encapa03xRobusta640
C15	Clone 15	Encapa03xRobusta2258

*genótipos de polinização aberta provenientes da cultivar Conilon-BRS ouro Preto, desenvolvida pela EMBRAPA no ano de 2013. Encapa: conilon.

4.4 Análises estatísticas e genéticas do ensaio de campo

4.4.1 Análise de normalidade

Os dados obtidos para os caracteres avaliados foram submetidos ao teste de normalidade (teste de Lilliefors). Se verificada a necessidade de transformação dos mesmos, serão então transformados conforme a expressão proposta por Snedecor (1945).

$$Y = \arcseno \sqrt{x/100}$$

4.4.2 Análise de variância e teste de médias

Os dados serão submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade. Serão estimados parâmetros genéticos.

$$Y_{ij} = m + B_j + G_i + e_{ij}$$

Sendo:

Y_{ij}: valor fenotípico do caráter Y medido no material genético i e repetição j;

m: média geral paramétrica dos dados em estudo;

B_j: efeito do j-ésimo bloco (j=1, 2,,b);

G_i: efeito do i-ésimo genótipo (i=1, 2,,g);

e_{ij}: erro médio associado à observação Y_{ij}.

Tabela 2. Esquema resumido da análise de variância do experimento de 15 clones de *Coffea canephora*.

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrados Médios	F	E(QM)
Bloco	b-1	QMB		$\sigma^2 + \sigma^2_b$
Genótipo	g-1	QMG	QMG/QMR	$\sigma^2 + r\sigma^2_g$
Resíduo	g(r-1)	QMR		σ^2
Média			M	
Coef. Variação (CV%)		100√QMR/M		

σ^2_g : Componente de variância genotípico;

σ^2_b : Componente de variância de bloco;

σ^2 : Componente de variância residual;

r: Número de repetições.

Para a análise de variância conjunta dos dados, será adotado o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = m + B_j + G_i + A_k + GA_{ik} + E_{ijk}$$

Sendo:

Y_{ijk} : valor fenotípico do caráter Y medido no material genético i, no ambiente k e no bloco j;

M : média geral paramétrica dos dados em estudo;

G_i : efeito do i-ésimo genótipo ($i=1, 2, \dots, g$);

B_j : efeito do j-ésimo bloco ($j=1, 2, \dots, b$);

A_k : efeito do k-ésimo ambiente experimental ($k= 1, 2, \dots, a$);

GA_{ik} : efeito da interação do i-ésimo genótipo com o k-ésimo ambiente;

E_{ijk} : erro médio associado à observação Y_{ijk} .

Tabela 3. Esquema resumido da análise de variância conjunta 15 clones de *Coffea canephora* em dois anos (ambiente) de avaliação.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrados Médios	F	E(QM)
Genótipo	$g-1$	QMG	QMG/QMGA	$\sigma^2 + r\sigma_{ga}^2 + a\sigma_g^2$
Bloco			QMA/QMGA	$\sigma^2 + r\sigma_{ga}^2 + g\sigma_a^2$
Ambiente	$a-1$	QMA	QMGA/QMR	$\sigma^2 + r\sigma_{ga}^2$
G x A	$(a-1)(g-1)$	QMGA		σ^2
Resíduo	$ga(r-1)$	QMR		
Média			M	
Coef. De Variação (CV%)			$100\sqrt{QMR/M}$	

σ_g^2 : Componente de variância genotípico;

σ_a^2 : Componente de variância ambiental (temperaturas);

σ_{ga}^2 : Componente de variância da interação entre genótipo e ambiente;

σ^2 : Componente de variância residual;

r, g, a: Número de repetições, genótipos e ambientes, respectivamente.

As médias serão comparadas por meio do teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

4.4.3 Estimativas dos parâmetros genéticos

Os parâmetros genéticos estimados a partir da análise de variância individual terão por base as expressões:

a) Componente de variância fenotípica

$$\hat{\sigma}_f^2 = \frac{QMG}{r}$$

b) Componente de variância ambiental

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{QMR}{r}$$

c) Componente de variância genotípica

$$\hat{\sigma}_g^2 = \frac{QMG - QMR}{r}$$

d) Herdabilidade no sentido amplo (%)

$$h^2 = \frac{\hat{\sigma}_g^2}{QMR/r} \times 100$$

e) Coeficiente de variação genético

$$CVg = 100 \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_g^2}}{M}$$

f) Razão entre CVg e CVe

$$\text{Razão} = \frac{CVg}{CVe}$$

4.4.4 Correlações genéticas e ambientais

As correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais serão calculadas de acordo com as seguintes fórmulas:

a) Correlações fenotípicas (rf)

$$rf = \frac{PMP_{xy}}{\sqrt{QMP_x \cdot QMP_y}}$$

Em que:

PMP_{xy} = produto médio das progênes;

QMP_x = quadrado médio do caráter x das progênes;

QMP_y = quadrado médio do caráter y das progênes.

b) Correlações ambientais (ra)

$$ra = \frac{PMR_{xy}}{\sqrt{QMR_x \cdot QMR_y}}$$

Em que:

PMP_{xy} = produto médio do resíduo;

QMR_x = quadrado médio do resíduo do caráter x;

QMR_y = quadrado médio do resíduo do caráter y.

c) Correlações genóticas (rg)

$$rg = \frac{\hat{\sigma}_{gxy}^2}{\sqrt{\hat{\sigma}_{gx}^2 \cdot \hat{\sigma}_{gy}^2}}$$

Sendo:

$$\hat{\sigma}_{gxy}^2 = \frac{PMT_{XY} - PMR_{XY}}{r}; \hat{\sigma}_{gx}^2 = \frac{QMT_x - QMR_x}{r}; \hat{\sigma}_{gy}^2 = \frac{QMT_y - QMR_y}{r}$$

Em que:

$\hat{\sigma}_{gxy}^2$ = estimador da covariância genética dos caracteres X e Y e $\hat{\sigma}_{gx}^2$ e $\hat{\sigma}_{gy}^2$ = estimadores da variância genética dos caracteres X e Y, respectivamente e r = número de repetições.

A significância de todas as correlações será testada pelo método de *bootstrap* com 5000 simulações.

4.5 Material vegetal e amostragem de solo, raízes rizosféricas, folhas e frutos para análise em TXRF.

Foram coletadas amostras de solo, raízes finas, folhas jovens e frutos dos quinze clones para as devidas análises. Foram coletadas de 5 a 8 amostras de folhas saudáveis, jovens e mais velhas, a mesma quantidade para a coleta de raízes finas, solo e grãos e cascas de café (Figura 2). Para a coleta das raízes foi realizada limpeza prévia da vegetação rasteira, a fim de que a coleta do material fosse facilitada e para que não houvesse a mistura das raízes dos cafeeiros com as de plantas invasoras. A profundidade de coleta foi de 0 a 20 cm, a partir de aberturas realizadas próximo ao colo da planta (Figura 2).



Figura 2. Alguns dos materiais coletados para análise. (A) Folhas; (B) Raízes Finas; (C) Área em destaque da coleta de solo e de raízes. **Fotos:** BEZERRA (2021).

Após coletadas, como o tempo de transporte da fazenda para o Laboratório de Genética Vegetal da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), levaria cerca de 1h e meia, não houve a necessidade de armazená-las em sacos com sílica e isopor, assim, as amostras foram então acondicionadas em sacos plásticos simples previamente identificados.

As amostras de solo, por sua vez, foram coletadas também na camada de 0-20 cm de profundidade, com o auxílio do trado tipo Holandês. Assim, foi retirada uma amostra simples da área próxima das plantas, (Figura 2C). Posteriormente, estas amostras foram misturadas a fim de formar uma amostra composta para a área de estudo. Seu armazenamento foi realizado em sacos plástico simples previamente identificados. Logo após a coleta, no laboratório de genética vegetal, o solo foi seco ao ar e depois de seco, foi destorroado com o auxílio de um cadinho e peneirado em malha de 4 mm (Figura 3).



Figura 3. Amostras de solo destorroados secando em temperatura ambiente. **Fotos:** BEZERRA (2021).

Subamostras foram passadas em malhas de 2 mm obtendo a terra fina seca ao ar (TFSA), de acordo com Manual de Métodos de Análise de Solos (EMBRAPA, 2006). Posteriormente, as 15 amostras foram conservadas em temperatura ambiente no Laboratório de Genética Vegetal da Faculdade de Ciências Agrárias - UFAM até o início das análises. A determinação do pH do solo foi realizada conforme a metodologia de Boyle (1663).

4.6 Massa seca e acúmulo de nutrientes nas plantas

As amostras de folhas e raízes foram lavadas com solução de água + detergente neutro (1 mL.L^{-1}) água corrente (Figura 4), água destilada e água deionizada. As raízes foram lavadas em peneira com malha de 1 mm, em água corrente durante um minuto, em seguida, foram submetidas à tríplex lavagem com água destilada e, posteriormente, com água ultrapura.



Figura 4. Processo de lavagem de folhas e raízes. **Fotos:** BEZERRA (2021); TOMAZ (2021).

Após o processo de lavagem, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar, em temperatura constante de 65°C , até atingirem peso constante. Após a secagem foi determinada a massa seca das folhas (MSF), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) ($\text{MST} = \text{MSF} + \text{MSR}$), utilizando-se balança do tipo Mettler PM 30-K com precisão de $0,001 \text{ g}$ (Figura 5). A partir dos dados de massa seca foram calculadas a razão de massa seca das raízes (RMR) e a razão massa seca das folhas (RMF) (DICKSON et al., 1960).



Figura 5. Secagem e pesagem das amostras de raízes e folhas. **Fotos:** BEZERRA (2021).

4.7 Análise pelo método analítico de fluorescência de raios-X por reflexão total (TXRF)

4.7.1 Preparo do material para leitura

O preparo das amostras de solo rizosférico, folhas, raízes e grãos dos clones de *Coffea canephora* e análise em TXRF, foram realizadas em parte no laboratório de melhoramento vegetal da UFAM e em parte, no laboratório técnico científico de análise química (SETEC) da Superintendência Regional da Polícia Federal do Amazonas.

As amostras secas de solo, raízes, folhas e grãos foram moídas manualmente e armazenadas em microtubos do tipo *ependorf* de 2,0 mL previamente identificados e separados, correspondendo a cada clone. Após esta etapa, foi acrescentada uma esfera magnética, em cada microtubo, para que a britagem das amostras fosse facilitada. Assim, estas amostras foram pulverizadas em um moedor vibratório de modelo MM400/Ratsch por um período de 40 minutos a 1 hora. Após a pulverização, as esferas foram retiradas e foi realizada a pesagem, deixando entre 40 e 50 mg do material de solo, raízes, folhas e grãos em novos *ependorfs* de 2,0 mL, correspondentes a cada clone, para as posteriores análises (Figura 6).



Figura 6. Preparo das amostras para análise. (A) Amostras previamente moídas manualmente, sendo acrescentadas das esferas magnéticas; (B) Amostras em processo de pulverização; (C) Pesagem das amostras. **Fotos:** Bezerra (2021)

4.7.2 Suspensão das amostras

Após a pesagem das amostras de solo, raízes, folhas e grãos de clones de *Coffea canephora*, foram adicionados 1,5 mL da solução (e.g. 1% aqueous Triton x100) em cada *ependorf* para a suspensão das amostras, em seguida, foram agitadas em vórtex para a homogeneização (Figura 7). Após esta etapa, foi adicionado 10 μ L de um padrão interno de Gálio (Ga) nas amostras.

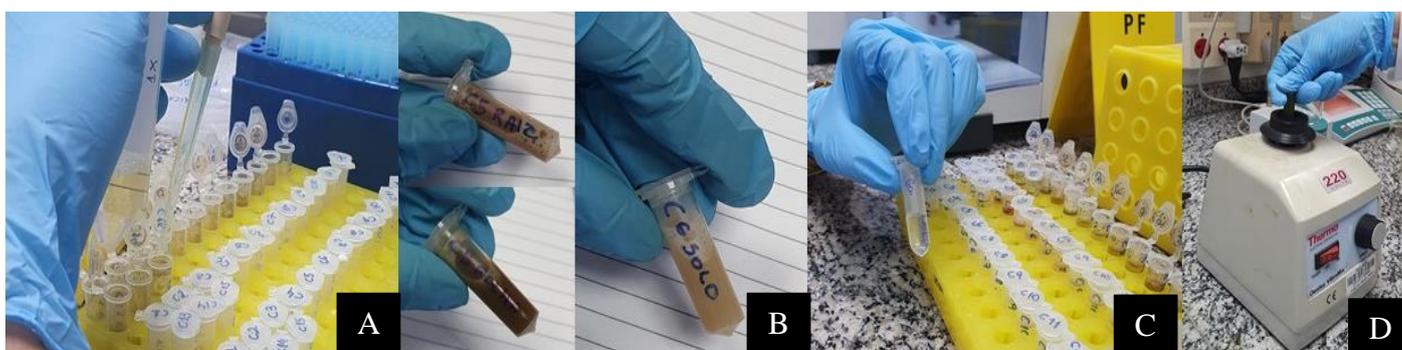


Figura 7. Etapas de suspensão das amostras. (A) Adição de e.g. 1% aqueous Triton x100 em cada amostra; (B) Amostras suspensas; (C) Adição do padrão gálio nas amostras suspensas; (D) Homogeneização das amostras com auxílio do vórtex. **Fotos:** BEZERRA (2021).

O material utilizado para a pipetagem das amostras foi carregadores de quartzo não siliconados e secos, que haviam sido previamente preparados, com 10 μ L do PVC pipetado no centro deles, a fim de permitir que uma película fosse gerada e as amostras fossem distribuídas uniformemente nos discos. Os discos foram colocados para secar em chapa de aquecimento a uma temperatura aproximada de 100 °C. Após a secagem do PVC, foram pipetados 10 μ L da suspensão das amostras e novamente colocadas para secar. Após secos, os discos foram colocados nas colunas de mercúrio (Hg), tálio (Tl),

enxofre (S), rubídio (Rb), ouro (Au) e frâncio (Fr) correspondendo ao mapa de análise injetado no TXRF (Figura 8).

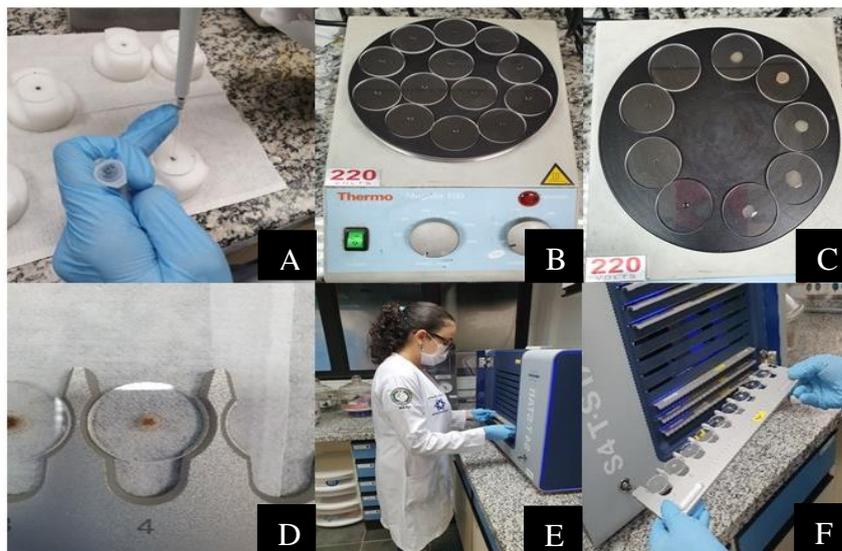


Figura 8. Preparação das amostras. (A) Pipetagem do PVC nos discos; (B) Secagem dos discos; (C) Secagem dos discos contendo as amostras suspensas; (D) Discos com as amostras já secas; (E) e (F) Injeção das amostras nas colunas do TXRF. **Fotos:** BEZERRA (2022).

4.7.3 Método analítico de fluorescência de raios-X de reflexão total (TXRF).

Para a leitura das amostras foi utilizado um espectrômetro de bancada modelo S4 T-STAR/Bruker, (Bruker, Alemanha) (Figura 9). O espectrômetro é equipado com dois tubos de raios-X: um tubo de raios-X de ânodo Molibdênio Mo a 17,5 keV, que consiste em um metal, podendo ser Rh, Mo ou Cr (esses elementos, produzem um comprimento de onda característico); e um cátodo que consiste em um filamento de tungstênio (W). Isso permite o uso da excitação a 35 kV.



Figura 9. Espectrômetro de bancada utilizado para as análises. **Fotos:** BEZERRA (2022).

As linhas de fluorescência podem apenas ser excitadas com linhas de energia superior a sua própria linha de fluorescência, por essa razão os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Escândio (Sc), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Germânio (Ge), Arsênio (As), Selênio (Se), Bromo (Br), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Bário (Ba), Háfnio (Hf) e Tálcio (Tl) foram determinados pelo tubo de raios-X Mo. Enquanto, Ítrio (Y), Nióbio (Nb), Estanho (Sn), Antimônio (Sb), Telúrio (Te), Iodo (I), Chumbo (Pb) e Itérbio (Yb), foram determinados pelo tubo de raios-X W. Foram realizadas amostras de branco e duplicatas das amostras de solo rizosférico e tecidos de *Coffea canephora*.

Foi determinado o tempo de medição das amostras em torno de 600s, a fim de gerar qualidade no espectro. Os portadores de quartzo foram aplicados como porta amostras e refletores. Para a determinação das sensibilidades relativas dos elementos, foi utilizado o gálio (Ga) como elemento de referência por apresentar concentrações conhecidas, seguido por um cálculo de sensibilidade que é baseado na área do pico de cada elemento, de acordo com a seguinte expressão:

$$S_i = \frac{N_i \cdot C_{Ga}}{N_{Ga} \cdot C_i}$$

Em que:

N_i : contagens líquidas do pico de determinado elemento;

N_{Ga} : contagens líquidas do pico de Ga;

C_i : concentração de determinado elemento na solução;

C_{Ga} : concentração do elemento Ga na solução.

4.8 Análises estatísticas e genéticas dos dados

Os resultados de análises de componentes inorgânicos em tecidos vegetais foram previamente submetidos ao teste de detecção para retirada de *outliers* e, em seguida, aos testes de normalidade (SHAPIRO e WILK, 1965) e homocedasticidade de variâncias (LEVENE, 1960). Os dados que passaram nos pressupostos foram submetidos à análise de variância ($P < 0,01$ e $P < 0,05$), MSF, MSR, RMF, RMR. Quando o F foi significativo, comparou-se as médias de tratamento usando o teste de Tukey.

Os dados que não atenderam estes pressupostos da ANOVA (os teores dos componentes inorgânicos do solo e tecidos de *Coffea canephora*) foram transformadas na

função logarítmica base 10 e, submetidos novamente aos testes de normalidade e homocedasticidade das variâncias. Como as variáveis persistiram anormais e/ou heterogêneas, os dados originais foram submetidos a análise não paramétrica (KRUSKAL e WALLIS, 1952), teste da soma de postos com $p\text{-valor} < 0,05$ (MANN e WHITNEY, 1947). Os dados foram analisados pelo programa computacional SPSS IBM versão 24.0 (FIELD, 2013).

Os genótipos de cada área foram agrupados pelo método hierárquico das médias das distâncias (UGPMA - Unweighted Pair-gorup Method Using an Arithmetic Avarege) com uso da matriz de distâncias euclidiana média e dispersão gráfica de similaridade entre eles realizada pelo Método da Análise de Coordenadas Principais (PCA), a partir do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021) e do seu complemento *RStudio* Team (2020), respectivamente.

Posteriormente, foi aplicada a análise de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS), em que a maior dispersão das unidades foi identificada como havendo maior dissimilaridade genética. Para a obtenção das análises foi utilizado o pacote *Vegan* do programa R. O procedimento partiu de uma organização inicial que, interativamente, reorganizou os indivíduos de maneira a diminuir o *stress* (*STandard RESiduals Sum of Squares*). O *stress* (S) é uma função que informa a magnitude da perda de informação na matriz de dissimilaridade com a utilização do procedimento, sendo essa uma medida do quanto as posições dos indivíduos em uma configuração n-dimensional desviam-se das reais distâncias (dissimilaridades) após o escalonamento. O *stress* foi interpretado pelo valor de $R^2 = 1-S^2$ (OKSANEN et al., 2013). A análise de correlação de Pearson entre as variáveis foi realizada pelo programa Genes (CRUZ, 2013).

Foi realizada seleção massal fenotípica dos genótipos superiores para seleção, uma vez que tem variabilidade fenotípica, considerando a média dos componentes inorgânicos das folhas que mostraram diferença significativa. Foram selecionados os genótipos que estavam acima da média para a concentração de microelementos por clone. Também foi realizado correlações de *Spearman* entre os microelementos analisados (FIELD, 2013).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Adaptabilidade dos clones

A estimativa de parâmetros genéticos, como o coeficiente de variação genético e índices de variação e hereditariedade, é muito importante em estudos de diversidade genética de populações, uma vez que permitem conhecer a estrutura genética da população e, assim, identificar genótipos promissores ou distintos, além de possibilitar reunir esses genótipos para obter homogeneidade dentro de cada grupo e heterogeneidade entre diferentes grupos (CRUZ et al., 2012; CARMONA et al., 2015; GILES et al., 2019). Essas estimativas também são importantes na definição de métodos de melhoramento a serem considerados, na identificação da natureza da ação dos genes envolvidos no controle dos caracteres quantitativos, bem como, na obtenção de ganhos genéticos (FERRÃO et al., 2008; CRUZ e CARNEIRO, 2014). Entre os parâmetros genéticos e fenotípicos que podem auxiliar na seleção de cafeeiros promissores, destacam-se as variâncias genéticas e fenotípicas, herdabilidades e processos genéticos esperados (FERRÃO et al., 2008).

No melhoramento genético do café há a necessidade de estudo de diferentes caracteres quantitativos, os quais são governados por muitos genes e assim, sofrem muita influência do ambiente (RODRIGUES et al., 2012). Neste trabalho, foram detectadas diferenças significativas de genótipos para comprimento do ramo ortotrópico ($p < 0,05$) e altura da planta ($p < 0,01$), no ano de 2020 (Tabela 4). Esses resultados demonstram a existência de variabilidade genética entre os genótipos para estas características avaliadas, que por sua vez, são indicativos promissores para a realização de melhoramento para estas características estudadas, possibilitando a seleção de clones superiores e seu uso em programas de melhoramento para a espécie em questão.

Tabela 4. Quadrados médios e parâmetros genéticos para comprimento do ramo plagiotrópico/lateral (CRP), comprimento da haste ramo ortotrópica/principal (CRO) e altura da planta (AP) de clones de *Coffea canephora*, avaliados no experimento em Manaus – AM, em 2019.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios		
		Comprimento do ramo plagiotrópico	Comprimento da haste ortotrópica	Altura da planta
Blocos	3	4,7703	0,1681	118,0861
Genótipo	14	4,0686 ^{ns}	1,2177*	540,5942**
Resíduo	42	2,1499	0,6164	40,3042
Parâmetros genéticos				
Média		2,05	1,63	52,43
CVe (%) ¹		71,39	48,16	12,11
Var. Fenotípica		1,02	0,30	135,15
Var. Ambiental		0,54	0,15	10,08
Var. Genotípica		0,48	0,15	125,07
Herdabilidade (%)		47,16	49,38	92,54
CVg (%) ²		33,72	23,79	21,3
CVg/CVe ³		0,47	0,49	1,76

^{ns} não significativo; **: * $p < 0,01$, $p < 0,05$, respectivamente, pelo teste Tukey. ¹Coeficiente de variação experimental; ²Coeficiente de variação genético; ³Razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação experimental.

Já nas análises de variância individual, que foram realizadas no ano de 2021, foram observadas diferenças significativas para os três caracteres avaliados, comprimento da haste ortotrópica ($p < 0,05$), comprimento do ramo plagiotrópico e altura da planta ($p < 0,01$). Demonstrando assim, que há variabilidade genética entre os clones avaliados (Tabela 5).

Tabela 5. Quadrados médios e parâmetros genéticos para comprimento do ramo plagiotrópico/lateral, comprimento do ramo ortotrópico/principal e altura da planta de clones de *Coffea canephora*, avaliados no experimento em Manaus – AM, em 2021.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios		
		Comprimento do ramo plagiotrópico	Comprimento da haste ortotrópica	Altura da planta
Blocos	3	164,27778	1,17083	237,08333
Genótipo	14	130,53393**	1,70563*	1339,935**
Resíduo	42	31,42361	0,7006	116,29762
Parâmetros genéticos				
Média		24,7	5,875	216,55
CVe (%) ¹		22,69	14,24	4,97
Var. Fenotípica		32,63	0,43	334,98
Var. Ambiental		7,86	0,18	29,07
Var. Genotípica		24,78	0,25	305,90
Herdabilidade (%)		76	58	91
CVg (%) ²		20,15	8,51	8,07
CVg/CVe ³		0,89	0,60	1,64

^{ns} não significativo; **: * $p < 0,01$, $p < 0,05$, respectivamente, pelo teste Tukey. ¹Coefficiente de variação experimental; ²Coefficiente de variação genético; ³Razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação experimental.

Na análise de variância conjunta das avaliações dos anos de 2019 e 2021, observou-se efeito significativo para tratamentos (genótipos) apenas para altura de plantas ($p < 0,01$) demonstrando que os clones possuem variabilidade genética para essa característica. Na análise da interação genótipo x ambiente observou-se diferença significativa para o comprimento do ramo ortotrópico e altura da planta ($p < 0,01$), demonstrando que os clones são alterados de acordo com o ambiente para esses caracteres (Tabela 6).

Tabela 6. Quadrados médios e parâmetros genéticos e ambientais da análise conjunta para comprimento do ramo plagiotrópico/lateral, comprimento do ramo ortotrópico/principal e altura da planta de clones de *Coffea canephora*, avaliados no experimento em Manaus-AM, em 2020 e 2021.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios		
		Comprimento do ramo plagiotrópico	Comprimento da haste ortotrópica	Altura da planta
Blocos	3	72,0069	1,2228	34,2970
Genótipos	14	66,3599 ^{ns}	1,0414 ^{ns}	1235,3830 ^{**}
Ambientes	1	14638,3648*	530,25 ^{**}	808097,34 ^{**}
TRATxAMB	14	67,7332 ^{ns}	1,708 ^{**}	645,147 ^{**}
Resíduo	46	36,2171	0,6183	86,6654
Parâmetros genéticos e ambientais				
Média		13,65	3,77	134,48
CVe (%) ¹		44,07	20,84	6,92
Variância Genotípica		0,17	0,08	73,77
Var. GxA		2,12	0,27	139,6203
Var. Residual		36,21	0,61	86,66
Herdabilidade (%)		2,05	61,5	47,71%
CVg (%) ²		14,21	6,09	8,91
CVg/CVe ³		0,32	0,29	1,28

^{ns} não significativo; ^{**}: * $p < 0,01$, $p < 0,05$, respectivamente, pelo teste Tukey. ¹Coeficiente de variação experimental; ²Coeficiente de variação genético; ³Razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação experimental.

Nas características comprimento da haste ortotrópica, comprimento do ramo plagiotrópico e altura da planta para o ano de 2020, o coeficiente de variação experimental (CVe) foi $> 40\%$ e de 12,11%. Já para o ano de 2021, CVe foi equivalente a 14,24%, 22,69% e 4,97%, respectivamente. Em análise de variância conjunta, CVe foi de 20,89%, 44,07% e 6,92%, respectivamente. Para a característica altura da planta, CVe se manteve dentro do limite aceitável para experimentos com culturas perenes. Entretanto, valores de CVe mais elevados podem estar associados a uma série de fatores, dentre eles: longo ciclo da cultura, tamanho do experimento, respostas diferentes dos genótipos em relação a altas temperaturas e seca, vale ressaltar que este experimento estabelecido na FAEXP não recebeu irrigação. Além disso, a resposta dos genótipos a incidência de pragas e doenças também influenciam (FERRÃO et al. 2008). E valores altos de coeficiente de variação também foram identificados em outros trabalhos com experimentos de avaliações de clones de café, como por exemplo, o trabalho desenvolvido por Bonomo et al. (2004), Ferrão et al. (2008) e Giles et al. (2019).

As estimativas dos componentes que expressam a variação genotípica são extremamente importantes em programas de melhoramento pois estão ligadas à variabilidade genética, permitindo ao melhorista ter uma ideia da magnitude relativa das mudanças que podem resultar da seleção, pois quanto maior a variância genética maior é o potencial de obtenção de ganhos genéticos (FERRÃO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2015; RODRIGUES et al., 2012, FERREIRA et al., 2016a; GILES et al., 2019). No entanto, variações ambientais podem superestimar a genética. Dessa forma, o índice de variação (CV_g/CV_e) é um importante parâmetro de avaliação para o melhoramento genético, uma vez que permite identificar as características que tenham sua variabilidade predominantemente associada a causas genéticas e não ambientais (NASCIMENTO et al., 2014). De acordo com Faluba et al., 2010, todos os caracteres que apresentaram valores próximos ou superiores a 1,0 tornam-se aptos para uso em melhoramento genético. De fato, valores de 0,70 a 2,00 eram anteriormente considerados úteis para programas de melhoramento com *C. Canephora* cv. Conilon.

Valores de CV_g/CV_e superiores à unidade e altas herdabilidades, indicam situações favoráveis à seleção de genótipos superiores (CRUZ et al., 2014). Nesta pesquisa, foram obtidos valores de CV_g/CV_e entre 0,70 e 2,00 para a característica altura da planta nos dois anos avaliados bem como na análise conjunta e para a característica comprimento do ramo plagiotrópico para o ano de 2021. Estes resultados apresentam-se como condição favorável à seleção para esse caráter.

O coeficiente de herdabilidade, por sua vez, expressando a relação entre variância genotípica e fenotípica, apresentou valores de 47,16% a 92,54% entre todos os caracteres avaliados. Sendo considerados altos ($h^2 > 50\%$), embora tenha sido recomendado o uso de caracteres que apresentem valores acima de 80% para garantir maiores ganhos genéticos com a seleção (FALCONER, 1983). Entre os caracteres avaliados, a altura da planta foi a que apresentou maiores valores de herdabilidade (92,54% e 91% nos dois anos avaliados), seguido do comprimento de ramo ortotrópico com valores de 49,38% e 58%, também nos dois anos que foram avaliados. Portanto, mostraram-se bastante promissoras, pois sua variação fenotípica decorre, principalmente, de origem genética, ou seja, há um peso elevado do componente genético (de herdabilidade) no fenótipo (GILES et al., 2019).

O teste de médias pelo Skott-Knott, permite que seja detectada variabilidade entre os genótipos para a característica altura de plantas, organizando os genótipos em três grupos, como pode ser observado na tabela 7.

Tabela 7. Comparativo das médias dos dois anos de avaliação para os parâmetros comprimento do ramo plagiotrópico/lateral, comprimento da haste ortotrópica/principal e altura da planta de clones de *Coffea canephora*, avaliados em experimento estabelecido em Manaus –AM.

Tratamentos	Comprimento do Ramo		Comprimento da haste		Altura da planta	
	plagiotrópico		ortotrópica			
Clones	Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2
1	1,84 a	24,87 b	1,34 a	5,500 b	47,27 c	227,00 b
2	1,95 a	21,75 b	1,10 a	6,250 a	58,27 b	222,25 b
3	1,06 a	31,75 a	0,96 a	6,500 a	48,23 c	232,00 b
4	3,06 a	22,000b	1,99 a	5,500 b	71,45 a	213,00 c
5	1,91 a	24,00 b	1,76 a	5,625 b	46,08 c	224,25 b
6	3,92 a	23,50 b	2,50 a	4,875 a	68,16 a	196,50 d
7	2,55 a	21,00 b	1,94 a	7,250 a	33,76 d	196,50 d
8	3,48 a	30,00 a	2,21 a	6,250 a	50,57 c	217,00 c
9	1,05 a	23,00 b	0,86 a	6,500 a	56,91 b	226,00 b
10	3,81 a	33,75 a	1,91 a	6,375 a	53,13 c	244,75 a
11	2,71 a	15,50 b	1,60 a	5,250 b	37,62 d	169,75 e
12	3,31 a	21,50 b	1,25 a	5,000 b	38,90 d	210,25 c
13	2,76 a	19,37 b	1,69 a	5,500 b	47,60 c	212,00 c
14	2,56 a	22,25 b	2,45 a	5,625 b	57,50 b	226,00 b
15	2,32 a	36, 25 a	1,45 a	6,125 a	70,87 a	231,00 b

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo

Com base nos dados apresentados, observou-se variabilidade genética para os caracteres comprimento da haste ramo ortotrópica e altura da planta, condição essencial para a seleção de genótipos superiores (CRUZ et al., 2014). Estes dados corroboram com outras pesquisas desenvolvidas com a espécie, visando o melhoramento do cafeeiro. Como por exemplo, o trabalho desenvolvido por Ferrão et al. (2008), em que quarenta materiais genéticos de conilon apresentaram alta produtividade e variabilidade genética na maioria dos caracteres avaliados. Já a pesquisa desenvolvida por Rodrigues et al. (2012), em que parâmetros genéticos foram estimados para clones de café conilon, os materiais genéticos apresentaram alta variabilidade genética quanto à tamanho dos frutos, porte, vigor, índice de avaliação visual, ciclo de maturação e produtividade.

Trabalhos mais recentes como os desenvolvidos por Carvalho et al. (2019), foi observada variabilidade genética pelas estimativas de parâmetros genéticos interpopulacionais, com ganhos de seleção obtidos com sucesso a partir do índice de seleção multicausal. Giles et al. (2019), também identificaram variabilidade genética entre os 34 genótipos estudados e a população apresentou potencial para usos futuros em programas de melhoramento. Por fim, Bergo et al. (2020), detectaram variabilidade genética entre progênies de *C. canephora* para vigor vegetativo e altura da planta.

A existência da variabilidade genética para as características como vigor da planta, estão relacionadas à adaptabilidade e estabilidade de produção (FERREIRA et al., 2013; PEDRO et al., 2011) e as menores alturas das plantas estão relacionadas à facilidade de colheita e procedimentos fitossanitários (CARVALHO; MÔNACO; FAZUOLI, 1979; ROCHA et al., 2015). Sabe-se que a característica altura é fortemente influenciada pelo ambiente, e, fatores como disponibilidade de água, densidade de plantas, teor de argila do solo, densidade e fertilidade (CARVALHO et al., 2013; PEREIRA et al., 2014; RODRIGUES et al., 2016) afetam essa característica. Portanto, são necessárias condições adequadas de experimentação para a avaliação. Moraes et al. (2020), estudaram a adaptabilidade e estabilidade de genótipos de *C. canephora* e concluíram que os clones não mantêm sua performance em diferentes solos e condições climáticas em cinco ambientes da Amazônia Ocidental. Já Morais et al. (2021), identificaram que a interação do ambiente influenciou na expressão da qualidade de bebida dos clones de *C. canephora*, também avaliados na Amazônia Ocidental, entretanto, alguns clones foram considerados como genótipos ideais e assim podem ser inseridos em programas de melhoramento na Amazônia, a fim de se obter materiais mais adequados à região Norte.

A estimativa de parâmetros genéticos e fenotípicos, como herdabilidade e valores de CV_g/CV_e possibilitam a escolha de métodos e caracteres utilizados nas etapas iniciais e avançadas de programas de melhoramento (CRUZ et al., 2014). Neste sentido, entre os caracteres estudados, a altura de planta é a mais adequada para inferir sobre a adaptação dos clones, por apresentar maior herdabilidade e valores de CV_g/CV_e , sendo a característica que apresenta maior segurança para diferenciar os clones quanto a adaptação na avaliação realizada. Dessa forma, o alto valor de herdabilidade para altura de planta, que é uma característica quantitativa, confirma condições adequadas da experimentação realizada.

As pesquisas acerca de melhoramento genético do cafeeiro, são em sua maioria voltadas para o arábica, contudo, o *C. canephora*, é uma espécie que apresenta um grande potencial por ser uma espécie alógama, autoincompatível, apresentar alto vigor vegetativo, dentre outras características que a diferem do arábica. Contudo, por ser uma espécie de caráter perene, o cafeeiro apresenta características diferentes quando comparadas com as espécies anuais (BERGO et al., 2020). Como por exemplo: sobreposição de geração, expressão de caractere sobre múltiplos ciclos e bienalidade, gerando, portanto, dados divergentes (RESENDE; VALLE; JANK, 2008; ROCHA et al., 2015). Neste sentido, recomenda-se continuar a avaliação dos clones estabelecidos em experimento na Fazenda Experimental da UFAM, considerando mais caracteres, e se possível, comparando ambientes para que se possa inferir sobre a adaptação e para selecionar clones mais adaptados e estáveis para a região de Manaus – AM, pois a avaliação dos genótipos por vários ciclos para outros caracteres poderá fornecer informações mais precisas sobre o comportamento dos genótipos, uma vez que as características que foram avaliadas nesta pesquisa são quantitativas (BERGO et al., 2020).

5.2 Análise de solos rizosféricos, tecidos das plantas (raiz e folhas) e frutos de *Coffea canephora*

Tanto os macronutrientes quanto os micronutrientes possuem sua importância para o crescimento, desenvolvimento e produção dos cafeeiros. Entretanto, a quantidade de nutrientes requeridos, absorvidos e acumulados por uma planta de café é variada, pois depende de certos fatores, como a localização e manejo cultural, época do ano, idade da planta, órgãos e tecidos da planta (BRAGANÇA et al., 2008), além dos genótipos (PARTELLI et al., 2014; MARRÉ et al., 2015; COVRE et al., 2018), pois os materiais genéticos utilizados em plantios comerciais diferem entre si quanto à acumulação de nutrientes, massa seca (PARTELLI et al., 2014; MARRÉ et al., 2015), vigor vegetativo (PARTELLI et al., 2013) e absorção e eficiência de uso de nutrientes (AMARAL et al., 2011; MARTINS et al., 2016). E, como *C. canephora* é uma espécie que apresenta alta variabilidade genética, isso permite identificar diferentes características entre espécies (GILES et al., 2018; GILES et al., 2019; MARTINS et al., 2019; SILVA et al., 2021). Assim, a variação genética é um dos principais fatores responsáveis pelas diferenças nutricionais entre espécies (FAGERIA, 1998; SILVA et al., 2021).

A partir das análises multielementares realizadas de solos rizosféricos, raízes, folhas, grãos e cascas crus e torrados de plantas de *C. canephora* de solo de área de floresta secundária destinada a plantios, com pH de solo equivalente a 4,33, foi possível detectar os elementos: Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Br, Rb, Sr, Y, Ba, Hf e I (Figuras 10, 11, 12 e 13).

Os teores de Al, Si, Co, P, S, Ca e Sc (Figura 10), Cl, Ti, Cr, Fe, Cu e K (Figura 11), Sr, Y, Ba, Hf e Rb (Figura 12) e Ni, Se Zn, e Br (Figura 13), apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) na área de estudo.

Foi verificado no presente estudo que os maiores valores nos teores dos elementos Al, Si e Co (Figura 10 a, b, c), foram observados apenas no solo (118.750,667 mg kg⁻¹, 94.366,0 mg kg⁻¹ e 72,32 mg kg⁻¹) e raízes (25.096,6667 mg kg⁻¹, 22.2492,333 mg kg⁻¹, e 12,36 mg kg⁻¹), respectivamente. O elemento Sc foi identificado somente no solo (27,60 mg kg⁻¹). Todos os elementos anteriormente citados, não foram identificados nas folhas, grãos e cascas crus e torrados dos genótipos de *C. canephora* avaliados. Com relação aos elementos P, S, Ca e I (Figura 10 d, e, f, h), apresentaram o mesmo comportamento, no entanto, com ocorrência no teor do elemento no solo (1.214,56 mg kg⁻¹, 471,75 mg kg⁻¹, 1.311,05 mg kg⁻¹ e 200,38 mg kg⁻¹), raiz (3.120 mg kg⁻¹, 10.020,267 mg kg⁻¹, 12.265,13 e 386,77 mg kg⁻¹), folhas (2.537,74 mg kg⁻¹, 2.625,26 mg kg⁻¹, 10.730,0667 mg kg⁻¹ e 144,08 mg kg⁻¹), grão cru (888,053 mg kg⁻¹, 1.255,89 mg kg⁻¹, 1.670,91 mg kg⁻¹ e 193,36 mg kg⁻¹) e grão torrado (7.080,8 mg kg⁻¹, 6.968,67 mg kg⁻¹, 1.006,79 mg kg⁻¹ e 1.131,28 mg kg⁻¹), respectivamente, em plantas de *C. canephora*.

Já os elementos Fe e Ti, (Figura 11 d, b), apesar de estarem presentes em todas as partes das plantas, seus maiores teores concentraram-se nos solos (7.234,13 mg kg⁻¹, 13.255,33 mg kg⁻¹) e raízes (1.449,60 mg kg⁻¹, 2.584,13 mg kg⁻¹), respectivamente. Ti ainda apresenta uma concentração de 437,19 mg kg⁻¹ em grãos e cascas torrados. Os elementos K e Cl (Figura 11 f, a), destacaram-se nas raízes (e 26.087,33 mg kg⁻¹ e 2.639,87 mg kg⁻¹), folhas (11.888,6 mg kg⁻¹ e 1772,72 mg kg⁻¹), grãos e cascas crus (8.432,06 mg kg⁻¹ e 291,03 mg kg⁻¹) e grãos e cascas torrados (12.344,8 mg kg⁻¹ e 210,72 mg kg⁻¹), respectivamente. O Cr (Figura 11 c) apresentou maior teor no solo (76,41 mg kg⁻¹) e grãos e cascas torrados (207,03 mg kg⁻¹). O Cu apresentou maior concentração nas raízes (47,56 mg kg⁻¹) e em grãos e cascas torrados (73,35 mg kg⁻¹).

Os elementos Sr, Y, Hf e Rb (Figura 12 a, b, d, e) apresentaram um maior acúmulo nas folhas (25,08 mg kg⁻¹, 2.502,46 mg kg⁻¹, 2.972,76 mg kg⁻¹ e 4.448,5 mg kg⁻¹) e grãos e cascas torrados (572,20 mg kg⁻¹, 2.130,27 mg kg⁻¹, 520,334 mg kg⁻¹ e 95,39 mg kg⁻¹),

respectivamente. O elemento Ba (figura 12 c) foi identificado apenas no solo (1226,73 kg⁻¹) e em grãos torrados (1.395,93 mg kg⁻¹).

Em relação ao elemento Ni (Figura 13 a), sua maior concentração foi evidenciada nas folhas (74,5 mg kg⁻¹) e grãos e cascas torrados (117,98 mg kg⁻¹). Quanto ao Se (Figura 13 b), suas concentrações foram muito baixas em solos e raízes (abaixo de 2 mg kg⁻¹), e não foi evidenciado em folhas e grãos. O Zn (Figura 13 c), foi um mineral presente em todas as partes das plantas e no solo, contudo, suas concentrações foram baixas, destacando-se na raiz (287,81 mg kg⁻¹). Por fim, o Br (Figura 13 d), que também foi identificado por todas as plantas e solo, contudo com concentrações abaixo de 10 mg kg⁻¹, apresentou maior teor acumulado nos grãos e cascas torrados (101,764 mg kg⁻¹).

Considerando todos os tecidos, a ordem de concentração e requerimento dos macros e micronutrientes encontrada neste trabalho foi: Al > Si > K > Ca > S > P > Cl = Rb e Fe > I. Al foi o mais acumulado tratando-se da concentração em raízes e em solos analisados. K, Ca, S e P foram os mais requeridos tratando-se dos demais órgãos da planta durante o período de avaliação. No trabalho desenvolvido por Santos et al. (2021b), os nutrientes mais requeridos pelos genótipos de *Coffea canephora* avaliados, foram semelhantes ao do presente estudo. Em ordem decrescente para macronutrientes: N > Ca > P > Mg > S e para os micronutrientes: Fe > B > Mn = Cu > Zn.

Conforme dados apresentados, observou-se uma diferença de concentração entre tecidos e órgãos vegetais dos genótipos de *Coffea canephora* analisados. Esta diferença de concentração de nutrientes entre genótipos durante a avaliação em um mesmo período também foi relatada em trabalhos desenvolvidos por Dubberstein et al. (2019), Oliosi et al. (2020), Santos et al. (2021b) e Schmidt et al. (2022).

Diversidade genética entre genótipos para a concentração de nutrientes foi observada, mesmo que pouca. Além disso, diversas correlações foram obtidas, incluindo a concentração de nutrientes nas folhas com os outros órgãos da planta, produtividade dos clones avaliados, bem como acúmulo de massa seca. Contudo, este estudo abordou semelhanças e divergências nutricionais entre os diferentes órgãos das plantas, e grupos baseados em dissimilaridade foram obtidos. Mas, fatores como a morfologia de folhas e raízes, assim como a arquitetura da planta não foram abordados e esses atributos podem atuar diretamente na absorção de nutrientes, taxas fotossintéticas, dentre outros, afetando o status nutricional dos órgãos e tecidos vegetais. Dessa forma, recomenda-se a continuidade de estudos acerca desses materiais genéticos para a adaptação de clones superiores em Manaus.

Para melhor compreensão do comportamento destes clones, o presente estudo foi dividido em tópicos referentes a cada parte analisada em relação ao acúmulo de nutrientes e possibilidade de seleção de um genótipo superior. Iniciando-se com o solo e finalizando com os grãos e cascas, incluindo também produção de massa seca e produtividade dos clones estudados. Permitindo que se tenha uma visão melhor e mais ampla do desempenho destes genótipos de *C. canephora*.

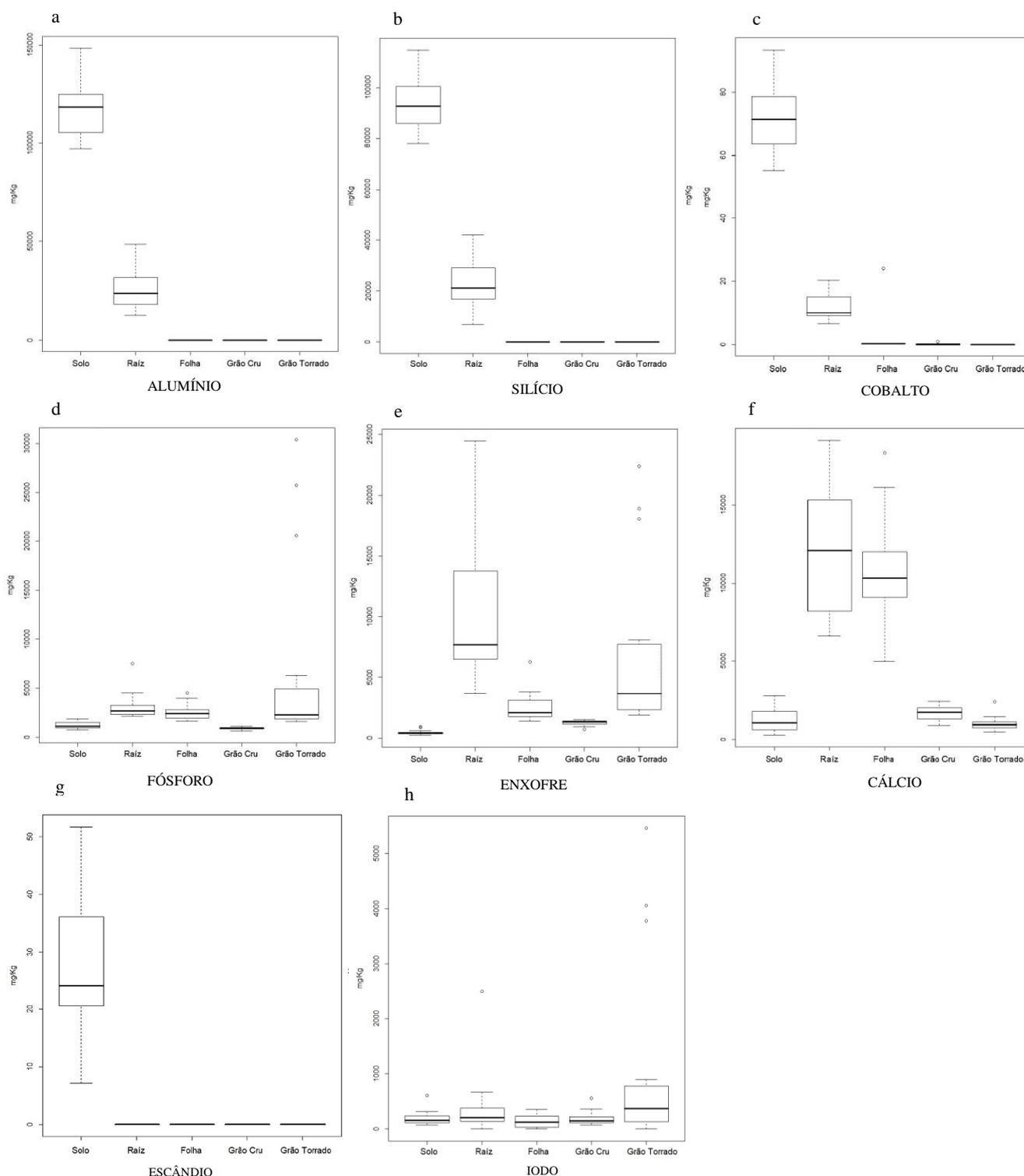


Figura 10. Comparação do teor de Alumínio (Al) (a), Silício (Si) (b), Cobalto (c), Fósforo (P) (d), Enxofre (S) (e), Cálcio (Ca) (f), Escândio (Sc) (g) e Iodo (I) (g), em raiz, folhas, grãos crus e torrados de *Coffea canephora* e solo de área de floresta secundária destinada a plantios. Caixas mostram os quartis de 25 e 75%, barras mostram os quartis de 10 e 90%, quadrados cheios mostram a mediana, círculos vazios mostram *outliers*. Significativo a 5 % pela ANOVA.

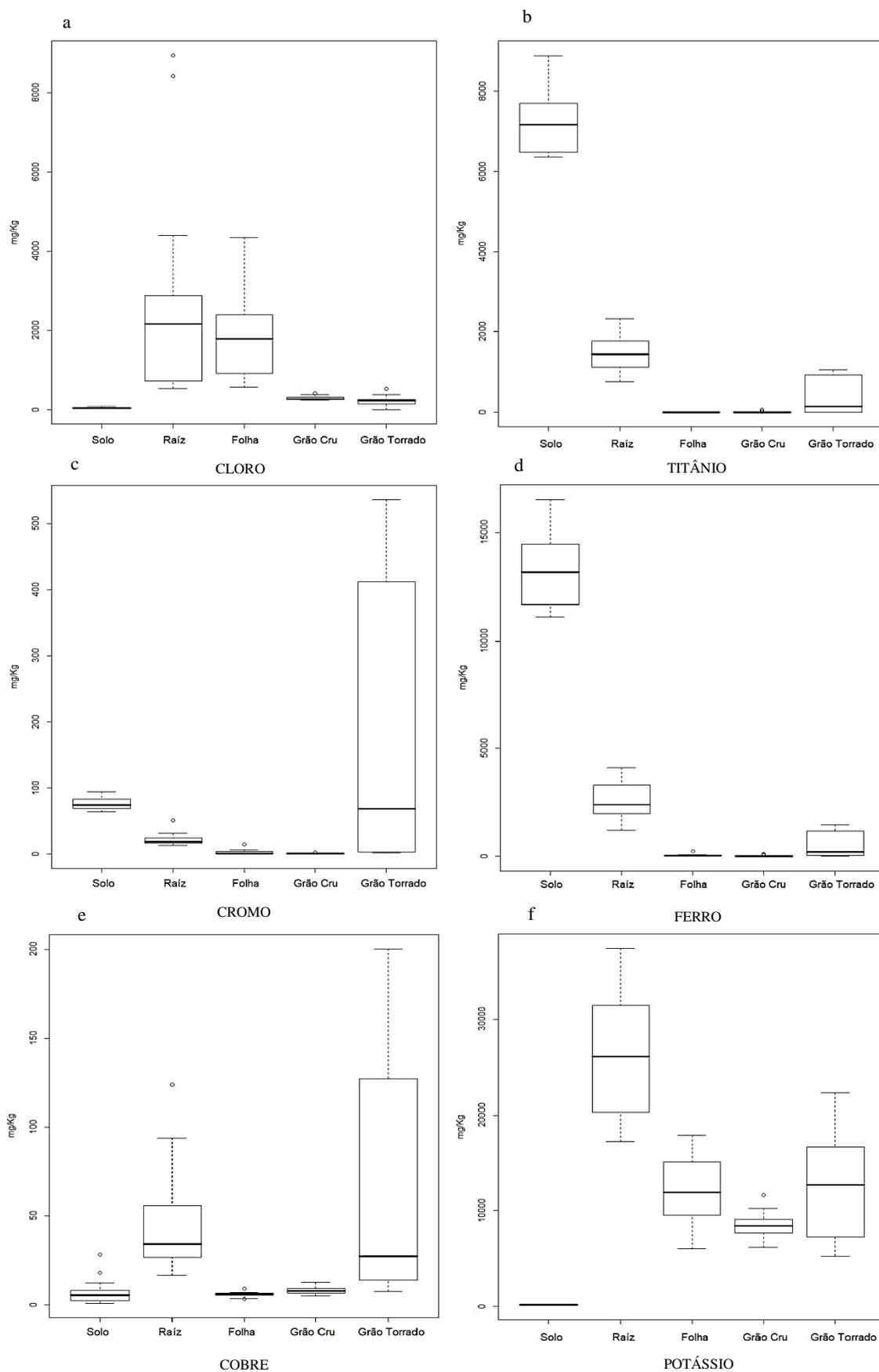


Figura 11. Comparação do teor de Cloro (Cl) (a), Titânio (Ti) (b), Cromo (Cr) (c), Ferro (Fe) (d), Cobre (Cu) (e) e Potássio (f) em raiz, folha, grão cru e torrado de *Coffea Canephora* e solo de área de floresta secundária destinada a plantios. Caixas mostram os quartis de 25 e 75%, barras mostram os quartis de 10 e 90%, quadrados cheios mostram a mediana, círculos vazios mostram *outliers*. Significativo 5% pela ANOVA.

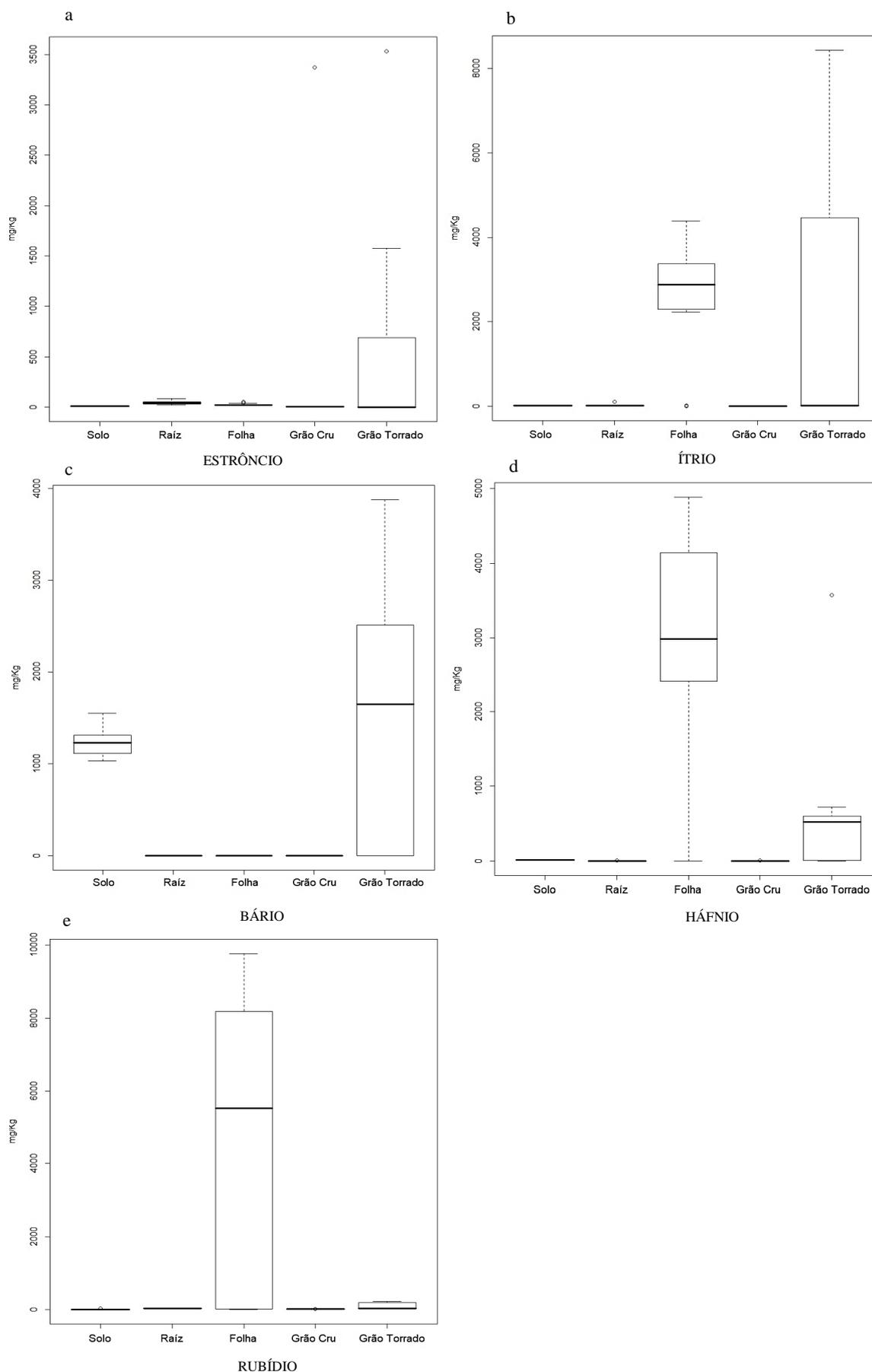


Figura 12. Comparação do teor de Estrôncio (Sr) (a), Ítrio (Y) (b), Bário (Ba) (c), Háfênio (Hf) (d) e Rubídio (Rb) (e) em raiz, folha, grão cru e torrado de *Coffea canephora* e solo de área de floresta secundária destinada a plantios. Caixas mostram os quartis de 25 e 75%, barras mostram os quartis de 10 e 90%, quadrados cheios mostram a mediana, círculos vazios mostram *outliers*. Significativo a 5% pela ANOVA.

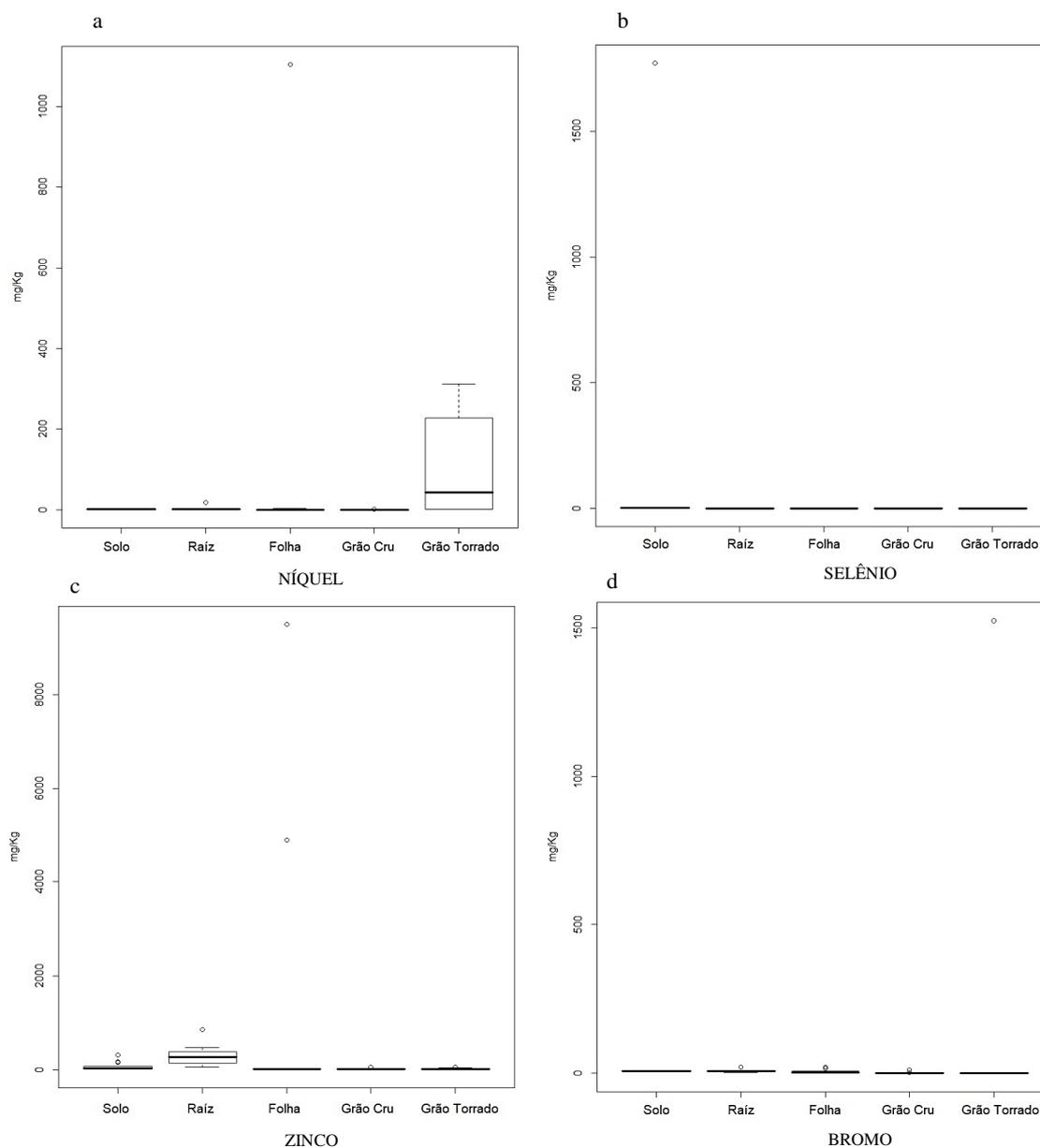


Figura 13. Comparação do teor Níquel (Ni) (a), Selênio (Se) (b), Zinco (Zn) (c) e Bromo (Br) (d), em raiz, folha, grão cru e torrado de *Coffea canephora* e solo de área de floresta secundária destinada a plantios. Caixas mostram os quartis de 25 e 75%, barras mostram os quartis de 10 e 90%, quadrados cheios mostram a mediana, círculos vazios mostram *outliers*. Significativo a 5% pela ANOVA.

5.2.1 Componentes inorgânicos em solos rizosféricos de *Coffea canephora*

Nesta pesquisa, foi observado que todos os elementos já citados anteriormente foram detectados nos solos rizosféricos, contudo, os maiores valores detectados nos solos rizosféricos em que os genótipos estão estabelecidos, foram: Al ($118.750,67 \text{ mg kg}^{-1}$), Si ($94.366,0 \text{ mg kg}^{-1}$), Fe ($13.255,33 \text{ mg kg}^{-1}$), Ti ($7.234,13 \text{ mg kg}^{-1}$), Ca ($1.311,04 \text{ mg kg}^{-1}$).

¹), Ba (1.226,74 mg kg⁻¹) P (1.214,56 mg kg⁻¹), S (471,75 mg kg⁻¹) e I (200,38 mg kg⁻¹) (Figura 10, 11, 12 e 13).

Com o auxílio do UPMGA, por meio da distância Euclidiana como medida de dissimilaridade e baseando-se na concentração de nutrientes em solos rizosféricos dos genótipos analisados. O resultado revelou a formação de dois grandes grupos, o primeiro agrupamento é composto por cinco observações que são os genótipos C1, C4, C8, C9 e C10. O segundo agrupamento por sua vez, compreende nove observações, que são os genótipos: C2, C3, C5, C6, C7, C11, C12, C13 e C14. Pode-se considerar a formação de mais um grupo, devido o material C15 que apresentou uma maior dissimilaridade quando comparado com os demais (Figura 14). O agrupamento mostra que os solos rizosféricos possuem características próprias que permitem com que os clones sejam separados em dois grandes grupos.

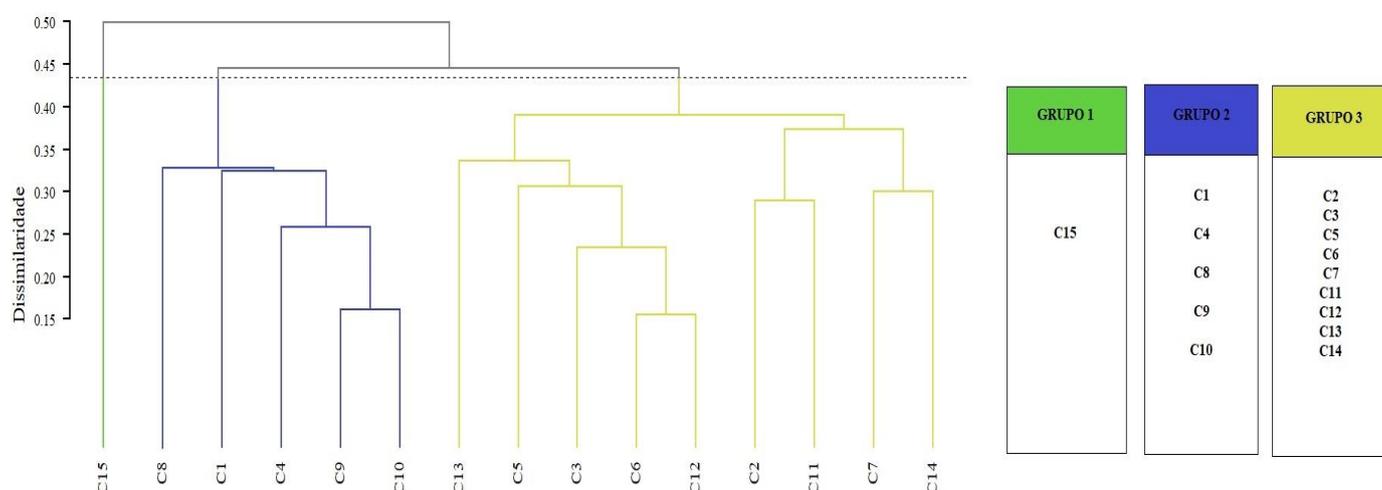


Figura 14. Análise de agrupamento (UPMGA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de elementos químicos presentes no solo na região da rizosfera das plantas. Coeficiente de correlação cofenética: $r=0,6741$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado pelo método Mojena (1977).

A representação da relação de similaridade entre as amostras de solos rizosféricos dos clones analisados, foi realizada pela análise de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), em que a maior dispersão das unidades foi identificada como havendo maior dissimilaridade genética (Figura 15). A análise de PCA, representada no gráfico de dispersão, com ambas as coordenadas explicando 17,58% da variação total observada, confirma a separação em dois grupos (Figura 16 e 17).

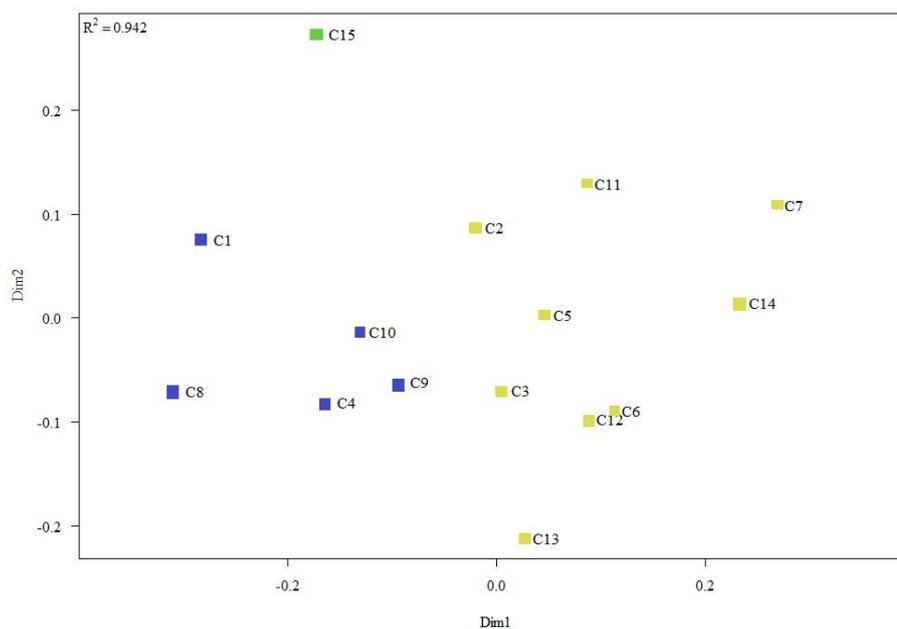


Figura 15. Análise de escalonamento multidimensional não-métrica das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora*, com base nas análises do solo, na região da rizosfera.

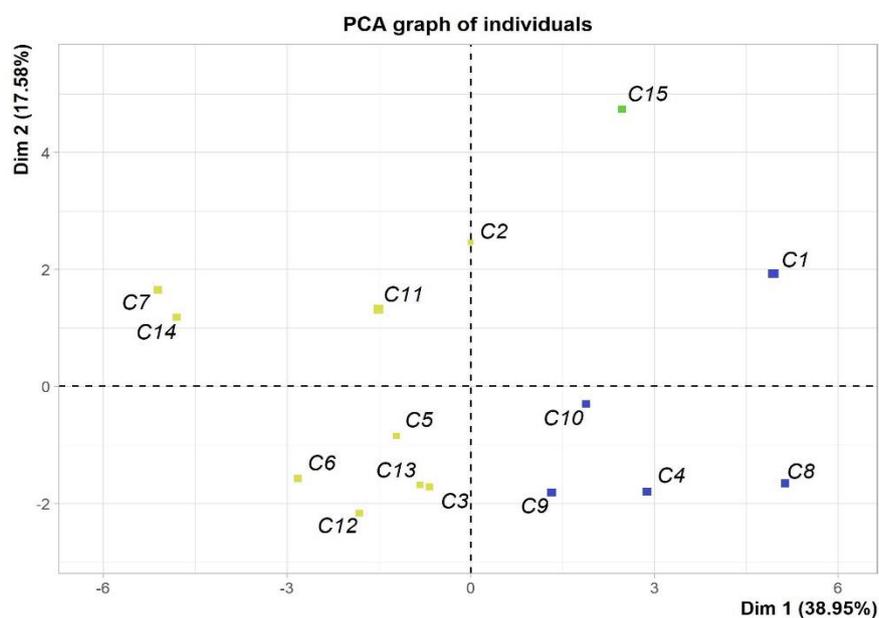


Figura 16. Análise componentes principais (PCA) em amostras de solo rizosférico.

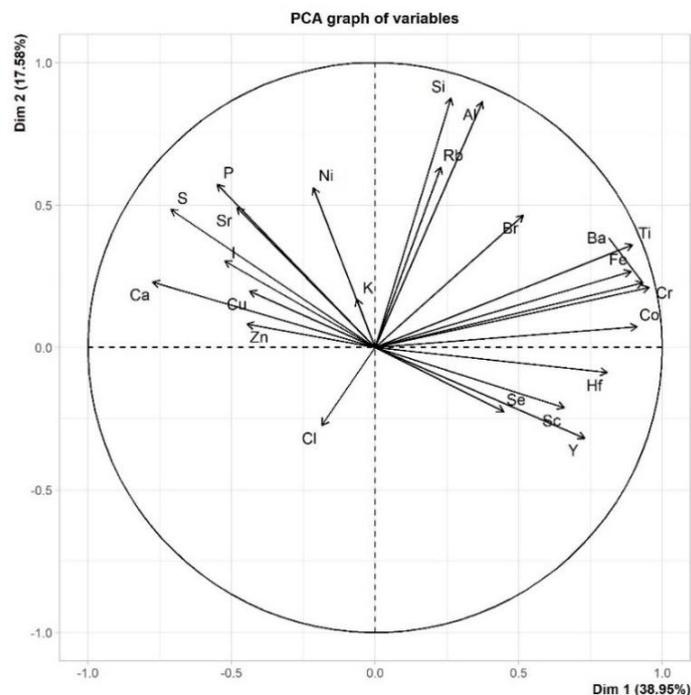


Figura 17. Análise de Componentes Principais (PCA) em amostras de solo rizosférico.

O solo é considerado essencial para os ecossistemas terrestres, pois desenvolve funções ecológicas e serviços essenciais à vida. E além de ser o principal substrato utilizado pelas plantas, desempenha papel na distribuição, regulação e infiltração da água bem como no armazenamento e ciclagem de nutrientes. Além disso, possui características produtivas e sociais (BRADY, 2013; VEZZANI, 2015; ENCK et al., 2020; MELO et al., 2021).

O cafeeiro normalmente é cultivado em solos com baixa disponibilidade de nutrientes, e para a maioria dos solos, a fertilização é ignorada, o que leva ao surgimento de sintomas de deficiência no plantio (DUBBERSTEIN et al., 2019). E na região Amazônica, os solos apresentam baixa disponibilidade de nutriente e capacidade de troca de cátions, limitando-o, assim, a fertilidade deste solo estará diretamente relacionada com o equilíbrio entre a cobertura vegetal e processos biogeoquímicos, que por sua vez, está associado a ciclagem de nutrientes presentes na matéria orgânica do solo (CARDOSO et al., 2009; ENCK et al., 2020). Com base no que foi apresentado, há a necessidade de se ter conhecimento das exigências nutricionais das plantas durante suas fases de desenvolvimento. De modo que os nutrientes requeridos em maior quantidade possam estar na forma disponível para as plantas no solo, para que a absorção e translocação seja realizada com o máximo de eficiência para o desenvolvimento da cultura.

O solo em que os genótipos avaliados estão estabelecidos pode ser classificado como solo de floresta secundária destinada para cultivo, e o seu pH em H₂O foi de 4,33, estando assim, abaixo da faixa considerada adequada para cultivo de plantas (5,5-6,2), conforme estabelecido por CFSEMG (1999). Entretanto, os solos da Amazônia são considerados ácidos, com pH em H₂O normalmente próximo de 3,94 (REBÊLO et al., 2020). Em uma pesquisa realizada por Rebêlo et al.(2020), em que se objetivou a caracterização de solos da Amazônia Central, foram identificados valores de pH em H₂O entre 3,94 e 4,73, caracterizando-os como extremamente a fortemente ácidos. Dados semelhantes foram obtidos por Ferreira et al. (2021), em que os solos foram classificados com acidez média a alta pois o valor de pH em H₂O identificado foi equivalente a 4,30.

De todos os elementos que foram identificados com maiores teores de concentração no solo analisado, P, Ca, S estão na lista dos essenciais para o desenvolvimento de uma planta. Também foram evidenciados elementos considerados metálicos totais como Si, Ti, Ba e Fe, os quais, se estiverem em concentrações acima do considerado aceitável podem exercer ação tóxica sobre as plantas (WU et al., 2018). O Fe também é essencial para o crescimento da planta, contudo, requer atenção. Solos contendo baixos valores de pH, como é o caso deste presente estudo e dos demais citados, são comuns em regiões tropicais, onde há alto índice pluviométrico, o qual, ocasiona lixiviação de elementos alcalinos, favorecendo a solubilização e mobilização de metais pesados na solução do solo e, conseqüentemente a perda desses elementos pela lixiviação (REBÊLO et al., 2020). Dessa forma há um aumento na concentração de elementos como Fe, Ti e Ba na forma disponível para a planta, e então ela passa a absorvê-los em maior quantidade, ocasionando conseqüentemente a toxicidade, além disso, estes elementos podem afetar diretamente no desenvolvimento das plantas, bem como reduzir a disponibilidade de outros nutrientes essenciais (ANTONIADIS et al., 2019).

Neste trabalho foram observados altos valores de Al, assim como no estudo desenvolvido por Rebêlo et al. (2020). Entretanto, altas concentrações de Al já eram previstas, uma vez que é o metal mais abundante no solo, pois a maior parte de minerais primários e secundários das rochas formados a partir do processo de intemperismo são alumínio silicatos, e quando decompostos, liberam o Al na forma trocável (MIGUEL et al., 2010; REBÊLO et al., 2020). Em solos ácidos, a sua disponibilidade é ainda maior, como é o caso da área estudada (SINGH et al., 2017). O excesso deste elemento em um ambiente afeta o crescimento da planta, pois reduz sua altura, arquitetura da copa e ainda impede o alongamento das raízes (RAHMAN et al., 2018), prejudicando assim, a

capacidade de absorção de nutrientes da planta (SINGH et al., 2017). A toxicidade de Al em solos ácidos tem sido um dos entraves mundiais no estabelecimento de culturas visando o plantio comercial (POSCHENRIEDER, 2008; NUNES-NESI et al., 2014). Visto que a produção de biomassa é afetada gerando um ciclo de nutrientes bastante lento (LEUSCHNER et al., 2007). Entretanto, apesar de sua alta concentração, seu maior acúmulo se deu no solo e raízes de *C. canephora*, mas não foi evidenciado nas folhas e grãos crus e torrados dos genótipos avaliados.

Os teores de Ca elevados são identificados em locais com acúmulos de matéria orgânica em função da maior biomassa aérea (REBÊLO et al., 2020). Neste estudo, a concentração deste elemento foi inferior aos de alguns metais e até elementos considerados benéficos, e este desempenho pode ser justificado pelas altas precipitações que ocorrem na região Amazônica, já que o Ca^{2+} é um elemento alcalino e é facilmente lixiviado das camadas superiores pelas águas contendo CO_2 e são substituídos por íons H^+ , além disso, a baixa capacidade de retenção de nutrientes do solo, assim como da troca de cátions e baixos valores de carbono orgânico no solo influenciam na concentração de cálcio de solo (RONQUIM et al., 2010; ENCK et al., 2020; RÊBELO et al., 2020).

Para os elementos metálicos totais Si, Fe, Ti, Ba, foram encontrados teores relativamente altos. O segundo elemento encontrado em maior quantidade nos solos, foi o Si, o qual não é considerado um elemento essencial mas sim benéfico. Seus teores elevados são justificados pelo fato de que é um dos nutrientes mais abundantes na crosta terrestre e é considerado um dos principais formadores dos argilos-minerais no processo de gênese do solo (SANTOS et al., 2021a). De acordo com Camargo (2016), espera-se que solos com maiores concentrações de Al e Fe, tenham menor teor de Si disponível. O que não foi observado neste estudo, e o que pode justificar esse comportamento, além da abundância que Si apresenta, seria a quantidade de teor de silte e argila presente no solo, assim como um menor pH que favorece na pouca solubilidade tornando-o mais presente no solo (REBÊLO et al., 2021). O Si encontra-se disponível na forma de ácido monocíclico (resultado da decomposição de resíduos vegetais), Si estrutural nos minerais silicatados e Si adsorvido aos colóides do solo (CASTRO e CANUSO, 2015; KORDÖRFER e SOUZA, 2018). Os solos brasileiros são compostos em média de 5 a 40% de Si. Contudo, devido ao intenso processo de intemperismo em solos tropicais este elemento encontra-se na forma de quartzo e opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). As suas principais perdas se dão pela polimerização do ácido silícico, lixiviação e a adsorção promovida pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (KORDÖRFER e SOUZA, 2018). É observada interação

de silício com fósforo, especialmente devido a competição pelos mesmos sítios de adsorção (CAMARGO et al., 2005). De acordo com Epstein e Bloom (2005), o P é descolado do colóide pela ação do Si, aumentando assim o seu teor na solução do solo. Pesquisas realizadas visam associar o Si com maior concentração foliar de P e neste presente trabalho observou-se um maior teor de P nas folhas quando comparado com sua concentração no solo. Os trabalhos buscam ainda associar o Si com maior o acúmulo de massa seca, contudo, mais estudos precisam ser realizados para que se compreenda melhor que função este elemento desempenha no solo em relação a outros elementos, como também a sua relação direta com a planta. Assim como o Si, as altas concentrações de Ti podem estar associadas à textura do solo (quantidade de silte e argila) e baixo pH.

O Fósforo por sua vez, normalmente apresenta baixas disponibilidades em solos Amazônicos, e neste presente estudo, os teores de P encontrados foram inferiores aos dos tecidos e órgãos das plantas analisadas, com exceção do grão cru. Além disso, dentre os citados como mais concentrados no solo da área estudada, só apresentou teores superiores aos de S e I. O que ocasiona sua baixa concentração são as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e química que são predominantes (RHEINHEIMER et al., 2008). O processo de intemperismo torna o solo menos eletronegativo e assim, passa a adsorver ânions, como é o caso do fosfato. A adsorção do P será então afetada pela textura do solo (tipo e teor de argila), colóides e matéria orgânica. E de acordo com pesquisadores, estima-se que 96% dos solos Amazônicos são deficientes em P, e que uma grande quantidade do elemento presente no solo está fixado e dessa forma não se encontra disponível para as plantas absorverem (FALCÃO e SIIVA, 2004; NARDUCCI et al., 2019). O P é um elemento essencial à vida, pois atua no metabolismo das plantas, em suas células e em processos respiratórios e fotossintéticos, dentre outras funções relacionadas à estrutura da planta, contudo apresenta uma distribuição muito irregular no ecossistema, o que ocasiona a sua limitação em produções agrícolas, afetando-as significativamente (GRANT et al., 2001; KLEIN e AGNE, 2012; NARDUCCI et al., 2019). Apesar de sua baixa concentração em solos, foi identificado alto teor em raízes, folhas e frutos dos genótipos analisados, o que pode contribuir com isso é a ocorrência de Si na solução do solo. Como citado anteriormente, o silício descola o P do colóide tornando-o disponível. Uma vez que desempenha tantos papéis importantes do desenvolvimento de uma planta, é interessante compreender melhor a ação benéfica do Si com o P, a fim de identificar meios de aumentar a disponibilidade deste elemento para plantas.

Quanto ao Fe, de modo geral, apresentou altas concentrações em comparação demais elementos, com exceção de Al e Si. Seus teores evidenciados neste presente trabalho são bem superiores quando comparados com outras pesquisas. Rebêlo et al. (2020), por exemplo, encontrou um teor de 20.372,55 mg kg⁻¹, bem abaixo do encontrado neste solo analisado. Esta alta concentração encontrada nos solos em que os genótipos estão estabelecidos, pode ser explicada pela relação do pH com o ferro, uma vez que quanto menor o pH de um solo, ou seja, quanto mais ácido, maiores as quantidades de Fe disponíveis para a planta, devido a formação de óxidos de ferro pouco solúveis (RAIJ, 2011; REBÊLO et al., 2020).

Tanto o Fe quanto o Ti permaneceram dentro dos valores de referência propostos para solos da Amazônia Central (RÊBELO et al., 2020). Contudo, o Ba apresentou teores bem acima dessa faixa permitida. De acordo com o Conama (2013), o valor de prevenção para o Ba é igual a 150 mg kg⁻¹, ou seja, é o máximo permitido do elemento no solo. Neste estudo, o teor encontrado foi equivalente a 1.226,74 mg kg⁻¹, sendo assim muito superior ao aceitável. Em outros trabalhos desenvolvidos foram encontrados teores de Ba iguais a 1,4 mg kg⁻¹, 2,1 mg kg⁻¹, 7,45 mg kg⁻¹, 11 mg kg⁻¹ e 19,66 mg kg⁻¹. Diante do exposto conclui-se que a área apresenta contaminação pelo elemento por possuir teores superiores aos encontrados em solos antropizados (500 mg kg⁻¹) ou até mesmo aos níveis industriais (750 mg kg⁻¹). Alguns fatores podem contribuir com esta concentração, dentre eles, a emissão oriunda de veículos, normalmente em locais com tráfego mais intenso, pode ser uma das principais fontes de Ba. Na fazenda experimental, onde o plantio está estabelecido, há um certo tráfego de tratores, outros carros e até ônibus nas proximidades. Além disso, pode ser que a emissão do tráfego de veículos na BR possa ter alcançado até a área de plantio. Mas, apesar de seu teor elevado, o elemento não foi absorvido pela planta, já que não foi identificada a sua presença em nenhum órgão ou tecido dos genótipos avaliados.

Como se sabe, a floresta amazônica representa um ecossistema heterogêneo, consequentemente, seus solos apresentam concentrações variáveis de oligoelementos. Atividades antrópicas, como a agricultura, ocorrem em grande número e mesmo áreas naturais podem estar suscetíveis à contaminação por oligoelementos. Assim, ter conhecimento de valores de referência para as concentrações de Se, Ba e I em solos Amazônicos se tornam necessários. Em um trabalho desenvolvido por Silva Junior et al. (2022), as concentrações de bário na Amazônia ocidental e central ultrapassou os níveis nacionais de prevenção, assim como foi observado para este trabalho. Além disso, a

média de I nos solos estudados ($5,4 \text{ mg kg}^{-1}$), superou a média mundial. E o mesmo comportamento foi observado para as concentrações de I nesta área estudada ($200,38 \text{ mg kg}^{-1}$), sendo bem superior. Ainda de acordo como autor, a relação entre o conteúdo total dos elementos (Ba e I) e a textura do solo (argila, silte e areia) sugere a sua origem geôênica. Os dados obtidos tanto neste trabalho desenvolvido por Silva Junior et al. (2022), quanto os obtidos no presente estudo, podem ser utilizados para que valores de referência de qualidade regional para solos amazônicos possam ser gerados, assim como também podem atualizar os dados existentes na literatura acerca dos valores de prevenção (PV) e investigação (IV) estabelecidos para elementos selecionados pela legislação brasileira.

Com base nestes dados e em outros trabalhos desenvolvidos, é possível observar que existe uma variação de concentração de metais nos solos do Amazonas acompanhando a diversidade de solos e rochas existentes no estado (QUESADA et al., 2010). Dessa forma, estudos visando a determinação destes elementos pesados devem ser realizados, podendo assim correlacioná-los às condições de formação daquele solo, levando em consideração não somente propriedades químicas e físicas mas o perfil individual de cada solo. Esta variação deve-se ao material de origem e fatores pedogenéticos, pois mesmo com o intemperismo intenso em regiões tropicais, a rocha mãe influencia (BIONDI et al., 2011; REBÊLO et al., 2020).

Por fim, o S que apresentou concentração de $471,75 \text{ mg kg}^{-1}$, é considerado um elemento bastante abundante no universo. Um macroelemento essencial fornecido ao solo pela água da chuva (KATHPALIA e BHATLA, 2018), o que pode explicar sua concentração relativamente alta no solo analisado, é que a região Amazônica registra altos índices pluviométricos. Apesar de ser um elemento essencial, poucas informações se tem acerca dele. Mais de 90% do S da camada superficial do solo encontra-se na forma orgânica, sendo esta a principal fonte de SO_4^{2-} , para o solo e por consequência para as plantas, já que é esta a forma absorvida pelas plantas. Em solos muito intemperizados, o elemento se acumula em camadas subsuperficiais (ROCHA et al., 2015). Visto que as amostras de solo foram coletadas em uma profundidade de 0-20 cm, isto pode explicar também maiores concentrações do elemento. Observou-se também que S estava bem disponível para as plantas, uma vez que seus teores aumentaram nas raízes, folhas e grãos e cascas crus e torrados dos genótipos de *C. canephora*.

Com estas informações, é possível concluir que o solo possui concentrações satisfatórias para o desenvolvimento dos genótipos, contudo, há também altos teores de

metais e elementos traços, e uma visível contaminação por bário. Tendo em mãos esses dados, é importante realizar mais estudos afim de compreender a ação desses elementos em solos Amazônicos e até em que ponto afetam a disponibilidade de um outro elemento essencial e conseqüentemente, o desempenho da cultura. Com os próximos dados a serem apresentados, é possível compreender melhor o comportamento desses nutrientes por todos os tecidos e órgãos vegetais dos genótipos de *C. canephora* avaliados.

5.2.2 Componentes inorgânicos em raízes de *Coffea canephora*

Para as raízes analisadas, os maiores teores identificados foram para: Al (25.096,67 mg kg⁻¹), K (26.087,33 mg kg⁻¹), Si (22.492,33 mg kg⁻¹), Ca (12.265,33 mg kg⁻¹), S (10.020,26 mg kg⁻¹), P (3.118,533 mg kg⁻¹), Cl (2.639,8733), Fe (2.584,133 mg kg⁻¹), Ti (1.449,60 mg kg⁻¹), I (386,76 mg kg⁻¹) e Zn (287,81 mg kg⁻¹) (Figuras 10, 11 a, e, c, 12 c, 13 e).

Considerando o corte estimado por Mojena (1977), os genótipos de *C. canephora* foram agrupados em três grupos diferentes, contudo, em um grupo mais populoso, é possível observar dois subgrupos (Figura 18). Sendo o grupo 1 composto pelo clone C2, grupo 2 pelo clone C7 e o grupo 3 pelos demais genótipos analisados.

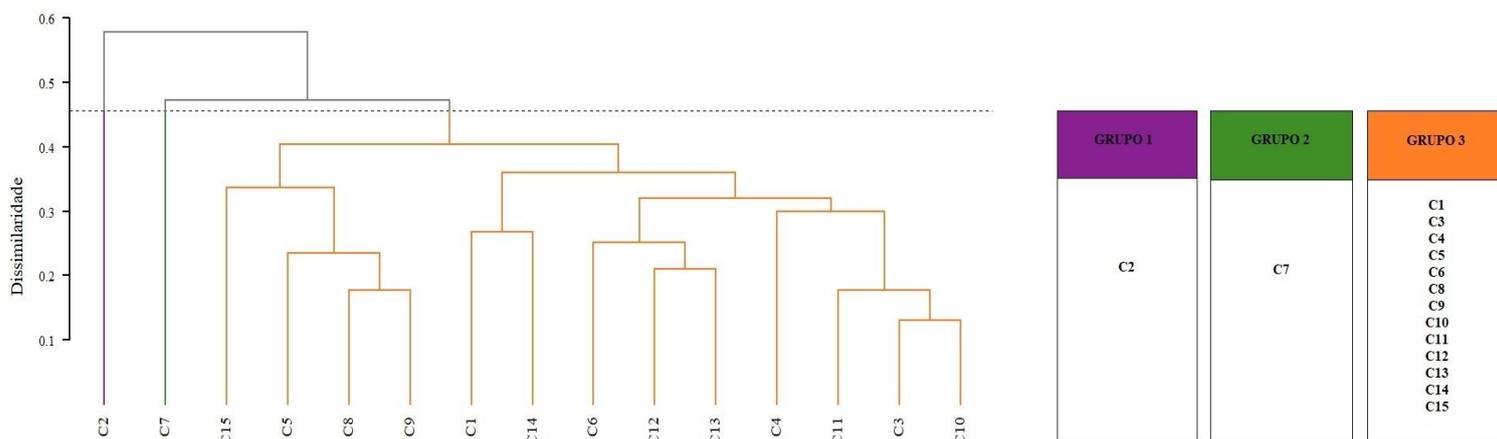


Figura 18. Análise de agrupamento (UPGMA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de elementos químicos presentes nas raízes das plantas. Coeficiente de correlação cofenética: $r = 0,7778$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado pelo método de Mojena (1977).

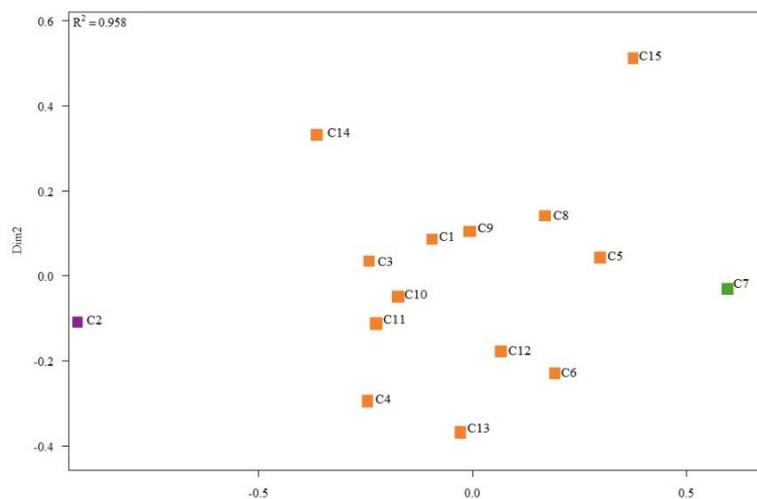


Figura 19. Análise de escalonamento multidimensional não-métrico das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base nas análises das raízes.

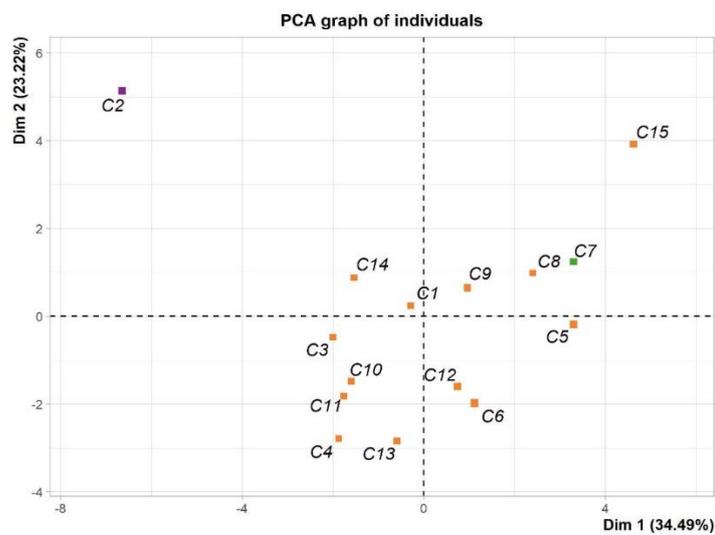


Figura 20. Análise de Componentes principais (PCA) em amostras de raízes de *Coffea canephora*.

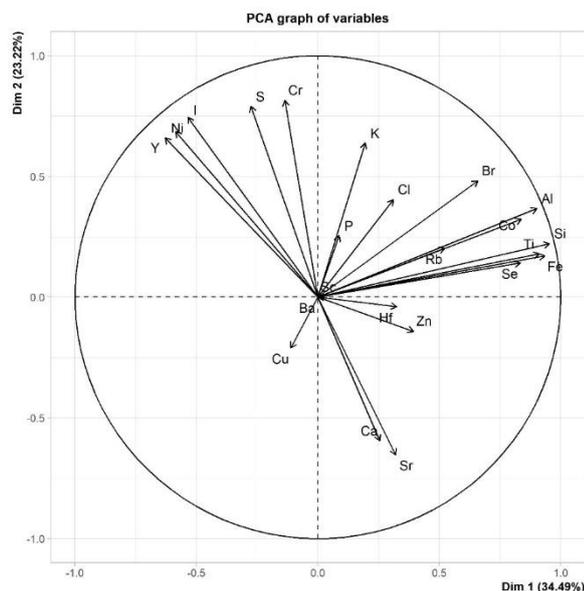


Figura 21. Análise de componentes principais em amostras de raízes de *Coffea canephora*.

Os sistemas radiculares são de extrema importância para culturas perenes como *C. canephora*. Além de serem responsáveis pela absorção de nutrientes e água, contribuem com serviços ecossistêmicos como sequestro de carbono, melhoria da estrutura do solo e conservação genética (MARSHALL et al., 2016; SILVA et al., 2020). E em condições ideais para o crescimento radicular, os genótipos de café são capazes de se desenvolver suficientemente com raízes absorventes concentradas em solo superficial (até 30 cm de profundidade). Os sistemas radiculares em *C. canephora* var. conilon são então rasos e bem distribuídos horizontalmente (PARTELLI et al., 2020). E este padrão foi observado anteriormente em pesquisas desenvolvidas por Partelli et al. (2014) e Silva et al. (2020). Inclusive, Partelli et al. (2016), encontraram cerca de 60% das raízes de café em profundidade de solo de 0-20 e 25-50 cm, demonstrando que o padrão para a espécie é que as raízes se distribuem na camada superficial do solo. Para corroborar com esta informação, Defrenet et al. (2016), avaliaram a biomassa e necromassa da raiz em um sistema agroflorestal de café e observaram que a maioria das raízes eram finas e estavam localizadas no solo superficial. Esta característica deve-se ao sistema de clonagem, que não se limita unicamente a uma raiz principal (ou pivô), como é observado em *C. arabica*, já que sua propagação se dá por sementes (PARTELLI et al., 2020; SCHMIDT et al., 2022). Por este motivo, as amostras de raízes analisadas neste presente estudo foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm.

Dentre os mecanismos relacionados à adaptação do café em ambientes, existem diversas características que são utilizadas para avaliar e selecionar genótipos superiores

para cultivo com uma maior capacidade produtiva, assim como, de aclimação ao estresse ambiente (SENRA et al., 2020; SCHMIDT et al., 2022). Dentre estes atributos, o sistema radicular vem sendo o objeto de estudos de programas de melhoramento, a fim de selecionar materiais genéticos mais produtivos, resistentes e adaptáveis. Contudo, estudos sobre o desempenho radicular do cafeeiro são escassos, principalmente durante a fase produtiva das plantas (SCOTTI-CAMPOS et al., 2019; SILVA et al., 2020). Provavelmente, a falta de dados na literatura se dá pelo ciclo da cultura, que é longo, além da falta de metodologias para avaliação e monitoramento das raízes de café. Mas, ter um melhor conhecimento deste órgão vegetal é extremamente interessante e importante, pois possui aplicações amplas e significativas para expandir a produtividade das culturas, já que através dessas informações é possível compreender melhor a espécie e seus requerimentos nutricionais (RYAN et al., 2016).

Comparando com os teores encontrados na solução do solo, quando obtidos os dados das raízes, observou-se redução de concentração de Al, Si, Fe e Ti. O alto teor de alumínio encontrado deve-se às suas altas concentrações no solo, devido a acidez da área e intemperismo. Altas concentrações como as evidenciadas neste trabalho, podem resultar em toxicidade e uma das principais consequências deste processo é a inibição do desenvolvimento do sistema radicular (FRANKOWSKI, 2016). Pois este elemento afeta o processo de divisão celular nas raízes, e conseqüentemente altera o processo de alongamento das raízes, além disso, aumenta o desenvolvimento de ápices das raízes inchadas (RAHMAN et al., 2018). A absorção de água e nutrientes como N, K, Ca, Mg e P também é afetada por altas concentrações de Al. A taxa fotossintética (PN) e de respiração foliar (E) e condutância estomática (gs) são reduzidas nas plantas. (MOSSOR-PIETRASZEWSKA, 2001; MARIANO e KELTJENS, 2005; CHEN e LIAO, 2016; BOJÓRQUEZ-QUINTA et al., 2017). O Al tem uma grande quantidade absorvida pelo simplasma da raiz mas que posteriormente causa danos ao crescimento da membrana (LAZOF et al., 1994). Conforme apresentado por Rengel (2004), o caminho de entrada do Al^{3+} é o apoplasto da raiz e alguns autores afirmam que o ápice radicular é um dos locais mais ativos de absorção de Al nas plantas (KLUG et al., 2011). Esta região fica próxima às raízes primárias e laterais e como as amostras coletadas deste presente estudo fazem menção às raízes mais superficiais, isto pode justificar o alto teor identificado.

As plantas são capazes de acumular Al nos seus tecidos e são classificadas como acumuladoras e não acumuladoras, de modo que plantas que acumularam um valor superior a 1.000 mg kg^{-1} em suas folhas ou raízes, são consideradas acumuladoras e as

com valores abaixo dessa taxa, são não acumuladoras (RAHMAN et al., 2018). Dessa forma, os genótipos estudados se caracterizam como plantas acumuladoras, apesar de não ter sido identificado teores de Al em folhas e frutos, a concentração de Al nas raízes foi de 25.096, 67 mg kg⁻¹, um valor bem elevado. Na maioria das espécies, uma maior exposição ao Al, principalmente em altas concentrações gera uma série de alterações morfológicas, em alguns casos, os danos são permanentes mas podem ser revestidos, sendo este, um indicador de plantas toleráveis (PELEJA et al., 2020). No caso dos genótipos avaliados, podem ser considerados tolerantes, pois apesar dos altos teores de Al no solo e em suas raízes, conseguiram se desenvolver bem, inclusive a altura é um caractere com alta herdabilidade bem como sua produção foi consideravelmente satisfatória, além disso, não foram detectados vestígios de Al nas folhas nem nos grãos crus e torrados dos clones. A complexação de Al nas raízes, evitando que o elemento seja transportado para partes aérea da planta, também pode ser um fator de tolerância das plantas ao alumínio, pois a manutenção do íon nos sistemas radiculares evita que o elemento possa causar danos em outros órgãos da planta (MARTIELLO et al., 2008). Esse comportamento de tolerância por *C. canephora*, variedade Catuaí Amarelo, também foi evidenciado no trabalho desenvolvido por Martiello et al. (2008), além desse, outras pesquisas associaram a complexação de Al no citosol como mecanismos internos de tolerância. Além disso, a absorção de fósforo foi satisfatória, já que a concentração nas raízes se mostrou maior que a do solo, indicando que a planta foi capaz de reverter os danos causados pelo Al, já que este elemento afeta diretamente na disponibilidade de P no solo. Acredita-se que *C. canephora* seja capaz de exsudar fosfato pelo ápice radicular e assim, precipita o Al³⁺, restringindo a sua absorção, e esse comportamento talvez possa explicar os altos teores de P na parte aérea dos genótipos estudados. Martiello et al. (2008), observaram o mesmo comportamento na variedade catuaí amarelo. E o processo de exsudação de fosfato foi primeiramente observado por Pellet et al. (1996) em variedades de trigo. Contudo, mais pesquisas são necessárias para se compreender melhor a dinâmica de *C. canephora* com o alumínio.

Como já citado anteriormente, o café possui uma alta variabilidade genética, principalmente *C. canephora*, por ser uma espécie alógama e apresentar autoincompatibilidade. Dessa forma, diversos estudos indicam variação entre diferentes genótipos quanto à capacidade de absorção e translocação de nutrientes (AMARAL et al., 2011), incluindo elementos como o P (REIS e MARTINEZ, 2002), K, Ca, Mg e S (TOMAZ et al., 2008), B, Zn, Cu e Mn (TOMAZ et al., 2011).

Diversos trabalhos, como o desenvolvido por Martins et al. (2015) identificaram a existência de variabilidade genética quanto à absorção, uso e eficiência de fósforo entre genótipos de *C. canephora*. A eficiência de absorção de P se refere à capacidade da planta de obter Pi do solo, e a eficiência de uso de P está relacionada à possibilidade de produção de biomassa utilizando o P absorvido (WANG et al., 2010). Os dados obtidos neste trabalho demonstram que a planta foi eficaz na absorção de P, já que o teor do elemento foi superior nas raízes, folhas e grãos. Além disso, de acordo com os dados de correlação de Pearson, a relação de MSF x P (0,6602), RMF x P (0,6071) foram significativos e valores positivos indicam que quanto maior a quantidade dos elementos, maior será o valor da característica relacionada. No caso, P demonstrou influência na produção de biomassa, indicando que os genótipos de *C. canephora* apresentaram um bom uso do P absorvido pelas raízes. Já para RMR x P (-0,5292), a correlação de valor negativo foi significativa, indicando que quanto maior for o valor do elemento, menor será o valor da característica correlacionada. No trabalho desenvolvido por Neto et al. (2016), as cultivares de *C. canephora* apresentaram maior concentração de P em raízes e produziram mais MS nas raízes, independente do tratamento com Pi, em comparação com as cultivares de *C. arábica*. Conseqüentemente, as cultivares de *C. canephora* tiveram maior razão raiz/parte aérea. O que pode ser explicado pela maior eficiência de absorção de Pi pelas cultivares de *C. canephora*. Estes dados corroboram com os obtidos neste trabalho, já que apesar de menor concentração de Pi na solução do solo, a planta foi capaz de absorvê-lo e apresentar maiores teores em outros tecidos além das raízes.

Quanto ao K, Ca e S, que são considerados essenciais para as plantas, todos apresentaram um aumento significativo de concentração nas raízes. O K é um macronutriente que pode chegar a constituir até 10% da massa seca da planta (LEIGH e WYN JONES, 1984; SUSTR e TYLOVA, 2019). Desempenha papel no metabolismo primário, na função estomática, crescimento de volume celular, dentre outros (MARSCHNER, 1995; ELUMALAI et al., 2002; BLATT, 2016; COTELLE e LEONHARDT, 2016; TAKAHASHI e KINOSHITA, 2016). O crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular dependem do K⁺ em vários níveis, como por exemplo, as atividades das células da raiz precisam de níveis adequados de K⁺ para manter o seu pH. Além disso, a expansão celular requer pressão de turgescência, obtido atrás de substâncias osmóticas ativas como o K⁺. Os pelos radiculares também crescem apicalmente através da ação de fluxos deste elemento, afetando assim a razão MSF/MSR (DOLAN e DAVIES, 2007; ZHAO et al., 2016; SUSTR e TYLOVA, 2019). Neste

trabalho, foi possível observar que os genótipos avaliados foram capazes de absorver em grande quantidade o K disponível no solo, já que seu teor nas raízes foi muito superior. Além disso correlações fenotípicas positivas que foram significativas, também foram identificadas para MSF x K (0,581), RMF x K (0,5887), indicando que o elemento influencia na característica relacionada. São escassos trabalhos na literatura que relacionem os teores de K em raízes de cafeeiros, normalmente as avaliações são feitas em tecidos foliares e frutos da espécie. Contudo, em um estudo desenvolvido por Bragança (2008), foi observado um acúmulo de 14% (18,9 g/planta) de K nas raízes de café conilon. Em outros trabalhos, teores de K também foram identificados nas raízes, de modo que 8,1 % de K estava alocado nas raízes da Variedade Bourbon Vermelho (CATANI e MORAES, 1958). Nas variedades Mundo Novo e Catuaí Vermelho, os teores de K nas raízes eram de 3,6% e 9,1%, respectivamente (CORRÊA et al., 1985). Neste trabalho, em relação com toda a planta, 44% do acúmulo de K encontra-se nas raízes dos genótipos avaliados.

Quanto ao Cálcio, seu teor encontrado nas raízes de *C. canephora*, são bem mais superiores à concentração do solo. O Ca é um elemento importante para os cafeeiros, e está envolvido em uma série de processos fisiológicos que influenciam no desenvolvimento, crescimento e produtividade da cultura. E inclusive, na ausência de Ca, a extensão das raízes é paralisada em poucas horas (TAIZ et al., 2017). As raízes das plantas podem absorver Ca^{+2} somente da solução do solo. A demanda deste elemento para certas espécies é alta e é um dos nutrientes mais requeridos pelos cafeeiros, sendo o *C. canephora* ainda mais exigente quando comparado com *C. arábica* (BRAGANÇA et al., 2008; RAMÍREZ et al., 2002; LAVIOLA et al., 2007; RAMÍREZ-BUILES et al., 2020). De acordo com Malavolta (1986), o acúmulo de Ca e K em raízes de cafeeiros são muito similares. No trabalho desenvolvido por Ramírez-Builes et al. (2020), Ca^{+2} influenciou significativamente nas raízes, pois a formação de tecidos radiculares depende da captação de cálcio, o crescimento radicular também é controlado por este nutriente, de modo, que está envolvido no desenvolvimento de meristemas radiculares lateral e primária (PICCHIONI et al., 2001). Além disso, auxiliou no crescimento, produção de massa seca total (de modo que a biomassa acima do solo e radicular aumentaram) e altura da planta, já a sua ausência reduziu o crescimento das raízes e conseqüentemente a razão raiz parte aérea. No trabalho desenvolvido por Bragança et al. (2008), 9% do acúmulo de Ca encontrava-se nas raízes. Em outros trabalhos, a concentração de Ca nas raízes estava entre 8,8 e 9%. Neste presente estudo, Ca acumula-se em mais de 50% nas raízes,

provavelmente, devido a sua baixa mobilidade. Seria interessante que mais pesquisas avaliando a morfologia das raízes com a concentração de Ca fossem realizadas, bem como a sua relação com Al, já que os cafeeiros normalmente são cultivados em solos ácidos.

Já o S, é um nutriente essencial, requerido pela planta para induzir o crescimento das raízes, melhorar o desenvolvimento radicular, estimular a produção de sementes e facilitar o crescimento da planta (KATHPALIA e BHATLA, 2018; BOURANIS et al., 2020). Nestes clones avaliados, há uma alta concentração do elemento nas raízes, acredita-se que pelo fato dos pelos radiculares contribuírem para a absorção do elemento (KIMURA et al., 2019) e como visto anteriormente, as raízes de *C. canephora* se distribuem horizontalmente em grande proporção, o que pode ter favorecido a absorção mesmo tendo pouca concentração do elemento na solução do solo. Trabalhos desenvolvidos por Bragança et al. (2008), Catani et al. (1965) e Corrêa et al. (1985), observaram que do total de S acumulado na planta, 24%, 13,91% e 18,95%, respectivamente, estava alocado nas raízes. Neste estudo, mais de 40% do S se encontra nas raízes dos clones avaliados. Não existem muitos dados na literatura que relatem o acúmulo do S em raízes de cafeeiro, assim, mais estudos devem ser desenvolvidos, inclusive comparando áreas que tenham maior e menor concentração do elemento.

O Si, Fe, Ti, Cl, I e Zn são considerados elementos traços, e alguns são considerados essenciais para o homem e apresentam interesse ambiental. Assim, são considerados elementos importantes devido a sua associação com questões ambientais e a saúde das plantas, animais e humanos. Entretanto, podem ser tóxicos para as plantas dependendo de sua concentração (SWAINE, 2000; STRACHAN, 2010). Neste trabalho, as concentrações de Si, Fe e Ti reduziram enquanto Cl, I e Zn aumentaram, quando comparados com os teores identificados no solo. O Fe é um nutriente essencial pois limita a produção de biomassa e produtividade das plantas (BRIAT et al., 2010). Seus teores devem ser controlados pois tanto a sua deficiência quanto o excesso (toxicidade) afetam a planta. Os efeitos de toxicidade de Fe podem ser diretos pela absorção e acúmulo em excesso do nutriente em algum órgão vegetal da planta, ou pode se dá pela precipitação sobre as raízes devido ao alto teor do elemento no solo, formando uma camada de óxido férrico e afetando a absorção de outros elementos como P, K e Zn (BECKER; ASCH, 2005; KROHLING et al., 2016). De acordo com o trabalho desenvolvido por Krohling et al. (2016), as maiores concentrações de Fe, Zn e S foram identificadas no sistema radicular, o mesmo comportamento foi observado neste presente estudo. Assim como foi evidenciado por Bragança et al. (2008), um maior acúmulo de ferro nas raízes de café

conilon cultivado em solo do tipo latossolo. Covre et al. (2013) obtiveram dados de que os genótipos de café conilon apresentaram maior teor de ferro nas raízes em relação a parte aérea, confirmando o que foi apresentado por Bragança et al. (2008) e corroborando com os dados obtidos nesta pesquisa. A eficiência de absorção pelas raízes assim como o teor absorvido de um elemento em específico são características determinadas geneticamente, uma vez que as plantas são capazes de absorver nutrientes contra um gradiente de concentração e acumulá-los (LARCHER, 2000; COVRE et al., 2013). Contudo, a alta concentração de Fe^{2+} inibe a formação de raízes novas e afeta na absorção de outros elementos bem como na produção de grãos. E como está sendo evidenciado alto acúmulo do elemento nas raízes, deve-se procurar meios de evitar que o Fe^{2+} esteja tão disponível para as plantas, e ainda, identificar genótipos que absorvam em uma quantidade mais equilibrada e utilizá-los como parâmetros para melhoramento genético.

O Zn é um dos elementos mais importantes para o cafeeiro especialmente em solos ácidos (PEDROSA et al., 2013), atua como cofator estrutural, funcional e regulatório de inúmeras enzimas (BRAGANÇA et al., 2008). No trabalho desenvolvido por Bragança et al. (2008), o Zn foi o quarto micronutriente mais acumulado pelo café conilon e 61% deste elemento estava nas raízes. Pedrosa et al. (2013), avaliaram materiais de *C. arabica* onde também foi observado maior acúmulo deste nutriente em suas raízes, mesmo em solos que não receberam fertilização. Neste presente trabalho, de todo o teor de Zn, mais de 40% estavam alocados nas raízes dos clones avaliados. Os resultados diferem dos encontrados por outros autores, em que o teor de Zn nas raízes era inferior.

O titânio é o nono elemento mais abundante da crosta terrestre e é o segundo metal de transição mais abundante, depois do Fe (BUETTNER e VALENTIM, 2012). De acordo com Kelemen et al. (2013), as raízes das plantas acumulam mais Ti e uma pequena quantidade é transportada para a parte aérea. Este comportamento foi observado nos clones de café avaliados, de modo que nas raízes o teor de Ti foi de $1.449,60 \text{ mg kg}^{-1}$ enquanto nas folhas foi de $8,66 \text{ mg kg}^{-1}$. A absorção do elemento pelas raízes é através do transporte passivo e ativo (LYU et al., 2017). Não se tem dados na literatura de valores de referência em cafeeiros para o acúmulo de Ti em raízes mas sabe-se que o elemento parece aumentar as concentrações de macro e micronutrientes. Experimentos mostram que os quelatos de Ti podem promover o crescimento de plantas jovens e aumentar a atividade de algumas enzimas (BACILIERI et al., 2017). O papel biológico do titânio nas plantas tem sido estudado por mais de cem anos, os autores propõem com base nos dados obtidos que o Ti pode participar no metabolismo da planta como um catalisador

redox e que o elemento se acumula principalmente em órgãos de assimilação (LYU et al., 2017). Seria interessante que mais estudos fossem realizados quanto ao café e concentrações de titânio em seu sistema radicular a fim de entender melhor de que forma o elemento influencia nas raízes bem como na absorção de outros elementos.

O iodo é um dos elementos menos abundantes na superfície da terra (MOHIUDDIN et al., 2019). As plantas podem absorvê-lo pelas suas raízes ou estruturas acima do solo (MEDRANO-MACÍAS et al., 2016; GONZALI et al., 2017). É um elemento essencial para os animais e está envolvido na regulação de crescimento, desenvolvimento e metabolismo (BLASCO et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2022). Quanto à sua importância para as plantas, não se tem muitos dados na literatura, de modo que, o seu papel funcional como nutriente essencial para as plantas pode ter sido mascarado. De acordo com Kiferle et al. (2021), o I desempenhou papel no metabolismo das plantas de *Arabidopsis thaliana*, aumentando a produção de biomassa e se fazendo presente nas proteínas da raiz. Neste estudo, o segundo órgão com maior acúmulo de I foi o sistema radicular. Devido a escassez de dados na literatura envolvendo este elemento e a espécie em questão, mais estudos são necessários acerca da capacidade de absorção de I dos cafeeiros, assim como, o papel deste nutriente na planta.

O Si apresentou alto teor acumulado nas raízes dos clones deste estudo, apesar de não ser um nutriente essencial, ele é considerado benéfico ou útil, entretanto, pode vir a alterar toda a dinâmica de absorção de outros nutrientes (POZZA et al., 2009). Este elemento fornece para as plantas uma maior resistência a estresses bióticos e abióticos, além de melhorar o manejo fitossanitário dos cafeeiros (HASHEMI et al., 2010; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010). A absorção deste elemento se dá pela difusão passiva e pela ação de transportadores que se localizam na exoderme e endoderme das raízes (MITANI e MA, 2005; MA e YAMAJI, 2008). De acordo com Ma et al. (2001), as plantas podem ser consideradas acumuladoras e não acumuladoras de silício e com base na alta concentração do elemento nas raízes dos genótipos, pode-se concluir que o cafeeiro possui alto potencial para ser uma espécie acumuladora. Na pesquisa realizada por Pozza et al. (2009), em que avaliaram variedades de *C. canephora*, houve uma maior absorção de elementos essenciais pelas raízes, nos genótipos que apresentaram maiores concentrações de Si. Já no trabalho desenvolvido por Ribeiro et al. (2011), as concentrações de silício causaram restrição no crescimento radicular dos cafeeiros, mas não houve alteração na funcionalidade do sistema radicular nem no desenvolvimento da parte aérea da planta. Neste trabalho não houve análise morfológica das raízes para visualizar se houve restrição

ou não do sistema radicular devido ao alto teor do Si na raiz, contudo, alguns elementos foram absorvidos em maior quantidade, mesmo estando em baixa concentração na solução do solo. Mais estudos devem ser realizados para que se entenda se o Si pode causar toxidez ao cafeeiro ou pode auxiliar na absorção de macro e micronutrientes em solos ácidos.

As concentrações de Cl em plantas são evidenciadas a muito tempo por diversos autores (CHEN et al., 2010). O teor médio deste elemento está em uma faixa típica de macronutrientes (MARSCHNER, 1995). Nas plantas, o Cl apresenta funções bioquímicas e fisiológicas sendo extremamente importante para a fotossíntese (NEENU et al., 2020). Neste estudo, foi identificado uma alta concentração nas raízes dos genótipos ($2.639,87 \text{ mg kg}^{-1}$). Não existem dados na literatura que relacionem este elemento com cafeeiros, apesar de ser um nutriente que contribui com funções do metabolismo da planta, normalmente é associado a casos de toxidez. Contudo, para algumas espécies como o *Cocos nucifera* Linn é um essencial para o desenvolvimento da planta (NEENU et al., 2020). Dessa forma, é um elemento que requer atenção quanto ao seu comportamento na planta, de que forma contribui com o desenvolvimento dos cafeeiros e sua produção.

Neste trabalho houve dissimilaridade entre os genótipos quanto ao acúmulo de nutrientes em suas raízes conforme observado nas figuras 18,19, 20 e 21, onde também é possível visualizar que os genótipos C2, C7 e C15 apresentaram uma maior dissimilaridade quando comparados com os demais, indicando que estes materiais podem ter assimilado e acumulado determinados nutrientes em maior proporção assim como também podem ter usado mecanismos de resistência em suas raízes a fim de evitar que elementos com possibilidade de causar toxidez não fossem absorvidos. Estes dados são de extrema importância pois os mecanismos de defesa que ocorrem nas raízes são de cunho genético, e com esses dados, há a possibilidade de selecionar um material superior para programas de melhoramento de cafeeiro e assim dar continuidade em outros estudos.

5.2.3 Componentes inorgânicos em folhas de *Coffea canephora*

Diversos órgãos vegetais podem fornecer subsídios necessários para o manejo nutricional adequado. Contudo, o órgão mais usado em cafeeiros para essas análises, são as folhas, pois são fisiologicamente ativas e estão presentes em todos os ciclos da cultura, permitindo que o status nutricional da planta possa ser monitorado (MALAVOLTA, 2002; DUBBERSTEIN et al., 2016). Nas folhas, observa-se redução da concentração de macronutrientes considerados móveis na planta durante a fase reprodutiva (SANTOS et

al., 2021b). Esta redução por sua vez, resulta da migração de fotoassimilados e elementos minerais para as flores e frutos após a degradação de compostos celulares (TAIZ et al., 2017). Em diversas variedades de café conilon, Oliosi et al. (2020) e Covre et al. (2016) observaram maior demanda na seguinte ordem: N, P, K, Ca, S, Mg, B, Fe, Mn, Zn e Cu nas fases reprodutivas, em antese, pré-floração, enchimento de grãos e frutificação. Mas de modo geral, as plantas de *C. canephora* absorvem nitrogênio, cálcio e potássio em grandes quantidades, enquanto, fósforo, magnésio e enxofre são menos requeridos (BRAGANÇA et al., 2008; PARTELLI et al., 2014; COVRE et al., 2016). Neste presente estudo foram identificados maiores teores de K (11.888 mg kg⁻¹), Ca (10.730,067 mg kg⁻¹), Rb (4.448,5 mg kg⁻¹), Hf (2.972,7 mg kg⁻¹), P (2.537,74 mg kg⁻¹), S (2.625,27 mg kg⁻¹), Y (2.502,4 mg kg⁻¹) e Cl (1.772,72 mg kg⁻¹) nas quatro repetições das folhas dos quinze genótipos estudados de *C. canephora* (Figuras 10, 11, 12 e 13).

A estimativa de parâmetros genéticos é uma das principais ferramentas utilizadas em programas de melhoramento, de modo que determinam a influência genética e ambiental em uma determinada característica estudada (SILVA et al., 2019; SCHMIDT et al., 2022). Os coeficientes de variação (CVe e CVg) e o índice de herdabilidade (h^2) são capazes de expressar a variabilidade genética presente e o quanto pode ser transmitido para populações futuras (DA SILVA et al., 2018; GILES et al., 2018), auxiliando na identificação de genótipos promissores e assim, contribuindo diretamente com programas de melhoramento para o cafeeiro (RODRIGUES et al., 2012; SANTOS et al., 2021b).

Os parâmetros genéticos foram estimados pelo teste *F* e não foi detectada interação entre genótipos e nutrientes na maioria dos elementos químicos avaliados. O coeficiente de variação experimental (CVe) permite estimar quanto o ambiente pode influenciar na expressão das características avaliadas de um experimento (DUBBERSTEIN et al., 2020). E a concentração de nutrientes nos órgãos das plantas, como as folhas, por exemplo, dependem das condições ambientais e, neste trabalho foram observados valores de CVe superiores aos de CVg para a maioria dos elementos químicos, indicando assim, que houve influência do ambiente no experimento (Tabela 8). Nos trabalhos desenvolvidos em que a diversidade genética e parâmetros genéticos foram estimados com base na concentração de nutrientes em folhas de genótipos de *C. canephora*, como por exemplo, os estudos desenvolvidos por Gomes et al. (2016) e Oliosi et al. (2020), os valores de CVe obtidos foram próximos ou abaixo de 60%. Já nas pesquisas realizadas por Giles et al. (2019), Santos et al. (2021b), Silva et al. (2021) e

Schmidt et al. (2022) os valores foram próximos ou abaixo de 20%. Entretanto, para todos estes trabalhos, observou-se uma dependência ambiental de alguns nutrientes em alguns casos excepcionais, por exemplo: Fe, Cu, Mn e B, os quais apresentaram valores mais altos de C_{Ve}. Nesta pesquisa, foram identificados os valores mais elevados de coeficiente de variação ambiental para Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn e Sr quando comparados com outros trabalhos (Tabela 8). Os menores valores de C_{Ve} foram observados para os nutrientes: P, S, K, Cl, Ca e Fe. De acordo com Ferrão et al. (2008), elevados valores de C_{Ve} podem estar associados a alguns fatores como tempo de ciclo da cultura, tamanho do experimento, respostas variadas dos genótipos à altas temperaturas e seca, bem como suas diferentes respostas à incidência de pragas e doenças, ventos e podas. Com base nisso, justificam-se os altos valores de C_{Ve} identificados neste estudo, pelo fato de que os clones avaliados nesta pesquisa, são materiais genéticos adaptados às condições de Rondônia, e estão em processo de adaptação na região de Manaus. Apesar das condições edafoclimáticas serem semelhantes, os genótipos provavelmente responderam de modo diferente ao ambiente de Manaus.

O coeficiente de variação genético (CV_g), por sua vez, permite estimar a variabilidade que ocorre em uma população e dessa forma, estabelece níveis de variabilidade em genótipos específicos. Quanto maior o seu valor, mais heterogêneo é o material avaliado (RODRIGUES et al., 2012; SANTOS et al., 2021b). Ou seja, indica até que ponto o resultado é influenciado pela genética de uma planta, quanto maior o coeficiente, melhor é a influência genética e maior a chance de se obter melhoramento genético (OLIVEIRA et al., 2015). Nos trabalhos desenvolvidos por Giles et al. (2019), Santos et al. (2021b), Silva et al. (2021) e Schmidt et al. (2022), os valores de CV_g não ultrapassaram 30%, sendo Fe, Mn, Cu e B, os nutrientes com maiores coeficientes. Neste estudo, altos valores de CV_g foram identificados para uma parte dos elementos avaliados, contudo, conforme indicado por Santos et al. (2021b) e Silva et al. (2021), a maioria dos nutrientes avaliados apresentaram valores de CV_g abaixo dos níveis considerados para pesquisas de melhoramento genético. Assim, os maiores valores de CV_g foram identificados para: Cu, Rb, Hf e I. Já os menores foram observados em P, K, Br e Y (Tabela 8). Santos et al. (2021b), identificaram menores CV_g para Zn nas folhas, enquanto Silva et al. (2021) e Schmidt et al. (2022), identificaram para P. No entanto, de acordo com Giles et al. (2019), as variações ambientais podem ofuscar a variação genética. Dessa forma, o índice de variação (razão entre CV_g/C_{Ve}) é um importantíssimo parâmetro em estudos de melhoramento genético pois permite identificar traços ou

características com variação predominantemente associada a causas genéticas em vez de ambientais (NASCIMENTO et al., 2014). Neste trabalho, foram identificados valores de CVg/CVe abaixo ou próximo a 1,0 para os elementos P, K, Cu, Br, Rb, Y, Hf e I (Tabela 8), de acordo com Faluba et al. (2010), isto os torna adequados para uso em programas de melhoramento, pois valores entre 0,70 e 2,00 têm sido considerados para programas de melhoramento com *C. Canephora* cv. Conilon (FERRÃO et al., 2008). Resultado semelhante também foi encontrado por Giles et al. (2019).

Quanto ao coeficiente de herdabilidade (h^2), é um dos principais parâmetros para verificar o controle genético das características estudadas bem como para auxiliar no processo de seleção de materiais superiores para programas de melhoramento, expressando a relação entre a variação genotípica e fenotípica. Alguns elementos estudados apresentaram um valor representativo de herdabilidade (h^2), acima ou próximo de 50%, ficando entre 17,39% e 77,42%, o que não é tido como muito alto. Apesar de que valores de h^2 maiores que 50% já possam ser considerados em programas de melhoramento, ainda é recomendável que para maior garantia de ganhos genéticos se use valores de h^2 iguais ou superiores a 80% (FALCONER, 1983). Contudo, para esta pesquisa, nas condições do experimento e pelo pouco tempo avaliado, estes valores acima de 50% são satisfatórios. Sendo os maiores valores de h^2 detectados para os elementos Hf (77,42%), I (76,07%), Rb (75,28%) e Cu (47,26%), e o menores valores: P (17,39%) e K (23,78%) (Tabela 8). Estes resultados são semelhantes aos identificados por Schmidt et al. (2022), em que P teve a menor taxa de h^2 (12,93%). Dessa forma, a concentração de nutrientes nas folhas mostrou uma maior influência do ambiente, visto pelos baixos valores de herdabilidade. De modo geral, o resultado foi satisfatório, demonstrando que estes genótipos avaliados são bastante promissores, já que a sua variação fenotípica advém especialmente de uma origem genética, ou seja, há um peso do componente genético no fenótipo (GILES et al., 2019). Além disso, em estudos que abrangem a interação de genótipos de *C. canephora* com diferentes ambientes, índices de herdabilidade variando de insignificantes a muito próximo de 1 podem ser encontrados (MONTAGNON et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2015; STARLING et al., 2018; AKPERTEY et al., 2019).

Plantas de *C. canephora* são bastante produtivas e apresentam uma maior demanda nutricional quando comparadas a outras espécies. Este requerimento nutricional varia de acordo com as características genéticas da planta bem como o órgão vegetal analisado, além de que a concentração nutricional varia também com as condições

edafoclimáticas, época do cultivo, idade da planta e ciclo de maturação do genótipo (SERRANO et al., 2011; PARTELLI et al., 2014; OLIOSI et al., 2020). Desse modo, é possível concluir que alguns materiais genéticos podem absorver ou translocar mais nutrientes do que outros (SANTOS et al., 2021b).

As concentrações foliares de P, K, Ca, S, Cl e Y não diferiram entre os genótipos avaliados, indicando que são de extrema importância para as funções fisiológicas da planta (TAIZ et al., 2017). Avaliações nutricionais das folhas são de importância para que se tenha conhecimento do seu status nutricional para um manejo adequado da cultura, principalmente para determinar o tempo ideal de adubação de elementos como o P e K (PARTELLI et al., 2021). O P é um componente de nucleotídeos fundamental no metabolismo energético da planta, como o ATP, e desempenha função no DNA e RNA. De acordo com Dubberstein et al. (2016), é o mais requerido antes dos estágios de florescimento e enchimento de grãos, tal fato foi confirmado por Santos et al. (2021b), em que houve aumento de concentração do nutriente no mês de fevereiro. O fósforo é tido como um dos macronutrientes requeridos em menores quantidades (BRAGANÇA et al., 2008), o que se confirma neste estudo, pois o seu teor detectado foi de 2.442,00 mg kg⁻¹. Apesar disso, desempenha um papel vital na fotossíntese e na fosforilação de proteínas (TAIZ et al., 2017). Já o K atua na regulação do potencial osmótico das células vegetais, além de ativar enzimas importantes na etapa da respiração e na fotossíntese (TAIZ et al., 2017). No trabalho desenvolvido por Santos et al. (2021b), houve variação entre dois genótipos quando avaliada a concentração de K nas folhas, influenciado pelo tempo de maturação dos clones que diferem entre si. Esta variação pôde ser considerada também devido o período de enchimento de grãos, ou por estar associado às condições de maturação dos grãos que podem variar de um genótipo para o outro. Esta mesma situação foi evidenciada por Schmidt et al. (2022).

Silva et al. (2021), observaram que as concentrações de P e K nas folhas, durante o período de enchimento de grãos, eram superiores à fase de pré-floração. As folhas avaliadas neste presente trabalho, foram coletadas em época de florescimento das plantas de café. Seria interessante que coletas de material vegetal pudessem ser realizadas na época de enchimento de grãos para que se realizasse a comparação entre estas fases fenológicas.

O cálcio desempenha papel estrutural/apoplástico e sinalizador nas plantas (TAIZ et al., 2017). De acordo com Bragança et al., 2010, é o segundo nutriente mais acumulado em folhas de *C. canephora*, pois apresenta importância para atender as demandas durante

o período de floração e fase inicial de crescimento e rápida expansão dos frutos. De acordo com os dados obtidos nesta pesquisa, ele foi o elemento encontrado em maiores concentrações nos clones avaliados. No trabalho desenvolvido por Covre et al. (2018), as concentrações de Ca reduziram nas folhas durante o período de frutificação. Contudo, um comportamento de aumento de concentração deste elemento foi observado por alguns genótipos avaliados por Santos et al. (2021b), em que os teores de Ca eram mais baixos nas primeiras estações e a partir da terceira aumentaram em até 80%. Nesta pesquisa, os teores de Ca identificados nos grãos foram inferiores às concentrações encontradas nas folhas.

O S pertence ao primeiro grupo de elementos essenciais e é constituinte de várias coenzimas e vitaminas essenciais para o metabolismo da planta. Exercendo assim um papel fundamental na fotossíntese e no ciclo de Krebs para gerar energia e reservas para planta. Assim, é essencial para a estrutura foliar (TAIZ et al., 2017; MARTINS et al., 2019). Os teores deste elemento encontrados nas folhas, normalmente são maiores nos períodos de pré-floração e enchimento de grãos, conforme discutido por Oliosí et al. (2020) e Silva et al. (2021). No trabalho de Santos et al. (2021b), houve uma estabilização da concentração foliar de S para alguns genótipos avaliados, contudo, houve um aumento significativo na próxima estação, seguido de redução e estabilização para alguns genótipos, comportamento semelhante ao observado para estes genótipos estudados em Manaus, com redução nos grãos e leve aumento nos grãos torrados. Conforme apresentado por Tomaz et al. (2003), diferentes genótipos podem variar quanto à absorção, translocação e eficiência do uso de S na planta devido à afinidade de absorção no sistema radicular e mobilidade nos vasos do xilema e floema (MASRCHNER, 1995).

O cloro é um elemento requerido para a reação da clivagem da água na fotossíntese pelo qual o oxigênio é produzido, além disso, pode ser utilizado para a divisão celular em folhas e raízes (TAIZ et al., 2017). Neste trabalho a segunda maior concentração deste elemento foi nas folhas, sendo a primeira nas raízes. Não existem dados na literatura em que possa relacionar o Cl com uma maior produção de biomassa ou maior crescimento vegetativo da espécie. Entretanto, é um elemento que merece uma maior atenção, especialmente por ter sido encontrado em abundância nas folhas de *C. canephora*, uma espécie comercial a ser adaptada na região de Manaus.

São considerados elementos terra - rara (ETR), o Y, juntamente com o Sc e os elementos químicos classificados como lantanídeos, os quais, são mais conhecidos pelas suas aplicações em produtos de tecnologia de ponta (GUPTA e KRISHNAMURTHY,

2016; SERUFF e VERA, 2019), sendo amplamente utilizados em astronavegação, energia nuclear, cerâmicas e outros (DEQIAN, 2017). Em relação à agricultura, não existem valores de referência ou dados na literatura para concentrações foliares de Y, principalmente para *C. Canephora*. Contudo, apesar de se ter pouco conhecimento da sua relação com os processos fisiológicos de uma espécie vegetal, um trabalho desenvolvido por Hu et al. (2004) e Zeng et al. (2006), identificou relações benéficas do elemento em plantas, relacionando-se diretamente com o crescimento e rendimento da espécie vegetal. Outros benefícios da aplicação destes elementos ETR foram observados por Chunhong et al. (2013), em que se observou um incremento na produtividade vegetal, maior germinação de sementes e crescimento de plantas, além de fornecer um aumento no desenvolvimento de folhas e conseqüentemente aumentar a biomassa e qualidade dos frutos. Entretanto, resultados negativos foram identificados em pesquisa desenvolvida por Maksimovic et al. (2014), com o aumento da concentração de Y na cultura. Tendo em vista a influência que este elemento pode exercer sobre uma espécie vegetal, faz-se necessário que estudos sejam realizados para que se tenha uma melhor compreensão do comportamento do ETR na biosfera e principalmente na interface solo- planta.

Tabela 8. Quadrados médios e parâmetros genéticos de 19 elementos químicos avaliados em folhas de 15 genótipos de *Coffea canephora*.

FV	GL	Quadrados Médios									
		P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Fe	Co
Blocos	3	4234499.33	1689661.93	5332550.44	315966592.55	186021045.87	42131354.27	0.26	164425.48	6661.33	6.22
Genótipo	14	3685377.42 ^{ns}	2902301.77 ^{ns}	3410839.96 ^{ns}	151637070.86 ^{ns}	40602565.12 ^{ns}	5817568.53 ^{ns}	0.06 ^{ns}	69823.32 ^{ns}	2077.82 ^{ns}	37.032078*
Resíduo	42	3044372.45	4018453.01	4098284.57	115577489.51	93755434.68	6308044.35	0.11	83469.74	3839.77	6.2215
Média		2944.53	2824.82	2237.53	17451.75	12719.93	2002.73	0.19	78.24	84.63	1.091167
Mínimo		1142.00	1377.00	481.70	5080.00	1314.00	3.49	0.00	0.21	25.53	0.09
Máximo		9484.00	14510.00	11950.00	69860.00	61620.00	9088.00	1.72	1262.00	343.70	23.89
CVe (%)¹		59.26	70.96.00	90.48	61.60	76.12	125.41	173.43	369.25	73.22	228.590078
Parâmetros Genéticos											
Var. fenotípica		921344.35	725575.44	852709.98	37909267.71	10150641.28	1454392.13	0.01	17455.83	519.45	2.28
Var. ambiental		761093.11	1004613.25	1024571.14	28894372.37	23438858.66	1577011.08	0.03	20867.43	959.94	2.39
Var. genotípica		160251.24	0.00	0.00	9014895.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Herdabilidade (%)		17.39	---	---	23.78	---	---	---	---	---	---
CVg (%)²		13.60	---	---	17.20	---	---	---	---	---	---
CVg/CVe³		0.23	---	---	0.28	---	---	---	---	---	---
Continuação....											
FV	GL	Quadrados Médios									
		Ni	Cu	Zn	Br	Rb	Sr	Y	Hf	I	
Blocos	3	182284.52718	2859317.17	4470430.46	8223242.764647	26474290.585211	3191278.357498	3827237.225375	7583738.438573	14500.450735	
Genótipo	14	23229.99778 ^{ns}	3267779.52 ^{ns}	6501596.15 ^{ns}	4825997.838464 ^{ns}	25863616.3751**	2490884.258929 ^{ns}	3914545.692167 ^{ns}	9134241.635942**	166436.036345**	
Resíduo	42	248836.2328	1723506.71	10606051.16	4107943.613619	6392671.477019	2836422.684255	2876541.995467	2062539.381379	39815.155183	
Média		167.857833	354.16	1423.99	1070.25	2905.169667	402.808	2034.4100	2321.924	161.08	
Mínimo		0.09	3.41	4.32	0.72	0.59	0.46	1.95	1.77	0.00	
Máximo		2475.00	7822.00	9493.00	9329.00	9772.0	8407.0	7796.0	8137.0	1125.00	
CVe (%)¹		297.177	370.69	228.70	189.31	87.03	418.10	83.3671	61.852	123.87	
Parâmetros Genéticos											
Var. fenotípica		38112.52	816944.87	1625399.03	1206499.459616	6465904.093775	622721.064732	978636.423042	22835560.408986	41609.0090	
Var. ambiental		47911.93	430876.67	2651512.78	1026985.903405	1598167.869255	709105.671064	719135.498867	515634.845345	9953.788796	
Var. genotípica		0.00	386068.20	0.00	179513.5562110	4867736.22452	0.00	259500.924175	1767925.563641	31655.22029	
Herdabilidade (%)		---	47.26	---	14.8789	75.2831	---	26.52	77.42	76.0778	
CVg (%)²		---	175.44	---	39.57	75.9437	---	25.0397	57.26	110.45	
CVg/CVe³		---	0.47	---	0.209	0.87	---	0.3004	0.926	0.8917	

ns; **: * não significativo, $p < 0,01$, $p < 0,05$, respectivamente, pelo teste F. ¹Coefficiente de variação experimental; ²Coefficiente de variação genético; ³Razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação experimental.

Diferenças de concentração nutricional entre genótipos avaliados em um mesmo período também foram observados por Gomes et al. (2016), Martins et al. (2019b) e Silva et al. (2021). De acordo com os autores, essas diferenças podem estar relacionadas a alguns fatores, como: afinidade de absorção de nutrientes, compartimentalização nas raízes ou outros órgãos, mobilidades nos vasos do xilema e floema e alterações na rizosfera durante o crescimento. Outro fator muito importante observado por Partelli et al. (2013), foi o acúmulo de biomassa que diferiu entre genótipos de *C. canephora*, e a diluição de nutrientes pode ocorrer em genótipos que apresentarem maiores taxas de acúmulo de biomassa e afetam aqueles que possuem menores. O que pode afetar diretamente na concentração de teores de nutrientes nas folhas, indicando assim, maior ou menor eficiência de absorção, translocação ou uso de nutrientes pela planta entre cultivares ou linhagens e conseqüentemente a possibilidade de melhoramento e ou seleção de cultivares mais eficientes para uso de nutrientes (FERREIRA et al., 2013; SILVA et al., 2021).

Com base nos dados apresentados, foi possível detectar variabilidade genética entre os genótipos para os elementos Cu, Rb e Hf em que suas concentrações dividiram os genótipos em dois grupos, sendo que o genótipo C6 apresentou maiores médias para os três elementos, enquanto o C15 destacou-se apenas para Cu. O genótipo C12 apresentou maiores médias para Rb e Hf. Por fim, o I, o qual dividiu os genótipos em três grupos, teve como destaque o material C1, que apresentou maior média. Essa existência de variabilidade entre os clones, é uma condição essencial para que genótipos superiores possam ser selecionados.

O uso de elementos como o Hf na indústria tem crescido de forma constante nos últimos anos, assim como o do Sc que foi encontrado na solução do solo da área onde os genótipos estão estabelecidos. Devido a este uso contínuo, é de se esperar que estes elementos estejam presentes no meio ambiente, como no solo e em folhas das plantas (BINNEMANS e JONES, 2015; BOTELHO JÚNIOR, 2021; HU et al., 2021). No caso do Hf, foram identificados teores significativos nas folhas de *C. canephora*. Dessa forma, é interessante e útil que estudos sobre estes elementos sejam realizados a fim de se compreender melhor os efeitos de bioacumulação destes elementos sobre o meio ambiente e assim, prever os impactos negativos e positivos. Uma vez que as informações sobre a biogeoquímica de Hf são muito escassas e não se tem dados na literatura da ocorrência deste elemento em cafeeiros (SHTANGEEVA, 2021), deve-se procurar

entender este comportamento, uma vez que a sua concentração no solo era baixíssima e mesmo assim um teor significativo foi observado nas folhas, o que indica que a planta provavelmente absorveu mais pelos tecidos foliares do que propriamente pelas raízes, assim, cabem mais estudos visando compreender se este elemento influencia positivamente na planta ou se afeta a sua produtividade e crescimento vegetal. Um comportamento semelhante foi observado para o Rubídio, que é um elemento comum na crosta terrestre, e é considerado um análogo químico do P. Supõe-se que se houver uma maior concentração de Rb disponível no solo, a planta o absorverá em maiores quantias, ao invés de K, e isso pode afetar consideravelmente o desenvolvimento do vegetal. E a maior absorção de Rb pode ser devido à baixa concentração de K na solução do solo, pois acredita-se que os mecanismos de absorção e transporte destes dois elementos são semelhantes dentro de uma planta (LÄUCHLI e EPSTEIN, 1970; NYHOLM e TYLER, 2000; SHTANGEEVA et al., 2021). Em um trabalho desenvolvido por Shtangeeva et al. (2021), duas espécies vegetais acumularam grandes quantidades de Rb, resultando em uma diferença estatística nas concentrações de elementos em raízes e folhas. Resultados semelhantes foram observados neste trabalho, uma vez que o elemento foi um dos que apresentou maior herdabilidade e CVg, desse modo, estudos mais específicos também devem ser realizados com este elemento e seu papel no desenvolvimento de cafeeiros.

O Cu por sua vez é encontrado em rochas, água e ar, e suas principais fontes são indústrias, fertilizantes, resíduos agrícolas e outros (AMEH e SAYES, 2019; LEYGRAF et al., 2019), está presente em combustíveis, motores e pneus, o que justifica a sua dispersão por meio de tráfego veicular. De acordo com Dubberstein et al. (2017), é um dos elementos mais acumulados por *C. canephora*. O cobre é um elemento relativamente imóvel nas plantas, de modo que folhas verdes podem acumular altas concentrações e não o liberar para outros tecidos (TITO et al., 2016). Este fato pode justificar os resultados encontrados nesta pesquisa, contudo, mais informações devem ser coletadas pois não existem valores de referência para a concentração de Cu em solos da Amazônia nem em plantas como o cafeeiro, e devido a sua significância nesse estudo, é importante compreender se o elemento contribui ou afeta negativamente a cultura, principalmente por ser uma das características com herdabilidade elevada e que pode ser selecionado a fim de se utilizar em programas de melhoramento de café.

Como visto anteriormente, o iodo é um dos elementos menos abundantes na crosta terrestre e não é considerado essencial para plantas terrestres (MOHIUDDIN et al., 2019),

contudo, é essencial para animais e para o ser humano (NASCIMENTO et al., 2022). Apesar de não ser considerado essencial, um trabalho desenvolvido por Kiferle et al. (2021), mostrou que o I auxiliou no aumento da produção de massa seca, acelerou o processo de floração e foi acumulado pelas raízes de *Arabidopsis*, auxiliando inclusive na expressão de genes em respostas de defesa a estresses. A alguns anos chegou a ser considerado um elemento essencial, pois pesquisadores observaram que a presença de pequenas concentrações de I causavam efeito positivo nas espécies vegetais, mas quando estavam em excesso, apresentavam toxidez para a planta, levando-a inclusive a morte (WENG et al., 2008), esses fatores fazem com que o elemento seja comparado a micronutrientes como B, Cl, Fe e outros, mas pesquisas devem ser desenvolvidas para que seja confirmado que o I é mais que um elemento benéfico (NASCIMENTO et al., 2022). Um trabalho desenvolvido por Medrano-Macías et al (2016), utilizaram o iodo com intuito de biofortificação e para promover crescimento e tolerância à estresse em cultivos. E de modo geral os resultados foram positivos para crescimento e desenvolvimento das culturas e com concentrações maiores a resposta foi variada, em alguns casos o efeito foi negativo, neutro ou positivo, dependendo da espécie.

A biofortificação de culturas agrícolas com o iodo é algo que chama bastante a atenção pois as plantas que são biofortificadas podem ser capazes de aumentar a defesa antioxidante em humanos (HALDIMANN et al., 2005; WINGER et al., 2008; GONZALI et al., 2017). Além disso, considerando que as populações em muitos países apresentam deficiência de I, a biofortificação com o elemento é uma saída (WENG et al., 2013; GONZALI et al., 2017). Considerando que neste estudo, o iodo foi o elemento que apresentou uma das maiores herdabilidades (Tabela 8), e apresentou diferença de concentração em folhas entre genótipos (Tabela 9), mesmo com solo contendo poucas concentrações, e que o café é uma das bebidas mais consumidas no mundo, seria muito viável e interessante realizar este processo de biofortificação de iodo em *C. canephora* e utilizar esta característica em programas de melhoramento, para que maiores quantidades de iodo cheguem aos grãos de café e que as plantas absorvam com mais facilidade o elemento do solo ou por outros meios. Dessa forma, o estudo precisa ter continuidade, incluindo testes com dosagens de iodo em plantios de café.

Tabela 9. Valores médios das concentrações de macro e micronutrientes em folhas de 15 genótipos de *Coffea canephora*, avaliados em Manaus- AM.

Genótipos	Macro e Micronutrientes (mg. Kg ⁻¹)											
	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu
C1	4064.25 a	3979.75 a	4590.5 a	27275. 0a	14884.75 a	8.6525 a	0.2225 a	2.0675 a	110.9725 a	0.365 b	0.9825 a	29.055 b
C2	4955.25 a	2195.25 a	3236.5 a	25097.5 a	10068.0 a	7.755 a	0.2675 a	0.7575 a	65.0125 a	0.2575 b	0.615 a	19.1275 b
C3	4251.75 a	3486.0 a	2861.75 a	29609.75 a	9551.25 a	2021.1125 a	0.1775 a	272.84 a	74.87 a	0.1675b	697.96 a	27.225 b
C4	2826.0 a	2266.0 a	1903.45 a	17331.5 a	9695.25 a	1211.0525 a	0.2325 a	4.1575 a	113.0875 a	12. 0775 a	276.83 a	16.9175 b
C5	3958.0 a	5114.25 a	3235.175 a	24170. 0 a	19200.75 a	908.69 a	0.43 a	0.675 a	115.025 a	0.535 b	0.33 a	25.3775 b
C6	3057.5 a	3248.5 a	2542.05 a	17892.5 a	14530.25 a	1534.485 a	0.175 a	3.46 a	115.5775 a	0.6375 b	619.12 a	3073.055 a
C7	2300.25 a	2152.25 a	1853.5 a	11816.5 a	11388.25 a	1998.58 a	0.26 a	0.5875 a	66.94 a	0.25 b	0.6 a	16.945 b
C8	2206.25 a	2448.5 a	1906.275 a	13414.25 a	12910.75 a	3824.845 a	0.0 a	0.5375 a	78.11 a	0.2675 b	0.2675 a	11.22 b
C9	1511.75 a	1926.5 a	2220.55 a	9273.75 a	13490.0 a	3179.965 a	0.1975 a	0.47 a	94.0575 a	0.3275 b	0.11 a	22.18 b
C10	2866.0 a	2459.75 a	2078.225 a	16155.0 a	12797.0 a	2090.2525 a	0.0 a	291.335 a	112.3025 a	0.355 b	0.4525 a	32.9375 b
C11	2065.75 a	2085.0 a	1123.375 a	13459.0 a	10187.5 a	2449. 7975 a	0.1475 a	0.6875 a	65.815 a	0.24 b	0.4425 a	16.5575 b
C12	2578.25 a	2552.75 a	1655.575 a	14405.5 a	18992.5 a	2275.8275 a	0.3175 a	0.525 a	72.1225 a	0.44 b	0.4475 a	23.75 b
C13	2285. 0 a	2730. 0 a	1216.45 a	13378.5 a	13385.5 a	4234.2025 a	0.29 a	316.295 a	57.1375 a	0.155 b	270.0925 a	14.33 b
C14	2254.0 a	3075.75 a	1477.775 a	12895.0 a	9173.75 a	2128.21 a	0.0675 a	2.0925 a	71.125 a	0.16 b	372.8675 a	16.7375 b
C15	2988.0 a	2652. 0 a	1661.75 a	15602.5 a	10543.5 a	2067.5325 a	0.06 a	277.1425 a	57.2775 a	0.1325 b	276.75 a	1966.915 a

Continuação...

Genótipos	Macro e Micronutrientes (mg. Kg ⁻¹)						
	Zn	Br	Rb	Sr	Y	Hf	I
C1	17.49 a	12.1325 a	22.4025 b	28.775 a	1032.84 a	3.825 b	719.1 a
C2	18.1075 a	20.7525 a	23.6825 b	17.0425 a	10.045 a	3.7575 b	47.1 c
C3	26.7325 a	16.14 a	25.06 b	14.765 a	1505.3325 a	1187.7225 b	198.61 c
C4	14.85 a	9.0125 a	2294.1125 b	17.335 a	811.6775 a	1081.7375 b	48.925 c
C5	2208.5675 a	865.755 a	25.4125 b	52.03 a	1703.4375 a	1373.3025 b	30.56 c
C6	3432.965 a	268.16 a	6438.3225 a	1818.8125 a	2078.39 a	4666.5 a	312.55 b
C7	12.465 a	462.9325 a	5534.25 a	22.49 a	2713.5 a	3959.25 a	356.865 b
C8	1404.15 a	2347.675 a	6102. a	21.3325 a	2221.5 a	1406.075 b	241.37 b
C9	12.3425 a	691.445 a	2958.3375 b	25.525 a	3804. a	2701.5 a	41.95 c
C10	2404.52 a	3016.9325 a	1036.145 b	21.5 a	2616.2725 a	1841.1925 b	24.39 c
C11	2256.3425 a	3.9775 a	5161.865 a	18.1725 a	1920.03 a	3068.22 a	0 c
C12	2111.9375 a	2673.8375 a	5984.2325 a	1823.675 a	2877.5 a	4881.25 a	45.65 c
C13	2092.9225 a	1647.955 a	4673.4725 a	2123.82 a	2829.52 a	3061.25 a	0 c
C14	2158.1825 a	1989.385 a	2870.065 b	17.8625 a	1377.9875 a	2767 a	349.1325 b
C15	3187.7125 a	2032.9025 a	428.185 b	18.9825 a	3014.25 a	2826.2775 a	0 c

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo

Através do método hierárquico UPMGA, utilizando a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade e baseado na concentração de nutrientes nas folhas, os genótipos foram agrupados de acordo com a distância genética entre eles. Ao corte estimado pelo método Mojena (1977), dois grupos distintos foram formados, contudo, em um grupo maior, é possível observar dois subgrupos (Figura 22). O Grupo 1, o qual se apresentou mais distante quando comparado com os demais, é composto pelo genótipo C4 (BRS 2314). O segundo grupo foi o mais populoso, contendo onze genótipos, entretanto, é possível observar que os genótipos C6 (BRS 3220) e o C14 (Clone 9) ficaram um pouco distantes dos demais, dessa forma, este grupo subdividiu-se em dois.

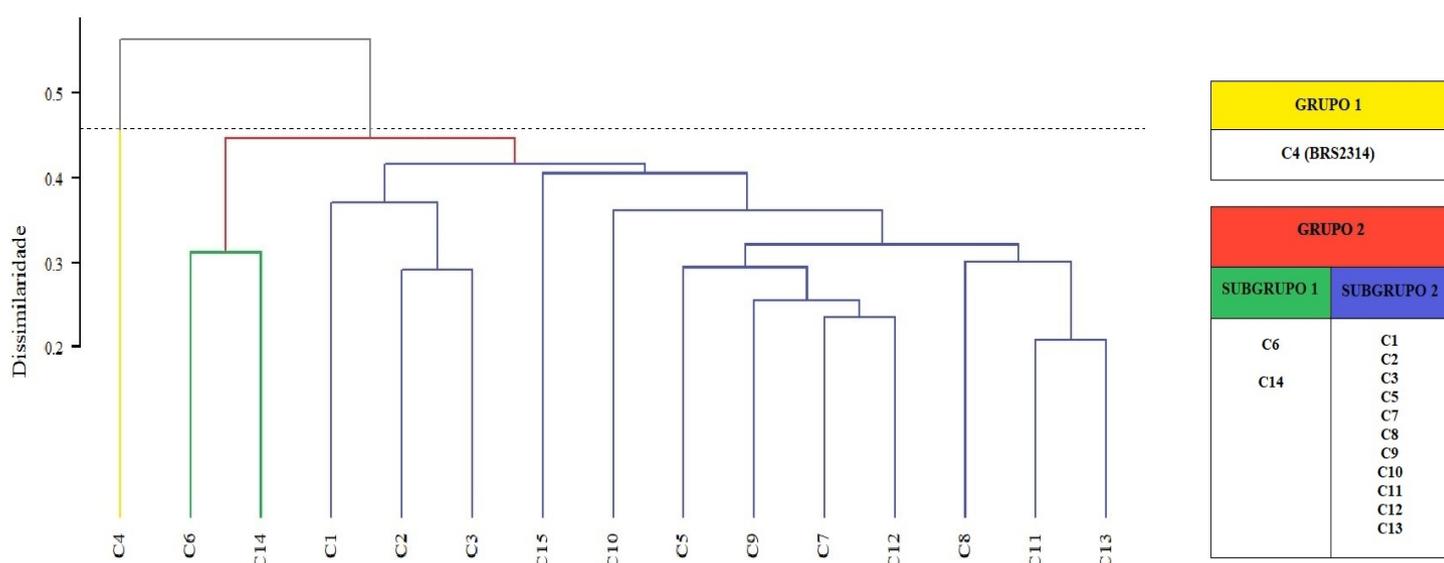


Figura 22. Análise de agrupamento (UPMGA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de elementos químicos presentes nas folhas das plantas. Coeficiente de correlação cofenética: $r = 0,8835$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado pelo método de Mojena (1977).

A formação de grupos pelo dendrograma indica que existe variabilidade genética entre os genótipos avaliados para concentração nutricional em folhas. Trabalhos desenvolvidos por Gomes et al. (2016), Silva et al. (2021), Santos et al. (2021b), Schmidt et al. (2022) e outros, também identificaram diferenças entre os genótipos de *C. canephora* para a concentração de nutrientes. Todos estes estudos, inclusive o presente trabalho, são essenciais para programas de melhoramento, pois são usados com o intuito de se selecionar um material genético superior.

Para determinar a contribuição relativa das concentrações de macro e micronutrientes em folhas para a diversidade genética em genótipos de *C. canephora*, foram utilizados os métodos de Singh (1981) e a distância euclidiana média. Um intervalo

entre 16,35% e 0,43% foi observado. Os elementos Hf, Rb e Co foram os que mais contribuíram com a diversidade genética entre genótipos e os elementos que menos contribuíram foram o P e o Zn (Tabela 10).

Tabela 10. Contribuição relativa dos elementos químicos presentes nas folhas para divergência entre 15 genótipos de *Coffea canephora*, pela estatística (S.j) proposta por Singh (1981).

Elemento	S. j	Contribuição relativa (%)
Hf	593,5935	16,35
Rb	511,4090	14,09
Co	436,6348	12,03
I	290,8561	8,01
Cu	257,7923	7,10
K	239,9152	6,61
Cr	157,8306	4,35
Ca	155,5942	4,29
Fe	139,0252	3,83
Y	130,9612	3,61
Ni	130,4908	3,59
Br	125,1081	3,45
Sr	116,5392	3,21
S	110,4130	3,04
Ti	98,4062	2,71
V	51,8913	1,43
Cl	37,6019	1,04
P	30,4774	0,84
Zn	15,4727	0,43
Total	3630,0100	100,00

Se um grupo consiste em um único genótipo, como é o caso do grupo 1 (Figura 22). De acordo com Martins et al. (2019) e Santin et al. (2019), isto implica dizer que o material genético possui características que o distingue em relação aos demais. Comumente, espera-se alta variabilidade genética para espécies de *C. canephora*, tanto para a cultivar robusta quanto a conilon, devido suas características, logo, a expectativa é de que quanto maior o a população, maior será sua heterogeneidade e maior será a diversidade genética entre grupos (SENRA et al., 2020; SILVA et al., 2020). Com base no método de Singh (1981), os elementos que mais contribuíram com a diversidade genética, foram: Hf (16,35%), Rb (14,09%), Co (12,03%), I (8,01%) e Cu (7,10%). Com exceção de Cu, estes elementos foram os que apresentaram maiores valores de CVg, o que reforça a contribuição genética.

O grupo 2 foi o mais populoso como visto anteriormente. E do ponto de vista dos autores Gomes et al. (2016) e Covre et al. (2018), isto pode ser benéfico até certo ponto, pois para fatores nutricionais, os genótipos que apresentarem afinidade na absorção e concentração de nutrientes bem como no ciclo de maturação dos frutos facilitam o manejo da cultura, especialmente quando se trata de adubação e fertirrigação. Entretanto, quanto mais heterogênea for a população, maior será o número de genótipos que diferem entre si presentes no plantio, e assim, melhores serão as garantias, principalmente no que diz respeito à polinização e estabilidade de produtividade, já que *C. canephora* é uma espécie alógama e auto incompatível, o que reduz significativamente a quantidade de pólen viável durante a fase de floração (CONAGIN e MENDES, 1961; MARTINS et al., 2019; MORAES et al., 2019; SCHMIDT et al., 2022).

No trabalho desenvolvido por Gomes et al. (2016), em que avaliaram a concentração de nutrientes em folhas de café conilon, os genótipos também apresentaram uma divisão em dois grupos.

A representação da relação de similaridade entre as amostras de folhas de genótipos de *C. canephora* a partir de dois eixos foi realizada pela análise de escalonamento multidimensional não-métrico (Figura 23). Juntamente com a análise de PCA, representada no gráfico de dispersão, com as coordenadas explicando 18,87% da variação total observada (Figura 24 e 25), a divisão dos genótipos em dois grupos foi confirmada, sendo o grupo maior subdividido em dois, pois mesmo pertencendo ao mesmo grupo é possível observar uma pequena distância entre os genótipos.

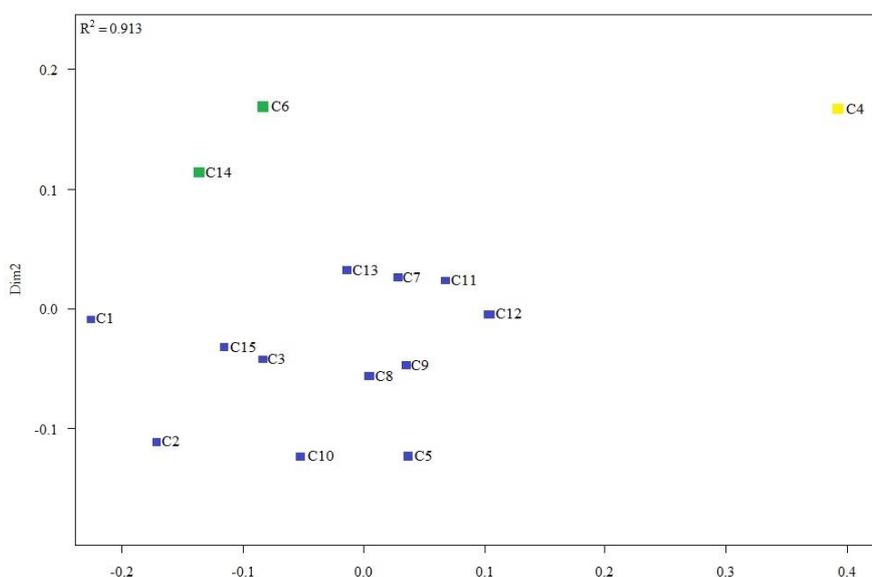


Figura 23. Análise de escalonamento multidimensional não-métrico das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base nas análises das folhas.

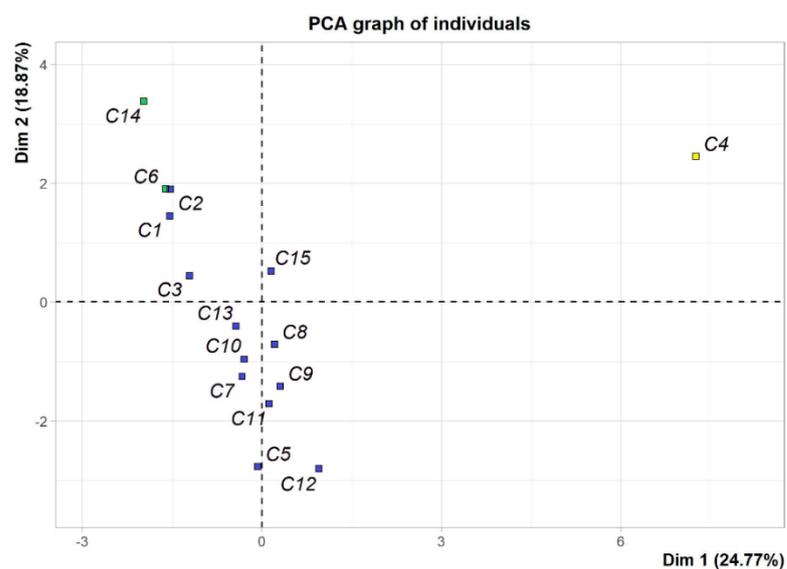


Figura 24. Análise de Componentes Principais (PCA) em folhas de *Coffea canephora*.

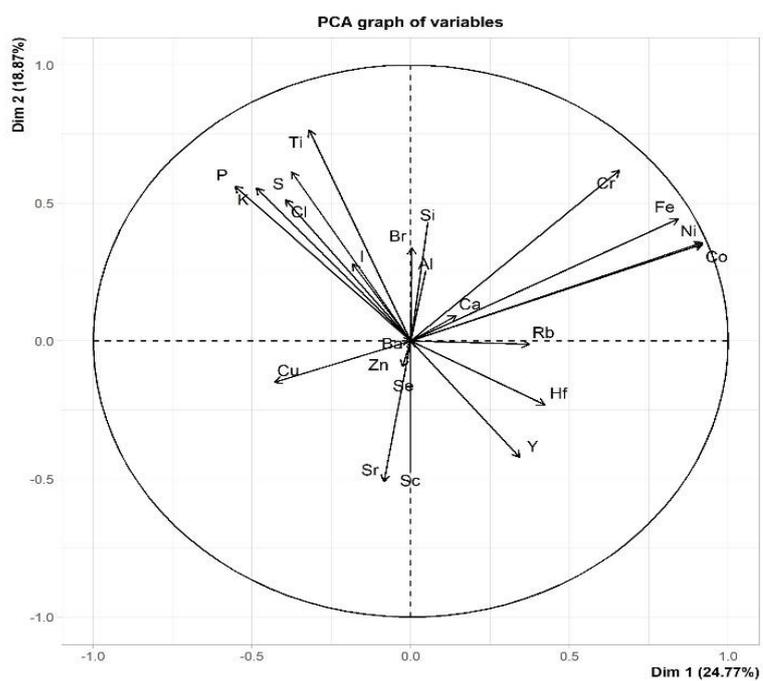


Figura 25. Análise de Componentes Principais (PCA) em folhas de *Coffea canephora*.

5.2.4 Componentes inorgânicos em grãos e cascas crus e torrados de clones de *Coffea canephora*

Quando se trata de comercialização, a qualidade do café é o principal atributo a ser considerado (MARTINEZ et al., 2014). E conforme elucidado por Amorim (1978), esta propriedade depende de inúmeros fatores, dentre eles: composição química do grão, época de colheita, manejo da cultura, ciclo de maturação, armazenamento e processo de torra.

A espécie *C. canephora* apresenta potencial produtivo associado à alta exigência e acumula em seus tecidos, uma grande quantidade de nutrientes (SERRANO et al., 2011; PARTELLI et al., 2014). Como visto anteriormente, a quantidade de nutriente acumulado por cafeeiros pode variar em uma mesma planta de acordo com a localização, época de ano, órgãos e tecidos vegetais (BRAGANÇA et al., 2008), e ciclo de maturação (PARTELLI et al., 2014). Logo, esta variação de composição química dentro de espécies, possibilita com que ganhos genéticos possam ser obtidos mediante melhoramento para qualidade da bebida (MARTINEZ et al., 2014). Para que se obtenha uma bebida de ótima qualidade, é necessário que o grão de café seja completamente desenvolvido, não possua nenhum dano e esteja completamente maduro.

O processo de frutificação do cafeeiro abrange uma série de etapas fisiológicas e modificações morfológicas desde a indução floral até a maturação dos frutos, havendo durante todo este período uma alta demanda de nutrientes (MELO e SOUSA, 2011; PARTELLI et al., 2014; COVRE et al., 2016). Durante o período reprodutivo do cafeeiro e da etapa de desenvolvimento de seus frutos, os grãos são considerados como fortes órgãos-dreno de minerais e carboidratos, pois competem com os outros órgãos das plantas, que também requerem muitos nutrientes durante a fase de crescimento vegetativo, e assim, durante esta competição, a planta acaba apresentando deficiências nutricionais (LAVIOLA et al., 2008; COVRE et al., 2016; DUBBERSTEIN et al., 2016; COVRE et al., 2018). Já na fase seguinte, a maturação do fruto inicia-se com aumento de atividade respiratória após anterior queda no final do período do crescimento, este comportamento se dá pelo fato do fruto do cafeeiro ser do tipo climatério. Esta atividade é conhecida como “climatério respiratório” e perdura por longos dias (TAIZ et al., 2017). Ao final do processo de maturação, os frutos já iniciam a fase de senescência.

Uma nutrição mineral adequada para a cultura deve ser mantida, para que as demandas nutricionais dos grãos e dos demais órgãos vegetais possam ser supridas

(LAVIOLA et al., 2008), assim, a planta será capaz de se desenvolver em sua melhor forma, e será capaz de responder satisfatoriamente a estresses aos quais eventualmente seja submetida (RAMALHO et al., 2013; COVRE et al., 2016). E para esta finalidade, os tecidos e órgãos vegetais de uma planta podem fornecer informações adequadas e suficientes para o seu correto manejo cultural. Os grãos e cascas fornecem dados essenciais para que se tenha conhecimento de quais nutrientes são responsáveis pela produtividade da lavoura (COVRE et al., 2016).

Neste trabalho, para o grão e cascas crus, as maiores concentrações de macro e micronutrientes foram observados na seguinte ordem decrescente: K (8.432,0668 mg kg⁻¹), Ca (1.670,9133 mg kg⁻¹), S (1.255,8933 mg kg⁻¹), P (888,054 mg kg⁻¹), Cl (291,033 mg kg⁻¹) e I (193,362 mg kg⁻¹) (Figuras 10,11, 12 e 13). Com base no método hierárquico UPMGA, tendo a distância Euclidiana como média de dissimilaridade e com base na concentração de teores de nutrientes identificados nos grãos e cascas crus, os genótipos organizaram-se de acordo com a distância genética entre si. Ao corte estimado pelo método Mojena (1977), foi possível identificar a formação de dois grupos, sendo o grupo 1 composto pelo genótipo C14 (Clone), que apresenta ciclo de maturação intermediário. Enquanto o grupo 2 abrange os demais materiais genéticos avaliados, contudo, apesar de ser bastante populoso, é possível observar que os genótipos apresentam um certo distanciamento (Figura 26).

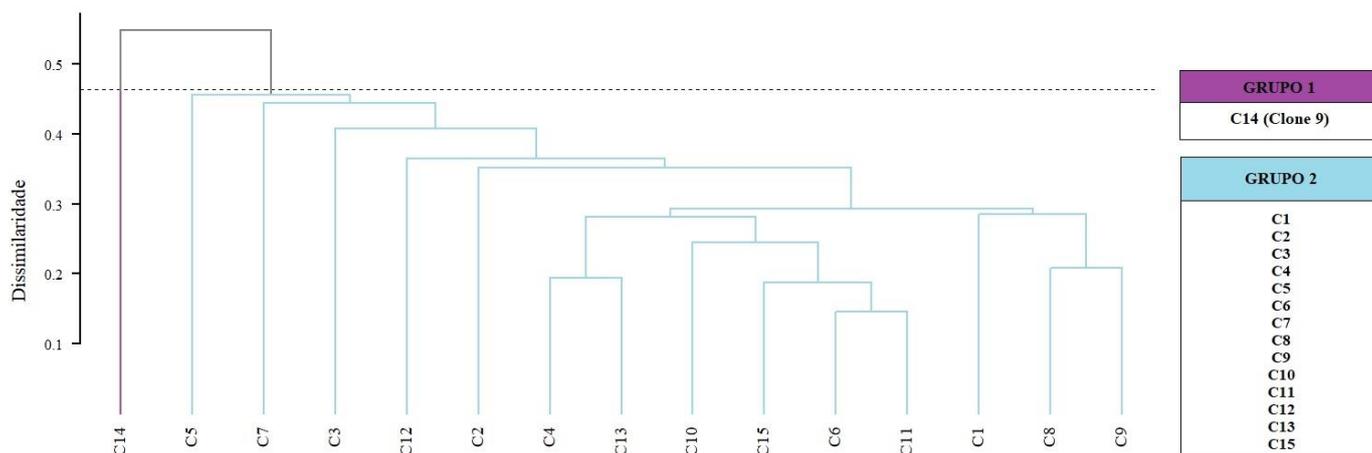


Figura 26. Análise de agrupamento (UPGMA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de elementos químicos presentes nos grãos cru de café. Coeficiente de correlação cofenética: $r = 0,8730$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado pelo método Mojena (1977).

Esses dados obtidos, demonstram que não houve tanta variabilidade genética entre os genótipos estudados para a concentração de teores de macro e micronutrientes em grãos e cascas crus. Como já comentado anteriormente, a presença de um grupo populoso

pode beneficiar o manejo na cultura, devido a afinidade que estes materiais possuem. Contudo, foi possível observar uma maior distância genética para o genótipo C14, o que pode significar que ele possui características que o distingue dos demais, e assim, torna-se um material promissor para programas de melhoramento.

No trabalho desenvolvido por Covre et al. (2016), não foi identificada diferença significativa para o acúmulo de nutrientes em grãos e cascas de *C. canephora*. As maiores concentrações encontradas nesses tecidos e órgãos, foram K, N, Ca, P, Zn e Cu. Neste presente estudos, teores de Zn e Cu também foram identificados, contudo, em baixas concentrações, de 11,3355 mg kg⁻¹ e 8,317867 mg kg⁻¹, respectivamente.

Já a representação da relação de similaridade entre as amostras de grãos e cascas crus de genótipos de *C. canephora*, foi realizada a partir de dois eixos pela análise de escalonamento multidimensional não – métrico (Figura 27). Em conjunto com a análise de componentes principais (PCA), representada no gráfico de dispersão, com as coordenadas explicando 18,12% da variação total observada (Figura 28 e 29), os genótipos dividem-se em dois grupos como observado no dendrograma, entretanto, é possível identificar uma maior dissimilaridade para os genótipos C3, C5 e C7, além do C14 já comentado anteriormente.

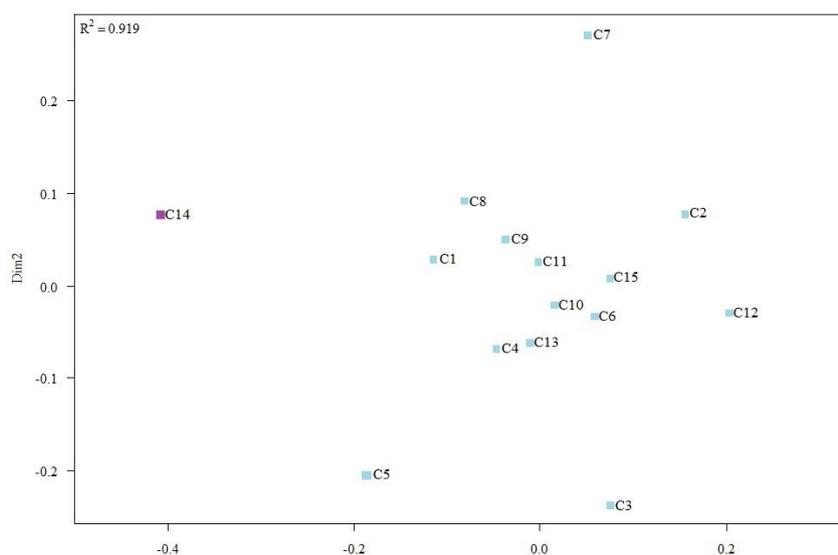


Figura 27. Análise de escalonamento multidimensional não-métrico das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora*, com base nas análises dos grãos cru.

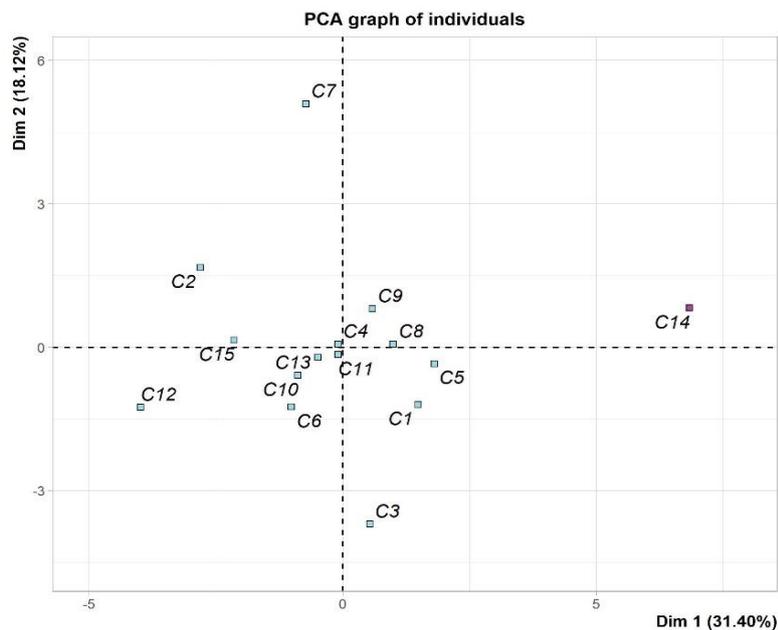


Figura 28. Análise de Componentes Principais (PCA) em grãos e cascas crus de *Coffea canephora*.

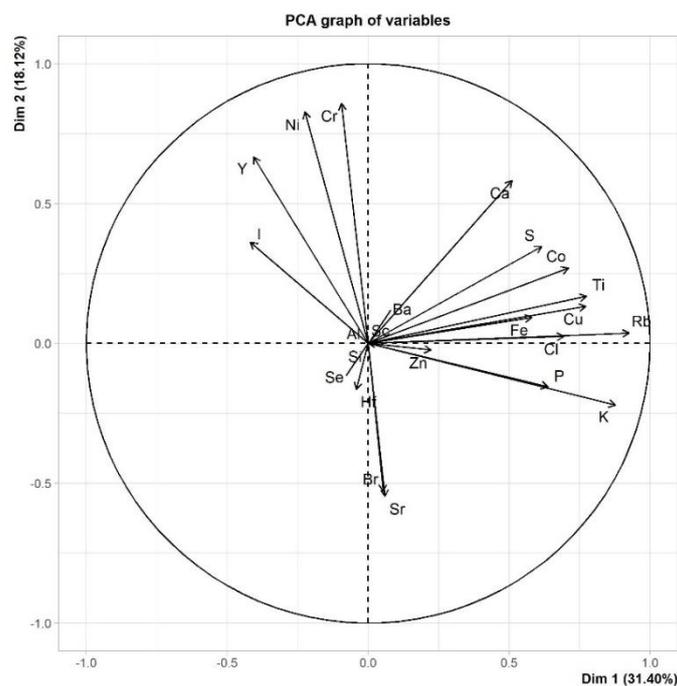


Figura 29. Análise de Componentes Principais (PCA) em grãos e cascas crus de *Coffea canephora*.

A partir das análises de grãos e cascas torrados de clones de *Coffea canephora*, de plantio estabelecido em experimento, foi possível detectar os seguintes elementos com maiores teores: K (12.344,8 mg kg⁻¹), P (7.080,8 mg kg⁻¹), S (6.968,67 mg kg⁻¹), Y (2.130,26 mg kg⁻¹), I (1.131,28 mg kg⁻¹), Ca (1.006,79 mg kg⁻¹), Fe (598,449 mg kg⁻¹),

Sr (527,2 mg kg⁻¹), Hf (520,3 mg kg⁻¹), Ti (437,2 mg kg⁻¹), Cl (210,72 mg kg⁻¹) e Cr (207,03 mg kg⁻¹) conforme apresentados nas figuras 10, 11, 12 e 13.

A análise de agrupamento (UPMGA), tendo como média de dissimilaridade a distância Euclidiana e com base na concentração de teores de nutrientes nos grãos e cascas torrados, os genótipos se organizaram em dois grupos igualmente populosos. Esta divisão deu-se de acordo com a distância genética entre si. Dessa forma, o grupo 1 foi composto por 8 genótipos, dos quais C4 é originado da hibridização entre robusta x conilon, C7 e C11 por sua vez, são oriundos de polinização aberta, contudo, pertencem ao mesmo grupo de compatibilidade, enquanto os demais materiais genéticos são a cultivar conilon BRS ouro preto. Neste grupo observa-se que o C7 (BRS 2336), um material de ciclo de maturação tardio, apresenta uma maior distância dos demais genótipos. Enquanto o segundo grupo abrangeu 7 genótipos, sendo 5 do mesmo grupo de compatibilidade e todos são originados de polinização aberta ou hibridização entre robusta x conilon. Com exceção dos materiais C1 e C9, que possuem ciclo de maturação precoce, os demais são do tipo intermediário. Para este grupo, C9 demonstra uma maior distância genética dos demais (Figura 30).

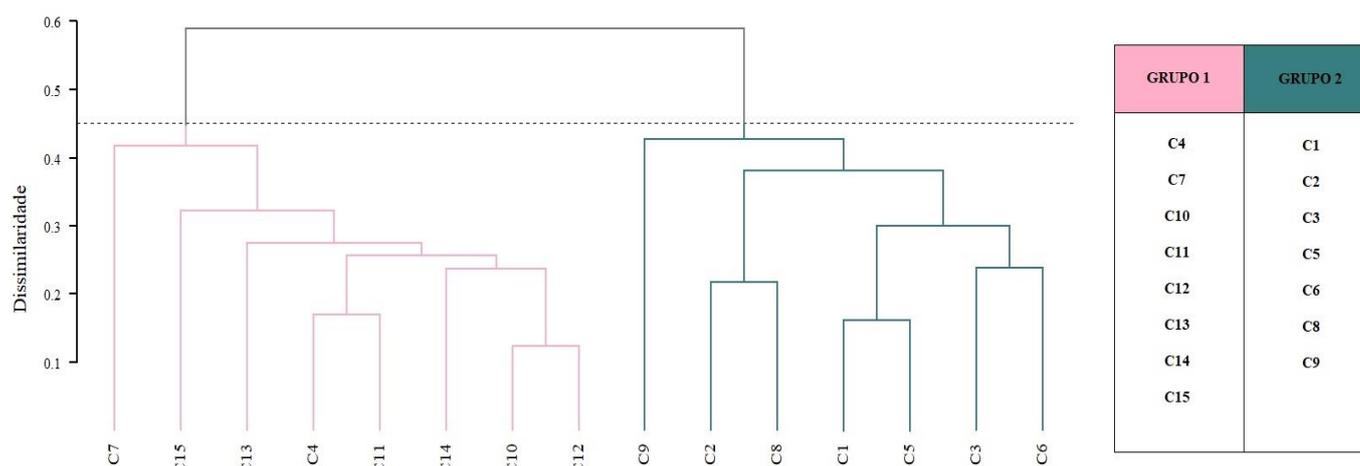


Figura 30. Análise de agrupamento (UPMGA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de elementos químicos presentes nos grãos torrados de café. Coeficiente de correlação cofenética: $r = 0,9126$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado por Mojena (1977).

Pela análise de escalonamento não – métrico e de componentes principais (PCA), representada no gráfico de dispersão, com as coordenadas explicando 12,27% da variação total observada é possível visualizar mais claramente a dissimilaridade dos genótipos C7

e C9 de seus respectivos grupos. Assim como também é possível observar uma maior dispersão entre os materiais do grupo 2 quando comparados ao 1 (Figura 31, 32 e 33).

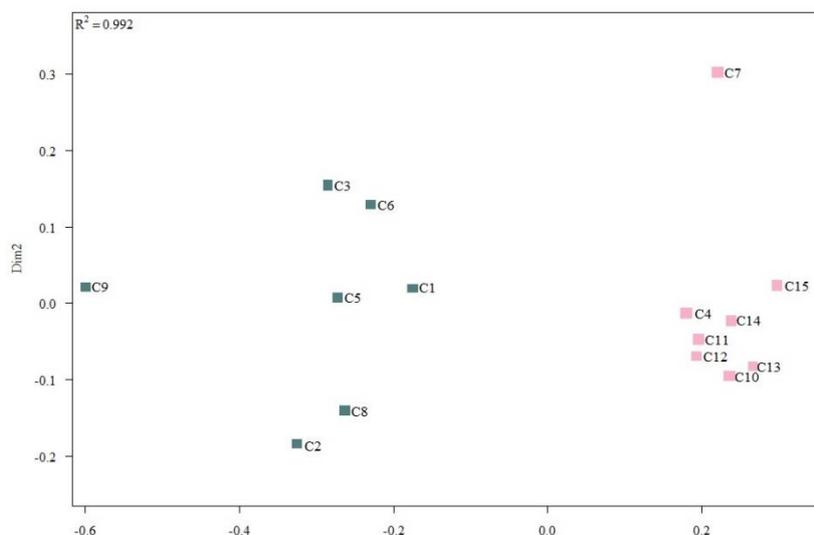


Figura 31. Análise de escalonamento multidimensional não-métrica das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora*, com base nas análises dos grãos e cascas torrados.

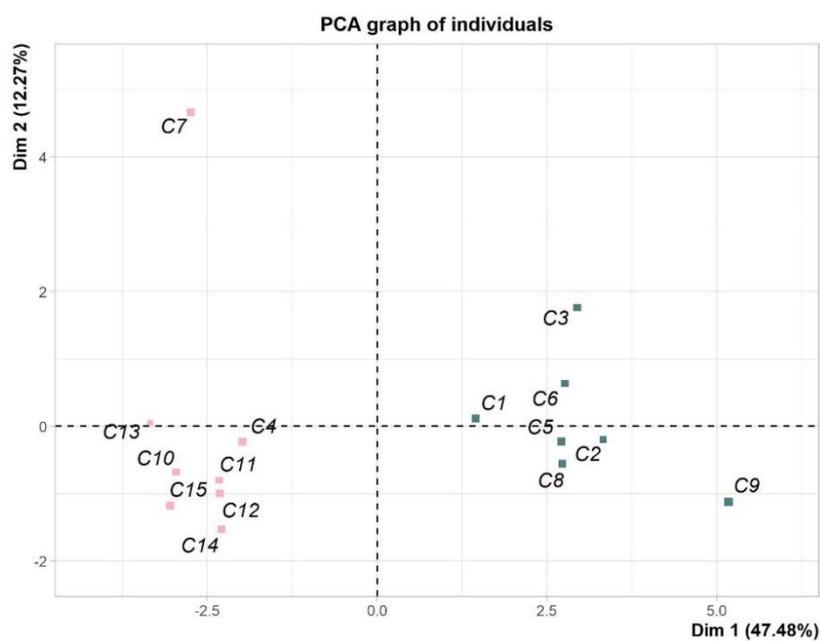


Figura 32. Análise de Componentes Principais (PCA), com base nas amostras de grãos e cascas torradas de *Coffea canephora*.

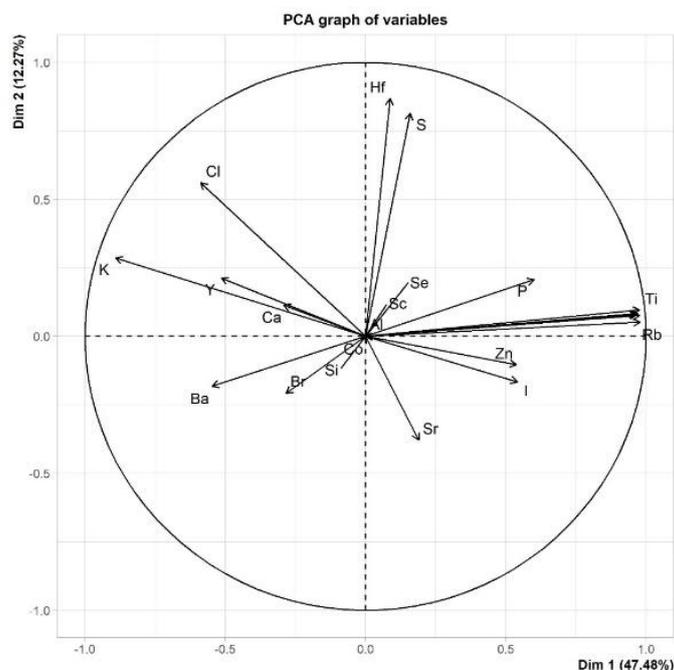


Figura 33. Análise de Componentes Principais (PCA), com base nas amostras de grãos e cascas torradas de *Coffea canephora*.

Ao realizar-se a comparação entre grãos e cascas crus com os torrados, observa-se que as maiores concentrações se mantêm para os mesmos elementos, contudo, há um aumento nos teores de K, P, S e I, o qual, é bastante significativo. Já para os elementos: Ca e Cl, há uma pequena redução quanto à sua concentração nesses órgãos e tecidos vegetais. Nos grãos e cascas torrados, é possível observar teores relativamente altos de Fe, Sr, Hf, Ti e Cr, os quais também estão presentes nos grãos e cascas crus, contudo, em concentrações baixíssimas, estando a maioria abaixo de 10 mg kg^{-1} . Isto pode dever-se ao fato de que o processo de torra compreende algumas etapas que irão alterar o grão e sua composição química. Na primeira etapa, conhecida como secagem, de acordo com Martinez et al. (2014), haverá perda de massa pela liberação de água e outras substâncias voláteis, o grão sofre uma alteração de cor. Já na pirólise, que constitui a segunda etapa deste processo, o grão sofrerá as principais mudanças em suas propriedades físicas e químicas pois ocorre uma alta liberação de água, substâncias voláteis e CO_2 . Por fim, o grão adquire uma cor marrom e necessita ser resfriado para que não haja carbonização, sendo esta então, a última etapa. Este processo pode então ser o responsável por essa diferença observada entre os grãos e cascas crus em comparação aos torrados.

Levando em consideração que os principais nutrientes encontrados com maiores teores são basicamente os mesmos, é interessante entender o seu papel nesses órgãos e

tecidos avaliados em questão. Assim, de acordo com Bragança et al. 2010, o potássio exerce papel fundamental na formação dos frutos, principalmente na etapa de enchimento de grãos, pois é onde ocorre em maior intensidade a síntese de amido, desempenhando papel na ativação de enzimas nas células. E como observado neste presente estudo, as maiores concentrações encontradas pertencem a ele tanto para grãos e cascas crus quanto os torrados. Em um trabalho desenvolvido por Oliosi et al. (2020), um alto requerimento de K em grãos e cascas também foi evidenciado assim como em outras pesquisas desenvolvidas ao se avaliar genótipos de *C. canephora*, como o estudo executado por Covre et al. (2016), em que considerando todo o fruto (grãos e casca), K também ficou como um dos principais elementos acumulados e requeridos.

Schmidt et al. (2022) observaram efeitos dos genótipos nas concentrações de K e Ca, indicando uma maior demanda no período de enchimento de grãos. De acordo com Bragança et al. (2010), o cálcio é considerado o segundo nutriente mais acumulado em plantas de *C. canephora*, sendo extremamente importante por atender as demandas na fase fenológica de formação dos frutos, abrangendo seu crescimento e expansão. Este elemento compõe estruturalmente compostos como pectato, fosfato e outros, sendo essencial para as paredes celulares dos tecidos vegetais, pois atua no funcionamento das membranas, transporte de auxinas, abscisão e senescência, dentre outros (LI et al., 2009; TORRES et al., 2021). O pectato de cálcio é essencial para a resistência das plantas a infecções fúngicas e bacterianas, além disso, contribui com o processo de maturação dos frutos (MARTINEZ et al., 2014). De acordo com Marschner et al. (2012), muitos microrganismos fúngicos invadem o apoplasto e liberam enzimas que degradam a lamela média, contudo, são inibidos pelo cálcio. Este nutriente ainda, quando encontrado em maiores concentrações nos frutos é capaz de prevenir ou reduzir perdas econômicas que são causadas por doenças pós-colheita.

O Ca é absorvido inicialmente pelas raízes, contudo, a sua redistribuição na planta é relativamente reduzida devido a sua mobilidade (BRAGANÇA et al., 2008), entretanto, os tecidos foliares possuem uma maior superfície de exposição e o nutriente é então transportado preferencial para esses órgãos em detrimento dos frutos (TORRES et al., 2021). No trabalho desenvolvido por Schmidt et al. (2022), o cálcio foi o quarto elemento com maior concentração nos frutos, quando comparado com outros macronutrientes. Como já visto anteriormente, é um elemento essencial e é requerido em altas quantidades durante a formação do fruto (DUBBERSTEIN et al., 2016, STARLING et al., 2018). Santos et al. (2021b), também identificaram o cálcio como um dos nutrientes mais

concentrados nos grãos de *C. canephora*, assim como nos trabalhos desenvolvidos por Partelli et al. (2014), Covre et al. (2016), Dubberstein et al. (2016) e Torres et al. (2021). Os autores observaram também diversidade genética entre os genótipos de conilon e robusta avaliados. Essas informações corroboram com o presente estudo, já que nos grãos e cascas crus, este elemento foi o segundo com maior concentração nos frutos, enquanto nos grãos e cascas torrados, foi o sexto. Tal fato indica que o elemento é de extrema importância para o desenvolvimento dos frutos e selecionar um material que apresente maior capacidade de absorção e translocação deste nutriente é essencial para programas de melhoramento do cafeeiro.

O S e o P são nutrientes encontrados em altas concentrações nos grãos e cascas crus e torrados. No trabalho desenvolvido por Schmidt et al. (2022), para a concentração de P nos frutos de café robusta não houve influência dos genótipos, já para o S, houve a formação de três grupos, indicando diversidade genética. Mas ainda foram os dois elementos encontrados em maiores concentrações nos frutos dos genótipos avaliados. Na pesquisa desenvolvida por Covre et al. (2016), estes dois elementos foram o quarto e quinto mais acumulados em frutos de café conilon, só ficaram atrás de N, K e Ca. Nesta pesquisa avaliou-se genótipos as áreas com e sem irrigação, e as plantas irrigadas apresentaram maior acúmulo de elementos. Dubberstein et al. (2016), observaram que o acúmulo de fósforo apresentou uma forma sigmoide e no início da formação do fruto, no estágio da cabeça, não houve acúmulo significativo, contudo, foi aumentando gradativamente até a última avaliação. As maiores concentrações foram observadas nas fases de expansão, formação do grão e maturação do fruto, confirmando a necessidade deste elemento para este período. Resultados semelhantes foram obtidos por Laviola et al. (2008) em frutos de café arábica e por Partelli et al. (2014) em frutos de café conilon.

Quanto ao acúmulo de enxofre, suas curvas de acúmulo se comportaram de modo diferente dos demais elementos, sendo que o acúmulo dobrou nas últimas avaliações e comportamentos semelhantes também foram obtidos por Laviola et al. (2007) em café arábica e por Partelli et al. (2014) em café conilon. Para este estudo, corroboram-se as informações acerca da importância destes nutrientes para a produção de frutos de *C. canephora*, contudo, seria necessário mais estudo, realizando a coleta em outras fases para compreender melhor o comportamento dos elementos até porque nos genótipos estudados, as concentrações de ambos aumentaram significativamente nos grãos e cascas torrados, comportando-se assim, de modo semelhante ao que foi relatado acima. O fósforo é um macronutriente e é essencial para o crescimento das plantas, garante inclusive o

desenvolvimento sustentável de uma produção agrícola, pois desempenha papel importante na regulação da qualidade dos frutos (EL MAZLOUZI et al., 2020). Assim como o enxofre também é um macronutriente essencial para o crescimento, desenvolvimento das plantas bem como auxilia na desintoxicação de metais pesados, como o chumbo (TAKASHI et al., 2011). Assim, são elementos que contribuem para a produção agrícola e devem ser levados em consideração em programas de melhoramento que visem um plantio mais produtivo, bem como mais resistente a pragas e doenças e à ambientes que apresentem contaminação por metais pesados ou elementos de terra rara.

Quanto ao I e o Cl, não existem muitos dados na literatura que tratem da presença desses elementos em frutos de cafeeiro. De acordo com Malavolta et al. (1997), o cloro desempenha alguns papéis no metabolismo da planta, atuando na fotossíntese, como um ativador enzimático, na osmoregulação e até mesmo aumentando a resistência contra doenças, por isso, é considerado um elemento essencial para as plantas. Contudo, pequenas concentrações são requeridas pelas plantas, não mais que 100 g kg^{-1} de matéria seca, e devido a isso, se encaixa como micronutriente. Entretanto, de acordo com KROHLING et al. (2015), os tecidos vegetais acumulam de 20 a 200 vezes mais, podendo causar ou não toxidez às plantas. Neste presente trabalho, os teores de cloro estavam bem abaixo de 100 g kg^{-1} , dessa forma, o risco de toxidez pode ser descartado e os benefícios do elemento podem ser levados em consideração.

O iodo é um elemento considerado benéfico para a planta pois atua em seu metabolismo, entretanto, faltam estudos para caracterizá-lo como um elemento essencial. Já para os humanos e animais é um nutriente essencial, dessa forma, estudos realizando a biofortificação de plantas com iodo vêm sendo realizados. Como por exemplo, os trabalhos realizados por Smolen et al. (2014), em que um cultivo de alface foi biofortificado com iodo e selênio e foram observados resultados positivos. Izydorczyk et al. (2020) avaliaram a biofortificação com iodo e selênio de espécies comestíveis, e resultados satisfatórios também foram obtidos. Para cafeeiros, um trabalho com a biofortificação de selênio em café arábica, foi realizado por Mateus et al. (2021), a pesquisa demonstrou que a aplicação de selênio aumentou o metabolismo antioxidante dos cafeeiros, houve melhora na formação de pigmentos fotossintéticos nas folhas das plantas de café e uma maior produtividade. Assim, estudos de biofortificação em *C. canephora* são interessantes e viáveis de serem realizados já que a biofortificação de culturas pode auxiliar na ingestão de nutrientes em humanos e como se sabe, as

populações apresentam de deficiência de iodo em vários países, e assim desencadeiam problemas como os da tireoide.

O Fe apresentou baixo teor em grãos e cascas crus, contudo, nas amostras torradas, o elemento foi identificado em maiores concentrações. De acordo com os trabalhos desenvolvidos por Marré et al. (2015), Covre et al. (2016), Oliosí et al. (2017), Dubberstein et al. (2019), Bazoni et al. (2020) e Santos et al. (2021b), alto acúmulo de Fe foi observado em frutos de cafeeiro. E na pesquisa realizada por Schmidt et al. (2022), não houve diferença significativa para o acúmulo de Fe, no caso, os genótipos não influenciaram na absorção ou acúmulo. De acordo com Bragança et al. (2008), o ferro é um dos elementos mais absorvidos e acumulados por café conilon, e cerca de 80% se acumulam em cloroplastos que possuem função vital na fotossíntese e produção de clorofila. Alguns autores, observaram um menor teor do elemento no ciclo final da cultura (CROVE et al., 2018), o que foi observado neste presente estudo, uma vez que suas concentrações reduziram ao chegar nos frutos. Conforme discutido por Oliosí et al. (2020), as maiores concentrações de Fe estão nos tecidos foliares dos cafeeiros. Mas nessa pesquisa, o maior acúmulo foi identificado no sistema radicular dos clones avaliados.

Por fim, teores elevados dos elementos Y, Sr, Hf, Ti e Cr, foram observados apenas nos grãos e cascas torradas. O Y é considerado um elemento de terra rara como já comentado anteriormente, juntamente com os outros elementos da série dos lantanídeos, possui muitas aplicações mas voltadas para a tecnologia de ponta. Não existem dados na literatura que delimitem valores de referência para o acúmulo de Y em tecidos e órgãos vegetais, entretanto, pesquisas que demonstram o efeito benéfico, tóxico ou nulo do elemento em plantas vêm sendo realizadas, de modo que foi observado que houve influência do elemento no crescimento e produtividade de plantio avaliado (ZENG et al., 2006; HU et al., 2004). Maksimovic et al. (2014), realizaram um estudo com plantas de milho e evidenciaram que o Y afetou negativamente o crescimento dos vegetais, e foi observado um maior acúmulo do nutriente no sistema radicular quando comparado com outros órgãos e tecidos da planta. Neste presente estudo foi observado um comportamento diferente, em que o elemento teve maior acúmulo nos tecidos foliares e grãos e cascas torradas dos genótipos de *C. canephora* estudados. Como este elemento possui diversas aplicações na indústria, em energia nuclear e outras finalidades (DEQIAN, 2017), O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), vem estudando sobre estes elementos a fim de desenvolver a cadeia de produção de elementos de terra-rara no Brasil (JHA et al., 2016; HIDAYAH e ABIDIN 2018; FERREIRA et al., 2021). Mas estes altos teores acumulados

nos grãos de *C. canephora*, devem ser analisados, já que o elemento pode causar toxidez e como se trata de um grão do qual se origina uma das bebidas mais consumidas no mundo, deve-se investigar a sua relação com a planta e de que forma pode afetar o ser humano ao consumir este produto.

Os elementos Ti e Cr, são considerados elementos traços que apresentam interesse ambiental. De modo geral, são elementos necessários em pequenas quantidades para que a função fisiológica normal ocorra, fazem parte de componentes de enzimas, e outros. Sendo assim, muito importantes também para a saúde humana (STRACHAN, 2010). Estes elementos também podem apresentar benefícios para as plantas, contudo, mais estudos precisam ser desenvolvidos (SWAINE, 2000). Estudos demonstram que o titânio pode auxiliar no aumento de teores de alguns elementos essenciais. Pois foi observado que seus quelatos auxiliam no desenvolvimento de plantas jovens e podem agir como catalisadores enzimáticos (BOTIA et al., 2002; BACILIERI et al., 2017). Além disso, Ti foi identificado na composição mineral de todos os grupos de plantas (EL-GHONEMY et al., 1977; GUHA e MITCHELL, 1965; BACILIERI et al., 2017). Dessa forma, é natural que concentrações do elemento fossem identificados no presente trabalho, mas devido ao teor ser relativamente alto, é recomendado que mais análises sejam realizadas para se compreender o papel do Ti em plantas de *C. canephora*, assim como de que forma o elemento atua no organismo dos seres humanos.

Assim como o titânio, o Cr é considerado um elemento essencial para a nutrição animal e humana. E apesar de ser um estimulante para o crescimento de plantas, vários estudos evidenciam o potencial tóxico para vegetais (SAMANTARAY et al., 1998). Ele é considerado o sétimo metal mais abundante na crosta terrestre e um importante contaminante ambiental liberado na atmosfera devido a sua aplicabilidade industrial (PANDA e CHOUDHURY, 2005). Altas concentrações deste elemento pode causar distúrbios no cloroplasto e afetar diretamente a fotossíntese. Assim como também pode afetar o metabolismo antioxidante das plantas, o que pode gerar o estresse na planta, conforme apresentado por Panda e Choudhury (2005) e Shanker et al. (2005). Para este trabalho, o maior acúmulo de cromo foi identificado em grãos e cascas torrados, o que pode ter sido ocasionado pelo processo de secagem dos grãos, alguma influência de gases no ambiente em que foi torrado, ou do equipamento. Desse modo, deve-se avaliar como um todo a influência do elemento na planta, e se o mesmo, causou benefícios para a planta, estando em baixas concentrações. Bem, como realizar novos experimentos com

processo de secagem diferente para confirmar se o teor identificado é de absorção da própria planta ou de fatores externos.

Já o Sr, é um metal alcalino-terroso natural e de ocorrência comum (GUPTA et al., 2018). O interesse pelo elemento tem crescido a partir de um medicamento feito a base do nutriente, que mostrou resultados satisfatórios na redução de incidência de fraturas em pacientes que apresentem osteoporose (GRYNPAS et al., 1996; REGINSTER et al., 2002; MEUNIER et al., 2004). Uma vez que o metal é absorvido pela planta, ele pode acumular em tecidos foliares, enquanto nas sementes e frutos a concentração normalmente é baixa (ASGARI e CORNELIS, 2015), as raízes também apresentam menor acúmulo do nutriente em comparação à parte aérea (WANG et al., 2017). Um trabalho desenvolvido por Willey (2014), demonstrou que os maiores teores de Sr estavam localizados na parte aérea, e que este comportamento deve ocorrer devido a maior atividade de fluxo de nutrientes nos tecidos foliares.

As informações obtidas corroboram em parte com os dados obtidos nesta pesquisa, uma vez que a concentração de Sr também foi maior em folhas comparado com raízes, contudo, o maior acúmulo foi evidenciado em grãos e cascas torrados. Acredita-se que pode ser influenciado também pelo processo de torra, assim como foi comentado para o Cr, afinal, esta etapa de secagem de grãos causa muitas mudanças químicas e físicas na constituição dos frutos, com perda de água, interação indireta com outros elementos, dentre outros. Alguns estudos realizados a anos atrás identificaram uma correlação positiva entre Sr e a produção da cultura (RICKARD e PRICE, 1990; PAASIKALLIO et al., 1994), mas com o avanço da tecnologia, deve-se realizar mais estudos sobre a influência do elemento nas plantas, especialmente o comportamento observado nos genótipos de *C. canephora*, pois como se trata de um produto comercializado, os frutos devem passar por mais testes e repetições.

Por fim, o Hf, que apresentou certo acúmulo nos grãos e cascas torrados, mas não se tem dados na literatura da ocorrência deste elemento em cafeeiros. E como já citado anteriormente, conhecimento sobre sua biogeoquímica é bastante escasso, e os dados disponíveis na literatura fazem mais menção à sua ocorrência em solos (SHTANGEEVA, 2021). Desse modo, deve-se realizar mais pesquisas que possam abranger a dinâmica deste elemento em frutos de *C. canephora*, se auxiliam na formação dos grãos, se são transportados desde a raiz ou se a absorção foliar é maior em detrimento dos frutos.

Diante do que foi apresentado, é possível afirmar que materiais genéticos podem ser selecionados em função do acúmulo de nutrientes em frutos, no caso, dos que

genótipos que foram capazes de exportar os nutrientes principais para os frutos em maiores quantidades, assim como, aqueles clones que tiveram mecanismos de defesa para evitar toxidez por elementos traços e de terra rara. Além disso, essas informações contribuem para que a adubação mineral possa ser realizada em função do acúmulo desses elementos nos frutos, uma vez que se sabe qual a maior exigência da planta na fase de produção e maturação de grãos. Deve-se atentar ainda para o comportamento de cada elemento, individualmente, pois conforme o gráfico de análise de componentes principais, houve maior influência de alguns comparados a outros (Figura 29 e Figura 33). Principalmente pelo fato de que os nutrientes influenciam direta e indiretamente a qualidade final do café através do seu papel no metabolismo da planta e acúmulo de nutrientes favoráveis para aroma e sabor da bebida.

5.3 Correlação entre concentrações de nutrientes de folhas, grãos e cascas crus e torrados.

Utilizando o coeficiente de correlação de Pearson para concentrações de macro e micronutrientes em folhas e grãos crus e torrados de 15 genótipos, um total de 113 correlações significativas a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t foram detectadas, sendo que 88 foram positivas e 25 foram negativas. Conforme observado na figura 34, correlações positivas e significativas foram confirmadas para as relações entre elementos para cada tecido vegetal analisado. Neste caso, para relação Folhas, observou correlação positiva entre P x S (0,6508), P x Cl (0,6561), P x K (0,587), P x Ti (0,5355), S x Ti (0,5931), Cl x Ti (0,5516), Cr x Fe (0,8344), Cr x Co (0,8124), Cr x Ni (0,8189), Fe x Co (0,9637), Fe x Ni (0,964), Co x Ni (0,999), Rb x Hf (0,6729) e Y x Hf (0,6451). Para Grãos e cascas crus, foi evidenciado correlação entre P x S (0,7197), P x K (0,5189), P x Rb (0,5796), S x K (0,5182), S x Cu (0,539), S x Rb (0,6671), Cl x K (0,5725), Cl x Ti (0,719), Cl x Cu (0,5991), Cl x Rb (0,6273), K x Ti (0,5813), K x Cu (0,7629), K x Rb (0,9186), Ti x Co (0,8018), Ti x Rb (0,6395), Cr x Ni (0,9127), Cr x Y (0,5391), Co x Rb (0,5936), Zn x Hf (0,6551), Ni x Y (0,6393), Fe x Co (0,7542), Fe x Zn (0,7173), Cu x Rb (0,8299) e Br x Sr (0,9808). Para Grãos e cascas torrados, observou-se P x S (0,5903), P x Ti (0,5254), P x Ni (0,5464), P x Cu (0,6616), S x Hf (0,6629), Cl x K (0,7823), Cl x Ca (0,5164), K x Y (0,564), Ti x Cr (0,9855), Ti x Fe (0,9959), Ti x Ni (0,9803), Ti x Cu (0,9567), Ti x Rb (0,9971), Cr x Fe (0,9891), Cr x Ni (0,9677), Cr x Cu (0,9488), Cr x

Rb (0,9862), Cr x I (0,9862), Fe x Ti (0,9881), Fe x Cu (0,9637), Fe x Rb (0,9929), Fe x I (0,5221), Ni x Cu (0,9771), Ni x Rb (0,9725), Cu x Rb (0,9571), Zn x Rb (0,5126), Zn x I (0,8929) e Rb x I (0,5279) (Figura 34).

Já para as variáveis Folhas x Grãos e cascas crus, observou-se correlação positiva para os elementos S x Cl (0,7395), S x K (0,5572), S x Ti (0,7197), S x Co (0,5122), S x Rb (0,5932), K x K (0,6332), K x Rb (0,5866), Br x I (0,6629) e Sr x Zn (0,6575). Para Folhas x Grãos e cascas torrados: Br x Zn (0,6643), Br x I (0,6635). Já entre Grãos e cascas crus e torrados, os elementos apresentaram correlação positiva para Cr x Cl (0,7367), Cr x K (0,606), Cr x Hf (0,8092), Ni x S (0,5402), Ni x Cl (0,6175), Ni x Hf (0,8695), Sr x P (0,5256), Y x Zn (0,5291), Y x Hf (0,6319), Y x I (0,5712) e I x I (0,5155) (Figura 34). As correlações positivas significativas mostram que quanto maior o valor desses elementos maior foi o valor da característica correlacionada. E para a relação dos frutos com outras partes da planta, uma forte correlação positiva foi observada para K, S, Cl, Ti, Rb, Br, I e Zn. No trabalho desenvolvido por Schmidt et al. (2022), foram identificadas correlações positivas para P, K, Ca e Mn quando relacionado os grãos com outras partes de *C. canephora*. Para as folhas, correlações positivas foram encontradas apenas para K e Fe. Neste trabalho, observou-se para P, S, K, Cl, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Hf, Y e Rb.

Correlações negativas significativas também foram evidenciadas entre elementos para Grãos e cascas crus: K x I (-0,5381). Grãos e cascas torrados: Cl x Ni (-0,516), Cl x Cu (-0,5252), K x Ti (-0,8425), K x Cr (-0,7984), K x Fe (-0,8274), K x Ni (-0,822), K x Cu (-0,8096), K x Rb (-0,8512), Ti x Ba (-0,5504), Cr x Ba (-0,5278), Fe x Ba (-0,5262) e Ni x Ba (-0,5192). Folhas x Grãos e cascas crus: Ca x Fe (-0,5166), Ca x Co (-0,5738) e Y x Br (-5281). Folhas x Grãos e cascas torrados: Ti x Y (-0,6256), Cu x I (-0,5732), Hf x Ti (-0,5238), Hf x Cr (-0,6087), Hf x Fe (-0,5345), Hf x Rb (-0,5409), I x Ca (-0,6297), S x Y (-0,5855). Grãos e cascas crus x Grãos e cascas torrados: Px Y (-0,5728). Estas correlações mostram que quanto maior foi o valor desses elementos menor foi o valor da característica correlacionada.

Os resultados obtidos indicam que as concentrações de elementos traços e elementos de terra rara acumulados nos tecidos das plantas influenciam no acúmulo de outros elementos essenciais para o desenvolvimento e crescimento vegetal. Dessa forma, análises de flores, e em períodos diferentes podem fornecer dados ainda mais concretos da real influência desses nutrientes na absorção e eficiência de uso de outros elementos essenciais para a planta. Especialmente devido a ocorrência de metais em órgãos vegetais

de *C. canephora*, dos quais, ainda existe muita escassez de informação sobre seus efeitos benéficos ou maléficos.

As correlações significativas positivas estão destacadas em azul e as negativas estão em vermelho, conforme é possível observar na figura 34.

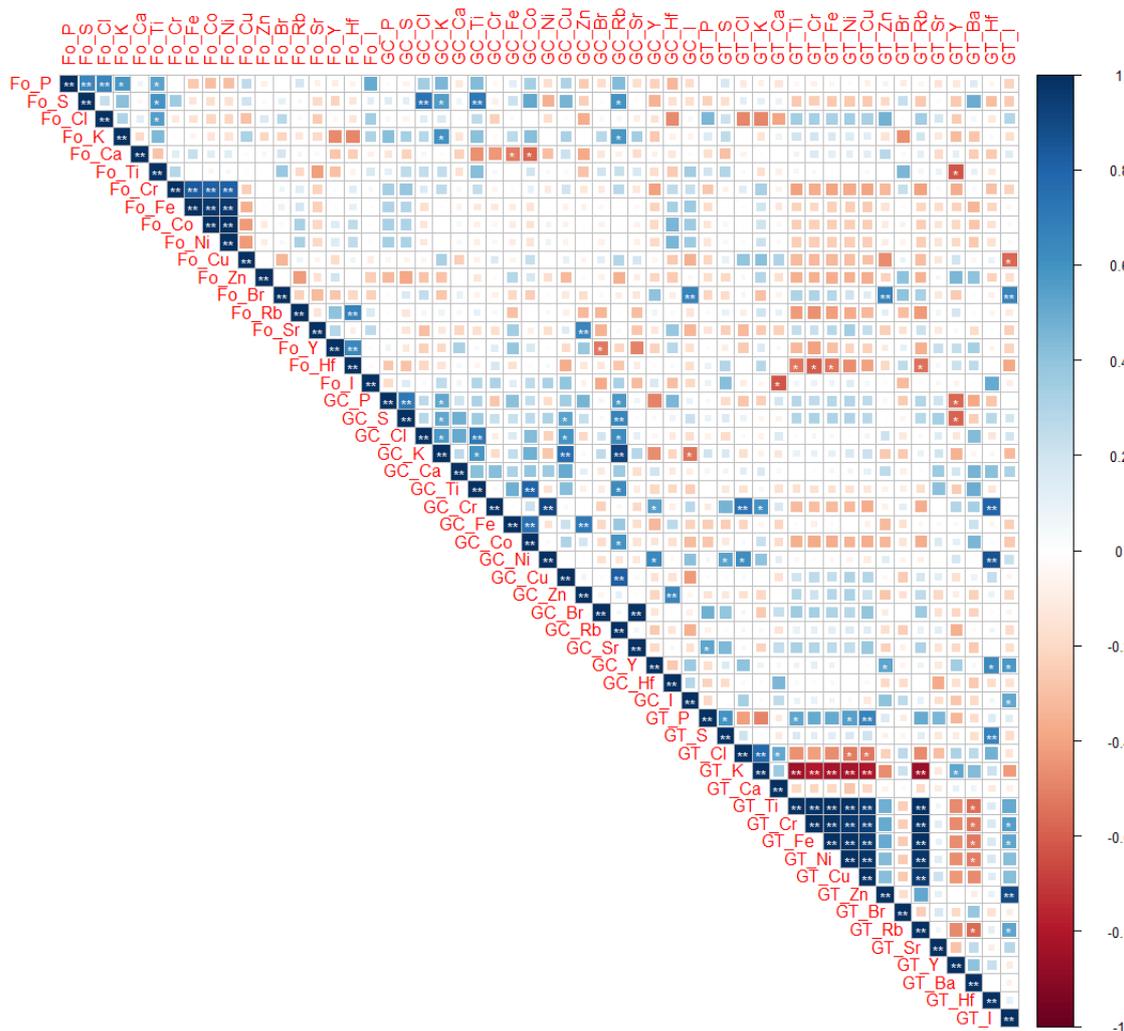


Figura 34. Correlação de Pearson entre componentes inorgânicos para folhas e grãos e cascas crus e torrado de 15 genótipos de *C. canephora*

No trabalho desenvolvido por Schmidt et al. (2022), correlações positivas para todos os nutrientes, foram observadas entre as amostras de folhas e entre os outros órgãos vegetais. Correlações positivas e negativas entre amostras de folhas também foram evidenciadas por Lana et al. (2010). Em uma pesquisa desenvolvida por Santos et al. (2021b), também foi observado correlação significativa entre as concentrações de nutrientes em folhas e outros órgãos das plantas, sendo a maioria positiva como ocorreu neste presente estudo. Estes autores recomendam que nutrientes antagônicos à adubação

devem ser levados em consideração e deve-se atentar a uma oferta adequada de nutrientes para as fases fenológicas das plantas. Este presente trabalho fornece dados para que as melhores condições nutricionais sejam fornecidas para esses genótipos avaliados, para que assim, a adaptabilidade dos clones na região de Manaus possa ocorrer com sucesso.

5.4 Componentes de massa seca de *Coffea canephora*.

Com o avanço da tecnologia e a busca por cultivos econômica e ecologicamente sustentáveis, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas a fim de se ter uma melhor eficiência nutricional, e tem se buscado resultados por meio da seleção de genótipos superiores e de outros métodos de melhoramento, pelo fato de que os materiais genéticos apresentam diferenças quanto a capacidade de absorção, acúmulo e uso de nutrientes, bem como a translocação do elemento dentro da planta (DAMATO NETO et al., 2014). E esta diferença de absorção, translocação e acúmulo de nutrientes está associado à capacidade do genótipo de utilizar os nutrientes para produção de biomassa (DAMATO NETO, 2014). E a síntese de biomassa é considerada uma característica relevante durante a avaliação do desenvolvimento de uma planta, auxiliando com os dados de crescimento e desenvolvimento do vegetal (PAIVA et al., 2012; COVRE et al., 2013; DUBBERSTEIN et al., 2017). Essas informações podem auxiliar também a compreender o efeito do macro ou micronutriente na produção de matéria seca.

A eficiência de uso de nutrientes em cafeeiros pode ser um “parâmetro” ou característica a ser utilizada como ferramenta na seleção de genótipos superiores, de modo que o material genético que apresentar maior produção de biomassa pode ser escolhido para programas de melhoramento. Na literatura existem muitos trabalhos que associam o crescimento vegetativo do cafeeiro com a sua produtividade (RODRIGUES et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2012; POLTRONIERI et al., 2019), mas as informações sobre a influência de elementos minerais sobre essas características são muito escassas na literatura.

Neste trabalho foi avaliada a capacidade de síntese de biomassa por 15 genótipos de *C. canephora*, buscando relacionar a influência dos nutrientes posteriormente relatados, e assim, identificar variabilidade genética entre os clones avaliados quanto à produção de massa seca. E com base nos dados obtidos é possível observar que houve diferença de produção de massa seca entre os clones, de modo que os genótipos C1, C2 e C13 apresentaram os maiores valores para massa seca, enquanto C9, C12 e C14 apresentaram os menores teores (Tabela 11).

Tabela 11. Massa seca foliar (MSF), massa seca raiz (MSR), massa seca total (MST), razão massa foliar (RMF), razão massa raiz (RMR) de clones de *C. canephora*, em g kg⁻¹.

Clones	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	Média
MSF	11	10,4188	6,5321	5,8068	6,4667	5,882	7,0595	5,8419	4,9925	5,903	5,3087	4,4595	8,2945	4,8505	7,4115	6,68
MSR	0,9099	1,4825	2,6495	2,8883	2,694	0,8522	2,6251	2,7024	2,4804	2,3031	1,2863	2,9098	6,099	3,6444	3,913	2,62
MST	12	12	9	9	9	7	10	9	7	8	7	7	14	8	11	9,2
RMF	0,9166	0,8682	0,7257	0,6452	0,7185	0,8402	0,705	0,6491	0,7132	0,737	0,7583	0,6357	0,5924	0,606	0,673	0,718
RMR	0,076	0,123	0,294	0,3209	0,299	0,121	0,262	0,3	0,354	0,287	0,183	0,4156	0,4356	0,455	0,355	0,257

Com base no método hierárquico UPGMA, utilizando a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade e baseado no teor de massa seca das folhas e raízes dos quinze genótipos de *C. canephora*, os clones foram agrupados conforme dissimilaridade genética entre eles. Dessa forma, três grupos distintos foram formados. Sendo o grupo 1 composto pelos clones C1 (BRS3137) e C2 (BRS 3213), o grupo dois pelo C13 (RO_C160) e o grupo 3 caracterizou-se como o mais populoso contendo os outros 12 materiais genéticos. Apesar de ser um grupo grande, observa-se uma maior distribuição dos clones, como se estivessem em subgrupos de acordo com o teor de massa seca (Figura 35). Os resultados apresentados corroboram com os dados observados na tabela 11

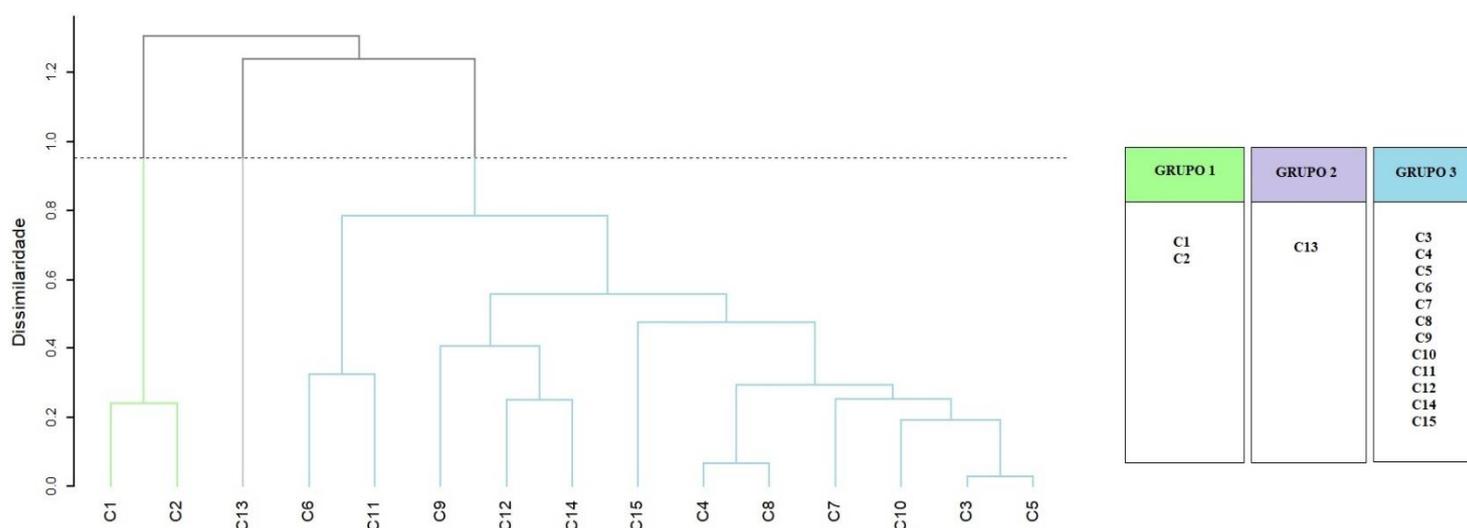


Figura 35. Análise de agrupamento (UPGMA) a partir da distância euclidiana média entre quinze genótipos de *Coffea canephora* com base em análises de massa seca das plantas. Coeficiente de correlação cofenética: $r = 0,8921$. A linha horizontal tracejada representa o corte estimado pelo método de Mojena (1977).

A representação da relação de similaridade genética entre os genótipos considerando a análise de massa seca dos indivíduos a partir de dois eixos foi realizada pela análise de escalonamento multidimensional não-métrica (Figura 36). Os genótipos C1, C2 e C13 apresentaram maior distância dos demais materiais, conforme observado no dendrograma (Figura 35), estes dados corroboram com os observados anteriormente, confirmando a divisão dos genótipos em três grupos.

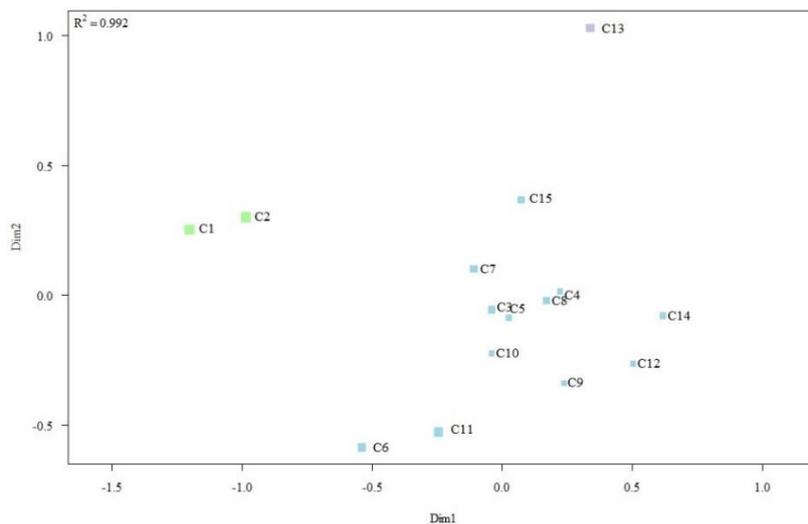


Figura 36. Análise de escalonamento multidimensional não-métrica das distâncias genéticas entre quinze genótipos de *Coffea canephora*, com base nas análises de massa seca.

A análise de componentes principais (PcoA), apresentada no gráfico de dispersão, com as coordenadas explicando 37,63% da variação total observada, confirma a separação dos materiais genéticos em três grupos (Figura 37 e 38).

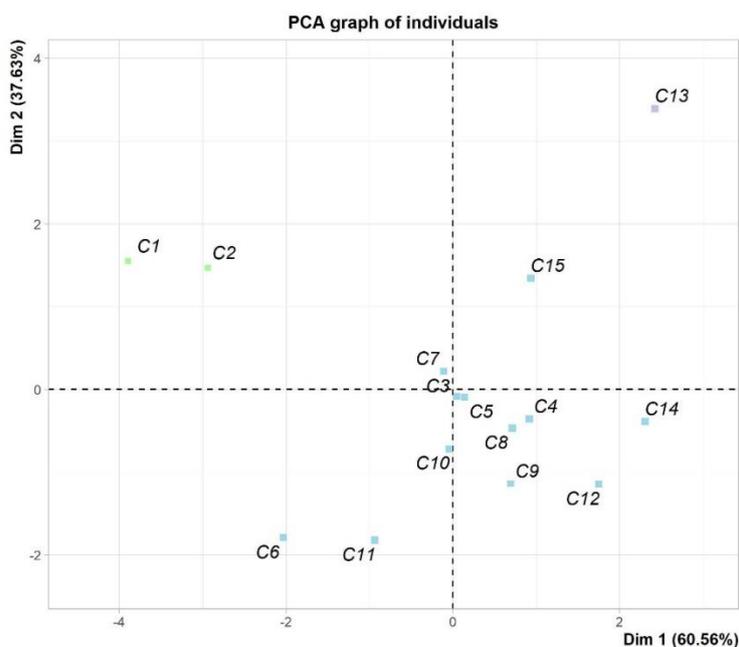


Figura 37. Análise de Componentes Principais (PCA) – Massa Seca de 15 genótipos de *Coffea canephora*.

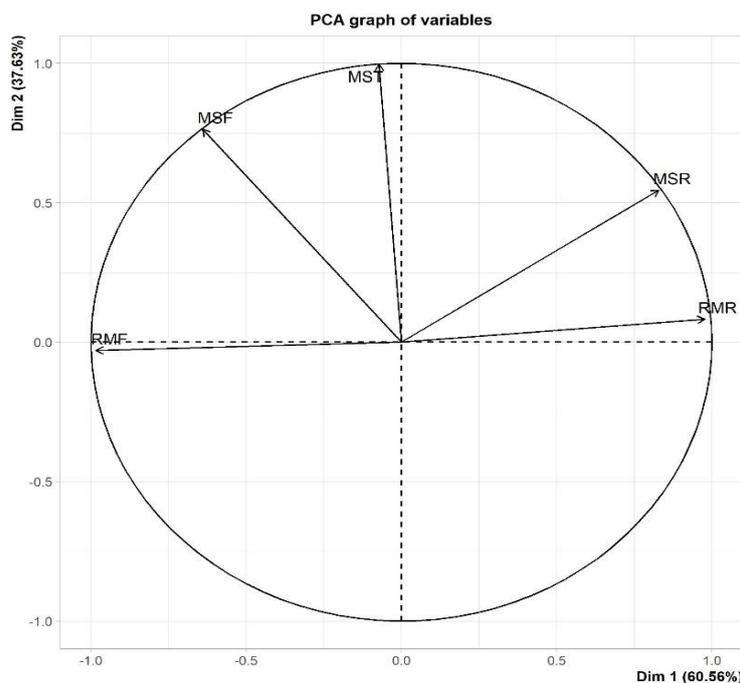


Figura 38. Análise de Componentes Principais (PCA) – Massa Seca de *Coffea canephora*.

5.5 Produtividade de dos genótipos de *Coffea canephora*

Coffea canephora é uma espécie conhecida pela sua alta variabilidade genética, pois é uma espécie alógama, e que apresenta mecanismos que favorecem a ocorrência de polinização cruzada, como a autoincompatibilidade gametofítica e o florescimento sincronizado (BERTHAUD, 1980). O plantio composto por esta espécie será então altamente heterogêneo devido a sua variabilidade genética natural e a polinização cruzada entre suas gerações (FERRÃO et al., 2009; FONSECA et al., 2006). Contudo, toda esta heterogeneidade não é viável para o correto manejo e trato cultural das lavouras, pois dificulta-os, e afeta diretamente a produtividade média de grãos dos plantios (FERRÃO et al., 2008; RAMALHO et al., 2011). Assim, pesquisadores vêm buscando realizar experimentos com clones de *C. canephora*, pois de acordo com dados na literatura, a propagação assexuada por meio de clones superiores, têm tornado os plantios mais uniformes, aumentando significativamente a produtividade e qualidade dos frutos (BRAGANÇA et al., 2001; FERRÃO et al., 2007; RAMALHO et al., 2011; RAMALHO et al., 2016). Dessa forma, para o aumento da produtividade de grãos de café tem se buscado o cultivo de genótipos superiores assim como a melhoria de condições ambientais das lavouras. E no melhoramento de espécies perenes que possuem um ciclo produtivo anual como é o caso do cafeeiro, busca-se tanto a estabilidade produtiva quando a adaptabilidade de clones em diferentes áreas (RESENDE, 2007; FERRÃO et al., 2008).

A seleção de materiais superiores tem como objetivo obter genótipos com maior produtividade e rendimento de grãos, dentre outras características como maturação uniforme, tamanho de grãos, tolerância a estresses bióticos, e outros (RAMALHO et al., 2016). Entretanto, a distribuição desuniforme da produtividade ao longo dos anos é um dos principais fatores considerados para a seleção, pelo fato de que os cafeeiros possuem uma característica fisiológica conhecida como alternância bienal da produtividade, onde a planta vegeta mais do que produz, para que no próximo ano, possa produzir mais, assim o cafeeiro pode apresentar maior produtividade acumulada por ter apresentado maior produção nas primeiras colheitas ou devido a estabilidade ao longo do tempo (RENA e MAESTRI, 1987; CILAS et al., 2011; RAMALHO et al., 2011). De acordo com os dados na literatura, este processo deve a relação fonte-dreno entre folhas e frutos, de modo que os nutrientes são exportados para os grãos durante enchimento de grãos na fase de maior produção (BARROS et al., 1999; PICINI et al., 1999; RAMALHO et al., 2011). E esta oscilação de produzir mais em um ano do que em outro é responsável pela ocorrência de efeitos significativos em plantios de café (LEROY et al., 1994).

Como os programas de melhoramento com *C. canephora* visam várias características, desde alta produtividade a formato de frutos semelhante ao do café arábica, existe assim, a necessidade de estudos para diferentes caracteres quantitativos, que são governados por diversos genes, os quais, durante a expressão gênica sofrem influência do ambiente. Desse modo, a maioria desses estudos é realizada por meio dos princípios da estatística, que torna possível a obtenção de análises descritivas como médias e coeficientes de variação, bem como a estimação de parâmetros genéticos e fenotípicos, herdabilidade e outras estimativas entre genótipos e ambiente (FERRÃO et al., 2004). O sucesso da seleção de genótipos depende da precisão dessas estimativas utilizadas na seleção de genótipos superiores (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004; PETERNELLI et al., 2009; RAMALHO et al., 2016). Assim, as estimativas de parâmetros genéticos são essenciais nos programas de melhoramento pois permitem que se tenha conhecimento da natureza de ação dos genes envolvidas nas características avaliadas bem como avaliam o método de melhoramento. E dentre estes parâmetros, as variâncias genética, fenotípica, ambiental, correlações e herdabilidade são as mais importantes (CRUZ; CARNEIRO, 2006; REZENDE et al., 2011).

Neste presente estudo, a variância da produtividade de café beneficiado (sc 60kg há⁻¹), evidenciou diferença significativa para todas as características avaliadas entre os genótipos de *C. canephora*, de acordo com o teste F a 1% de probabilidade (Tabela 12).

Os valores de CVe obtidos neste trabalho foram de 23,25%, 14,30%, 29,26%, 25,95% para as características de rendimento original e estimado, e produtividade original e estimada. Os dados corroboram com os obtidos por Ferrão et al. (2008), Carias et al. (2016), Ramalho et al. (2011) e Ramalho et al. (2016), que quantificaram valores de coeficiente de variação entre 16,92% e 26,40%. Rezende et al. (2011), encontraram valores semelhantes de 19,57%, entretanto, para o café arábica e Rocha et al. (2015) e Silva et al. (2018), obtiveram valores mais altos de 28,71% a 32,76%. Neste trabalho, para todas as características, os coeficientes de variação experimental (CVe), se mantiveram dentro da faixa considerada para experimentos com culturas perenes, sendo consideradas baixas e indicando assim que houve alta acurácia e precisão experimental para as características avaliadas (FERRÃO et al., 2008; COOUTO; PETERNELLI; BARBOSA, 2013; FRITSCHÉ-NETO et al., 2012; CARIAS et al., 2016). O CVe, é uma estimativa que depende tanto de condições experimentais quanto da natureza, por isso, valores mais elevados como observado por Rocha et al. (2015) e Silva et al. (2018), podem ocorrer devido a fatores como ciclo da cultura, temperaturas, déficit hídrico, e outros. Contudo, CVe com valores entre 15% e 30% para produtividade de café beneficiado demonstram que há uma boa condução experimental (FERRÃO et al., 2008).

Quanto às estimativas de componentes que expressam a variabilidade genotípica, os quais são de extrema importância em programas de melhoramentos, pois quanto maior for o seu valor, mais variabilidade genética terá entre os genótipos avaliados e conseqüentemente, haverá uma maior possibilidade de seleção de material superior, visando seu uso como genitores (FERRÃO et al., 2008). Neste trabalho, foram observados valores de CVg para rendimento original e estimado de 18,72% e 10,35%, enquanto produtividade original e estimada teve coeficientes de variação genética iguais a 41,37% e 43,75%, indicando assim, que houve uma maior variabilidade genética entre os genótipos para esse caractere. Essa estimativa mensura a proporção da variância total devido a variação genética entre os genótipos, e os resultados obtidos indicam que há predominância do componente genético na produtividade. Estes dados corroboram com os obtidos por Ramalho et al. (2011), que seus valores de CVg foram de 35,62%, 56,76% e 32,33%.

O comportamento observado neste presente estudo e por outros autores, é considerado como favorável para o processo de obtenção de ganhos por meio da seleção de materiais superiores (CRUZ et al., 2003). Nos trabalhos desenvolvidos por Ramalho et al. (2016), Rezende et al. (2016) e Carias et al. (2016), os valores de CVg foram

inferiores a 11%. Contudo, autores como Rodrigues et al. (2012), Ramalho et al. (2016) e Silva et al. (2018), obtiveram valores elevados, acima de 30%. Como já citado anteriormente, essas estimativas estão diretamente relacionadas com a variabilidade genética, e permitem que o melhorista seja capaz de ter uma noção das mudanças que podem surgir do processo de seleção de genótipos superiores (FERRÃO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2015; RODRIGUES et al., 2012, FERREIRA et al., 2016b; GILES et al., 2019). Entretanto, essas estimativas podem ser alteradas por variações ambientais, dessa forma, o índice de variação CV_g/CV_e , é de extrema importância pois permite a identificação das características que possuem a variabilidade relacionada a genética e não ambientais (NASCIMENTO et al., 2014).

No presente estudo foram obtidos valores de CV_g/CV_e iguais a 0,81, 0,72, 1,41 e 1,69 para todos os caracteres analisados. Rodrigues et al. (2012), Carias et al. (2016), Ramalho et al. (2016) e Silva et al. (2018), encontraram valores de semelhantes ao deste estudo, entre 0,75 e 2,24. Rezende et al. (2011), observaram um valor de 0,54 para café arábica. De acordo com informações na literatura, os caracteres que apresentarem valores de CV_g/CV_e , próximos ou superiores a 1,0, estão aptos para serem inseridos em programas de melhoramento. De modo que, valores entre 0,70 e 2,00 eram considerados bons para experimentos de melhoramento genético com café conilon (FALUBA et al., 2010). De acordo com os dados observados na literatura, todos os caracteres deste presente estudo indicam uma situação satisfatória para a seleção (CRUZ et al., 2014), destacando-se as características de produtividade original e estimada.

Quanto ao coeficiente de herdabilidade, ele é uma estimativa de extrema importância em estudos de melhoramento genético pois expressa a confiabilidade com que o valor fenotípico expressa o valor genético (CARIAS et al., 2016). O valor da herdabilidade pode ser influenciado pela variação genética da população, assim como da melhoria do ambiente em que ocorre o experimento com o intuito de reduzir a influência do ambiente na variação fenotípica total (CARIAS et al., 2016). Dessa forma, pode-se dizer que o valor de h^2 de uma característica não é constante, pois pode ser alterado pela variação genética ou controle do erro experimental (RAMALHO et al., 1993; FERRÃO et al., 2008).

Para este trabalho, os coeficientes de herdabilidade obtidos a partir das médias dos genótipos avaliados apresentaram as seguintes estimativas: 72,17, 67,69, 88,88 e 91,91, os quais foram obtidos devido à alta variabilidade genética dos clones de *C. canephora*, assim como da acurácia do experimento (FERRÃO et al., 2008). Resultados semelhantes

foram obtidos por Ferrão et al. (2008), Rodrigues et al. (2012) e Rezende et al. (2011), que identificaram valores de h^2 superiores a 80,0, 65,0 e 54,0, respectivamente, salientando que os valores obtidos por e colaboradores (2011) são relacionados ao café arábica. Entretanto, os autores como Ramalho et al. (2011), Carias et al. (2016), Ramalho et al. (2016) e Silva et al. (2018), os valores identificados foram inferiores a 1,0. Os coeficientes de herdabilidade são considerados altos quando h^2 for igual ou superior a 50%, entretanto, pesquisadores indicam o uso de caracteres que apresentem valores acima de 80% para garantir maiores ganhos genéticos com a seleção (FALCONER, 1983). Entre as características avaliadas para este estudo, as produtividades original e estimada foram os que apresentaram maiores, e mais promissoras para serem consideradas em um programa de melhoramento genético, por possuírem um peso elevado do componente genético no fenótipo (GILES et al., 2019).

Tabela 12. Quadrados médios e estimativa de parâmetros genéticos e fenotípicos de características avaliadas em genótipos de *Coffea canephora*, experimento conduzido em 2020/2021

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios			
		Rendimento Original	Rendimento Estimado	Produtividade Original	Produtividade Esperada
Blocos	3	0,0031	0,0010	477,9778	380,6953
Genótipo	14	0,0086**	0,0044**	2231,1706**	3896,3523**
Resíduo	42	0,0024	0,0014	248,0680	315,0990
Parâmetros Genéticos e Fenotípicos					
Média		0,21	0,26	53,82	68,40
CVe (%) ¹		23,25	14,30	29,26	25,95
Mínimo		0,08	0,12	15,94	20,21
Máximo		0,50	0,42	122,30	148,92
DMS- Tukey (5%)		0,12	0,10	40,12	45,21
DMS- Tukey (1%)		0,14	0,11	46,73	52,67
Cvg(%) ²		18,72	10,35	41,37	43,75
CVg/Cve ³		0,81	0,72	1,41	1,69
S ² genética		0,0015	0,0007	495,7757	895,3133
S ² ambiental		0,024	0,0014	248,0680	315,0990
S ² fenotípica		0,0021	0,0011	557,7926	974,0880
Herdabilidade (%)		72,17	67,69	88,88	91,91

^{ns} não significativo; ** significativo a $p < 0,01$, pelo teste Tukey. ¹Coeficiente de variação experimental; ²Coeficiente de variação genético; ³Razão entre o coeficiente de variação genético e o coeficiente de variação experimental.

O teste de médias pelo Skott-Knott a 5% de probabilidade, permite que seja detectada variabilidade entre os genótipos para as características produtividade original e estimada, organizando os genótipos em três grupos, como pode ser observado na tabela 13.

Tabela 13. Comparativos das médias para avaliação dos parâmetros produtividade original e estimada dos clones de *Coffea canephora*.

Tratamentos	Produtividade sc 60 kg ha ⁻¹	
	Produtividade Original	Produtividade estimada
BRS 3137	32,06 c	29,32 c
BRS 3213	23,68 c	30,77 c
BRS 1216	91,47 a	116,53 a
BRS 2314	56,63 b	75,32 b
BRS 3210	25,50 c	32,04 c
BRS 3220	31,60 c	42,83 c
BRS 2336	53,00 b	69,91 b
BRS 2299	61,20 b	89,74 b
BRS 3193	34,32 c	48,43 c
Clone 12	26,59 c	31,98 c
BRS 2357	78,75 a	102,12 a
RO_C125	67,22 b	64,25 c
RO_C160	85,40 a	111,71 a
Clone 9	80,19a	99,53 a
Clone 15	59,76 b	81,45 b

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo

Conforme observado na tabela 13, os genótipos C3, C11, C13 e C14 apresentaram as maiores médias para o caractere avaliado, e associando as estimativas fenotípicas, genotípicas e ambientais com as médias dos clones, é possível observar uma predominância do efeito dos clones na produtividade e esta condição é fundamental para o processo de melhoramento.

A variabilidade dos genótipos para estes caracteres é confirmada por outros trabalhos desenvolvidos, conforme apresentado anteriormente, como por exemplo, o trabalho desenvolvido por Ferrão et al. (2008), onde os genótipos de café conilon apresentaram alta produtividade e variabilidade genética, assim como foi evidenciado por

Rodrigues et al. (2012), Ramalho et al. (2011), Carias et al. (2016), Silva et al. (2018) e outros.

A estimativa desses parâmetros permite que métodos mais adequados para melhoramento genético de cafeeiro possam ser selecionados e utilizados (CRUZ et al., 2014). Dessa forma, a produtividade dos clones é uma das características mais recomendadas para adaptação e produtividade de clones de café na região de Manaus – AM, entretanto, mais pesquisas são recomendadas, analisando outras características como o ciclo de maturação dos frutos, matéria seca do fruto e outros, pois os estudos sobre melhoramento genético de *C. canephora* ainda são muito escassos na literatura. Assim, é recomendável que avaliações continuem sendo feitas no experimento estabelecido na fazenda experimental da UFAM, pois esses materiais genéticos já se mostraram bastantes promissores para as condições edafoclimáticas de Manaus.

5.6 Correlações entre biomassa, produção e concentração foliar de nutrientes de *Coffea canephora*.

Com base nos dados de correlação de Pearson para massa seca foliar, massa seca da raiz, massa seca total, razão da massa foliar, razão da massa da raiz, rendimento original e estimado, produtividade original e estimada e teores nutricionais nas folhas dos 15 genótipos de *C. canephora*, foi possível observar 75 correlações significativas a 1% de probabilidade, sendo 48 correlações positivas MSF x MST (0,843), MSF x RMF (0,5975), MSF x P (0,6606), MSF x Cl (0,6467), MSF x K (0,581), MSR x RMR (0,8417), MSR x Prod.Orig. (0,5464), MSR x Prod.Est. (0,565), MSR x Ti (0,614), MSR x Cr (0,557), RMF x P (0,6071), RMF x Cl (0,7747), RMF x K (0,5887), RMR x Prod.Orig. (0,5407), RMR x Prod.Est. (0,5179), RMR x Ti (0,6317), RMR x Br (0,6243), Rend.Orig. x Rend.E (0,718), Rend.Est. x Prod.Or (0,7327), Rend.Est. x Prod.Es (0,6684), Prod.Orig. x Prod.E (0,9693), Prod.Orig. x Ti (0,5547), Prod.Est. x Ti (0,6259), P x S (0,5228), P x Cl (0,7606), P x K (0,9421), S x Cl (0,5944), S x K (0,6357), Cl x K (0,8037), Cl x Fe (0,5201), Cl x I (0,5532), Ca x V (0,5307), Ti x Rb (0,5844), Ti x Y (0,7041), Ni x Cu (0,5211), Cu x Zn (0,5927), Zn x Br (0,531), Zn x Hf (0,5417), Rb x Sr (0,5533), Rb x Hf (0,7492), Sr x Hf (0,6203), Y x Hf (0,6566), Zn x Br (0,531), Zn x Hf (0,5417), Rb x Sr (0,5533), Rb x Hf (0,7492), Sr x Hf (0,6203), Y x Hf (0,6566).

As correlações positivas mostram que quanto maior valor dos elementos ou de biomassa e produtividade, maior será a característica correlacionada. Os elementos apresentaram uma maior correlação positiva para aumento de biomassa, e um

comportamento interessante é que o elemento titânio demonstrou auxiliar no aumento da produtividade de grãos, assim como foi um dos únicos elementos a contribuir com o acúmulo de massa seca radicular. Sobre este elemento, ainda não se tem dados suficientes na literatura sobre sua real importância no desenvolvimento e metabolismo de uma planta, entretanto, alguns autores o consideram benéfico, devido ter auxiliado em processos como germinação, produção de biomassa, síntese de proteínas, absorção de proteínas, atividade antioxidante, fotossíntese e contribuiu com a qualidade de frutos (CARVAJAL e ALCATRAZ, 1998; BACILIERI et al., 2017). Alguns autores consideram um efeito conhecido como “Hormesis” um dos efeitos benéficos do elemento na agricultura, o qual faz relação à concentração nociva de substâncias que quando utilizados em pequenas doses podem ter efeito benéfico como por exemplo, facilitar a absorção de algum nutriente essencial (KUZEL et al., 2003). Uma pesquisa realizada por Lyu et al. (2017), relata os benefícios de Ti para as plantas. Assim, para este elemento que ainda não é considerado essencial para espécies vegetais, seria interessante realizar mais estudos sobre a dinâmica do Ti em *C. canephora*, uma vez que não foram identificados efeitos nocivos para plantas quando aplicados em doses maiores, até o momento (FRAZER, 2001; BACILIERI et al., 2017).

Além disso, os outros elementos que mostraram correlação positiva com a produção de matéria como P, K e Cl, auxiliaram no desenvolvimento vegetal fornecendo maior vigor para os genótipos, além disso, os clones pareceram desempenhar mecanismos de resistência com relação a Al e outros elementos que poderiam causar toxidez, indicando que além da expressão gênica, houve influência destes nutrientes para evitar que elementos como metais pesados pudessem afetar o crescimento dos genótipos.

Já as correlações negativas indicam que quanto maior o valor desses elementos ou outras características, menor será a característica relacionada. Dessa forma, é possível concluir que elementos considerados como elementos traços e elementos de terra rara afetam significativamente na capacidade de acúmulo de massa seca, bem como na produtividade de grãos dos clones, tanto a original quando a estimada, e influenciam também na concentração e acúmulo de elementos essenciais para o desenvolvimento da planta como o P e o K. Quanto às 27 correlações negativas, foram identificadas: MSF x RMR (-0,5517), MSF x Hf (-0,5887), MSR x RMF(-0,8256), MSR x Cl (-0,5544), RMF x RMR (-0,944), RMF x Prod.Orig. (-0,6272), RMF x Prod.Est. (-0,6407), RMF x Ti (-0,7069), RMF x Br (-0,5695), RMR x P (-0,5292), RMR x Cl (-0,6539), RMR x K (-0,5179), Prod.Orig. x Cl (-0,5977), Prod.Orig. x Fe (-0,6386), Prod.Est. x Cl (-0,6393),

Prod.Est. x Fe (-0,6401), P x Ti (-0,768), P x Rb (-0,69), P x Y (-0,7118), P x Hf (-0,6175), Cl x Ti (-0,7299), Cl x Rb (-0,5927), Cl x Hf (-0,6274), K x Ti (-0,6922), K x Rb (-0,6828), K x Y (-0,6777) e K x Hf (-0,6467).

De acordo com Gupta et al. (2019), a contaminação de solos com elementos traço tem sido um dos principais problemas da crise ecológica e sanitária, principalmente pelo fato de que são elementos que não apresentam biodegradabilidade. Eles entram na cadeia alimentar por meio do solo contaminado, fontes de água e deposição da atmosfera (FYTIANOS et al., 2001), e sua contaminação é acelerada pelo antropismo (SINGH e KUMAR, 2006). Quando ocorrem de modo natural no solo, normalmente não estão na forma biodisponível e assim, não são absorvidos pelas plantas (ANTONIADIS, 2019). A contaminação e acúmulo de elementos traço em vegetais de diferentes fontes tem sido amplamente relatado por vários pesquisadores (GUPTA et al., 2019), e os efeitos tóxicos destes elementos nas plantas causam danos ao desenvolvimento e crescimento do vegetal (ALI et al., 2013; ADREES et al., 2015; HABIBA et al., 2015; KELLER et al., 2015). Podendo restringir o crescimento das plantas de modo severo, com exceção das espécies mais tolerantes (WONG, 2003), ou acumuladoras.

Os genótipos de *C. canephora* demonstraram ser tolerantes, pelo fato de que alguns elementos tóxicos como o Al, ficaram acumulados no sistema radicular e não foram translocados para outros órgãos e tecidos vegetais. Dessa forma, seria interessante que novas análises e experimentos fossem realizados quanto a esta capacidade observada nesses materiais genéticos, principalmente pelo fato de que, se foi uma resposta de resistência pelo sistema radicular, pode ter sido causado por expressão gênica e então seria uma característica viável para o melhoramento de *C. canephora*, uma vez que os solos do Amazonas são ácidos e busca-se a adaptabilidade desses clones na região de Manaus- AM.

Na continuidade do programa de melhoramento, recomenda-se a avaliação de outros caracteres como ciclo de maturação dos frutos, assim como mais análises ao longo do ciclo da cultura com repetições para sistema radicular, grãos e cascas crus e torrados e massa seca, para que se possa analisar a repetibilidade das características avaliadas.

6. CONCLUSÕES

A existência de variabilidade genética para altura de planta, acúmulo de Cu, Rb, Hf e I em tecidos foliares e para rendimento e produtividade originais e estimados de grãos entre os clones analisados mostra a diferença na adaptação e crescimento vegetativo dos genótipos de *C. canephora* na região de Manaus.

Os altos valores de herdabilidade e de CV_g/CV_e para estas características mostram uma situação favorável à discriminação dos clones superiores quanto ao processo de adaptação e de maior produção de grãos.

O comprimento do ramo ortotrópico e altura da planta apresentam interação genótipo por ambiente, demonstrando que os clones são alterados de acordo com o ambiente para esses caracteres.

Os teores e acúmulos de elementos minerais em solos rizosféricos, raízes, grãos e cascas crus e torrados, bem como o acúmulo de massa seca, demonstram que existe variabilidade genética entre os genótipos de *C. canephora* e, embora não se tenha repetições para esses caracteres e apenas a seleção massal possa ser realizada, o agrupamento pela análise UPGMA mostra o agrupamento dos materiais genéticos, indicando dissimilaridade genética entre si.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEELE, V. S.; JANSSENS, S.B.; ANIO, J. A.; BAWIN, Y.; DEPECKER, J. et al. Genetic diversity of wild and cultivated *Coffea canephora* in northeastern DR Congo and the implications for conservation. **American Journal of Botany**, v. 108, n. 12, p. 2425-2434, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajb2.1769>
- ADREES, M. SHAFQAT, A.; RIZWAN, M. t al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 119, p. 186-197, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
- AKPERTEY, A.; ANIM-KWAPONG, E.; OFORI, A. Assessment of genetic diversity in Robusta coffee using morphological characters. **International Journal of Fruit Science**, v. 19, n. 3, p. 276-299, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2018.1502723>
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M.A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n. 7, p. 869-88, 2013.
- ALLARD, R.W. **Princípios de melhoramento genético das plantas**. N. York, John Wiley & Sons, 1971, 381 p.
- ALOV, N. V. Total reflection X-ray fluorescence analysis: Physical foundations and analytical application (A review). **Inorganic Materials**, v. 47, n. 14, p. 1487-1499, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168511140020>
- ALVES, D.S.B.; SPINELLI, V.M.; MORAES, M.S.; SOUZA, C.A.; RIBEIRO, R.S.; ROCHA, R.B. Caracterização da Peneira Média em Clones de *Coffea canephora*. **Revista FIMCA**, v.5, n.2, p.28-31. 2018.
- AMARAL, J.A.T do.; LOPES, J.C.; AMARAL, J.F.T do.; SARAIVA, S.H.; JESUS JR, W.C de. Crescimento vegetativo e produtividade de cafeeiros Conilon propagados por estacas em tubetes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.6, p.1624 -1629, 2007.
- AMARAL, J.F.T.; MARTINEZ, H.E.P.; LAVIOLA, B.G. et al. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.41, n. 4, p. 621-629, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-8478011005000027>
- AMEH, T.; SAYES, C.M. The potential exposure and hazards of copper nanoparticles: A review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 71, p. 103220, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103220>
- AMORIM, V.H. **Aspectos bioquímicos do grão de café relacionados com a deterioração da qualidade**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 85p., 1978
- ANDERSON, K.A., SMITH, B.W. Chemical profiling to differentiate geographic growing origins of coffee. **J. Agric. Food Chemical**, 50, 2068–2075. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf011056v>
- ANDRADE, L.K.F.; SILVA NETO, E.R.; DE SÁ, T.; QUIRINO, Z.G.M. Fenologia reprodutiva de Rubiaceae juss. Na mata atlântica paraibana, **Oecologia Australis**, v. 24, n. 4, p.834-848, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4257/oeco.2020.2404.07>
- ANTONIADIS, V.; SHAHEEN, S.M.; LEVIZOU, E. et al. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health

- risk assessment?-A review. **Environment international**, v. 127, p. 819-847, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>
- ASGARI, K.; CORNELIS, W.M. Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation. **Environ Monit Assess**, v.187, p.410, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4565-8>
- ASQUINI, E.; GERDOL, M.; GASPERINI, D.; IGIC, B.; GRAZIOSI, G.; PALLAVICINI, A. S-RNase-like sequences in styles of *Coffea* (Rubiaceae). Evidence for S-RNase based gametophytic self-incompatibility? **Tropical Plant Biol.**, v.4, p. 237–249, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12042-011-9085-2>
- BABOVA, O.; OCCHIPINTI, A.; MAFFEI, M.E. Chemical portioning and antioxidant capacity of green coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*) of different geographical origin, **Phytochemistry**, v. 123, p. 33-39, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.016>.
- BACILIERI, F.S.; DE VASCONCELOS, A.C.P.; LANA, R.M.Q.; MAGESTE, J.G.; TORRES, J.L.R. Titanium (Ti) in plant nutrition- A review. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n.4, p.382-386, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.04.pne202>
- BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Diagnóstico da cafeicultura capixaba: o café robusta no Espírito Santo**. Vitória, ES: Bandes, 88p. 1987.
- BARROS, R. S.; MAESTRI, M.; RENA, A. B. Physiology of growth and production of the coffee tree-a review. **Journal of Coffee Research**, v. 27, n. 1, p. 1-54, 1999.
- BAZONI, P.A.; ESPINDULA, M.C.; ARAÚJO, L.F.B.; VASCONCELOS, J.M.; CAMPANHARO, M. Production of cuttings and nutrient export by *Coffea canephora* in different periods in the Southwestern Amazon, **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n., p.162-169, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n3p162-169>
- BERGO, C. L. L., MIQUELONI, D. P., LUNZ, A. M. P., & de ASSIS, G. M. L. Estimation of genetic parameters and selection of *Coffea canephora* progenies evaluated in Brazilian Western Amazon. **Coffee Science**, e151663, 2020.
- BERTHAUD, J. L'Incompatibilité chez *Coffea canephora*: Méthode de test et déterminisme génétique. **Cofé Cacao Thé. Nogest-sur-Marne**, v. 24, n.1, p. 167-174. 1980.
- BERTHAUD, J. Les ressources génétiques pour L'améliorations des caféiers africains diploides. Evaluation de la richesse génétique des populations sylvestres et de ses mécanismes organisateurs. **Conséquences pour l'application**. Paris: Orstom, 1986. 379 p. (Collection Trauvauz at Documents, 188).
- BERTHAUD, J.; CHARRIER, A. Genetic resources of *Coffea*. IN: CLARCK, R.J.; MACRAE, R. (eds). **Coffee- Agronomy**. London, Elsevier Applied Science, p1-40.1985.
- BICHO, N.C., LIDON, F.C., RAMALHO, J.C., LEITAO, A.E. Quality assessment of Arabica and Robusta green and roasted coffees – a review. **Emir. J. Food Agric**. 25, 945–950, 2013.
- BINNEMANS, K.; JONES, P.T. Rare earths and the balance problem. **J Sustain Metall**, n.1, p.29–38, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0005-1>

- BIONDI, C.M.; DO NASCIMENTO, C.W.; FABRÍCIO NETA, A.B. et al. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1057-1066, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>
- BLASCO, B.; LEYVA, R.; ROMERO, L.; RUIZ, J. M. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress. **J. Agric. Food Chem.** v.61, p. 2591–2596, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf303917n>
- BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E.; ESCALANTE-MAGAÑA, C.; ECHEVARRÍA-MACHADO, I.; MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, M. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1767, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>
- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; SOUZA, J. M. de. GENÓTIPOS DE CAFÉ CONILON SOB AJUSTE DE DIFERENTES COEFICIENTES DE CULTURA AJUSTADOS. **IRRIGA**, v. 22, n. 2, p. 236–248, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p236-248>
- BONOMO, P.; CRUZ, C.D.; VIANA, J.M.S.; PEREIRA, A.A.; OLIVEIRA, V.R. de; CARNEIRO, P.C.S. Avaliação de progênies obtidas de cruzamentos de descendentes do híbrido de Timor com as cultivares Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo. **Bragantia**, v.63, p.207-219, 2004.
- BORGESE, L.; BILO, F.; DALIPI, R.; BONTEMPO, E.; DEPERO, L.E. Total reflection X-ray fluorescence as a tool for food screening. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 113, p. 1-15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.08.001>
- BOTELHO JUNIOR, A.B.; ESPINOSA, D.C.R.; VAUGHAN, J.; TENÓRIO, J.A.S. Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects. **Miner Eng**, v.172, p.107148, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107148>
- BOTIA, M.; ALCARAZ-LÓPEZ, C.; ALCARAZ, F.R. **Effect of the foliar application of sprays containing calcium, amino acid and titanium on Capsicum (Capsicum annuum L., cv Olmo) fruit quality.** In: Simposio Ibérico Sobre Nutrición Mineral De Las Plantas, IX. 2002.
- BOYLE, R.; **Experiments upon Colors**, vol. 2, London, 1663 *apud* Bishop, E., ed.; *Indicators*; Pergamon Press: Oxford, 1972, p. 2.
- BRADY, N. C. **Elemento da natureza e propriedade do solo.** Ciências do solo. 3a Edição tradução técnica: Igo Fernando Lopsch, Porto Alegre Bookman. p, 186, 2013.
- BRAGANÇA, S.M. et al. Variedades clonais de café Conilon para o Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.5, p.765-770, 2001.
- BRAGANÇA, S.M.; MARTINEZ, H.E.P.; LEITE, H.G. et al. Acumulação de matéria seca pelo cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, v. 57, p. 48-52, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000100009>
- BRAGANÇA, S.M.; MARTINEZ, H.E.P.; LEITE, H.G.; SANTOS, L.P et al. Accumulation of macronutrients for the conilon coffee tree. **Journal of Plant Nutrition**, v. 3, n. 1, p. 103-120, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904160701741990>
- CAMARGO, M. S., KORNDÖRFER, G. H., CORRÊA, G. F., PEREIRA, H. S., BARBOSA, D. S. & RESENDE, R. H. Extratores de silício solúvel em solos: influência do calcário e fósforo. **Biosci. Journal**, v.21, n.2, p. 9-19, 2005.

- CAMARGO, M.S. **Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos**, International Plant Nutrition Institute, Informações Agronômicas, n.155, ISSN 2311-5904, 9 p., 2016.
- CARDOSO, E. L.; SILVA, M.L.N.; MOREIRA, F.M.S.; CURI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, n. 6, p. 631-637, 2009.
- CARIAS, C.M.O.M.; GRAVINA, G.A.; FERRÃO, M.A.G.; DA FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G. et al. Predição de ganhos genéticos via modelos mistos em progênies de café conilon. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.39-45, 2016.
- CARMONA, P.A.O.; PEIXOTO, J.R.; AMARO, G.B. et al. Genetic divergence of sweet potato accessions based on morpho-agronomic descriptors of the roots. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 2, p. 241-250, 2015.
- CARNEIRO, F.A.; AQUINO, S.O.; MATTOS, N.G.; VALERIANO, J.C.; CARNEIRO, W.J. et al. Genomic wide selection in *Coffea canephora*. **Breeding**, ISSN:1984-9249, 2019.
- CARVAJAL, M.; ALCARAZ, C.F. Why titanium is a beneficial element for plants. **J Plant Nutr.**, v.21, n.4, p.655-664, 1998.
- CARVALHO, A. Distribuição geográfica e classificação botânica do gênero *Coffea* com referência especial à espécie arábica. **Separata dos boletins da superintendência de serviços de café**. Campinas, SP: IAC, dez. 1945 a abr. 1946.
- CARVALHO, A.; MÔNACO, L. C.; FAZUOLI, L. C. Melhoramento do café. XL - Estudos de progênies e híbridos de café Catuaí. **Bragantia**, v.38, n.22, p.202-216, 1979.
- CARVALHO, H.F.; SILVA, F.L.; RESENDE, M.D.V.; BHERING, L.L. Selection and genetic parameters for interpopulation hybrids between kouilou and robusta coffee. **Plant breeding**, v.78, n.1, p. 52-59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2018124>
- CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v.8, n.3, p.265-275, 2013.
- CFSEMG – Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª aproximação. p. 359. Viçosa: CFSMG, 1999.
- CHEN, Z.C.; LIAO, H. Organic acid anions: An effective defensive weapon for plants against aluminum toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils. **J. Genet. Genom.**, v.43, n.11, p.631-638, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2016.11.003>
- CHUNHONG, Z.; QIANQUAN, L.; NA, Z.; MINHUI, L. Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. **Acta Pharmaceutica Sinica B**, v. 3, p. 20-24, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2012.12.005>
- CILAS, C.; MONTAGNON, C.; BARHEN, A. Yield stability in clones of *Coffea canephora* in the short and medium term: longitudinal data analyses and measures of stability over time. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, n. 2, p. 421-429, 2011.
- COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N.; MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A. Differential tolerance between genotypes of conilon coffee (*Coffea canephora*) to low availability of nitrogen in the soil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 12, p. 1648-1657, 2014.

- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, Brasília, v.8 - Safra 2021 - n.4 - Quarto levantamento, p. 1-55, dezembro 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>> Acesso em: 15 de janeiro de 2022.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, Brasília, v.9- Safra 2022, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-60, janeiro 2022. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>> Acesso em: 30 de janeiro de 2022.
- CONAGIN, C. H. T. M.; MENDES, A. J. T. Pesquisas citológicas e genéticas em três espécies de *Coffea*: autoincompatibilidade em *Coffea Canephora* Pierre ex Froehner. **Bragantia**, v. 20, n. 34, p.787-804, 1961.
- CONAMA. Resolução no 460, de 30/12/2013. In: Resoluções do CONAMA. Brasília, DF: DOU, p. 153, 2013.
- CORRÊA, J. B. et al. **Extraction of nutrients for the coffee varieties “Mundo Novo” and Catuaí.** In: Summaries. XII Brazilian Congress of Coffee Research, Caxambú, IBC/GERCA: Rio de Janeiro, Brazil, 23–26, 1985.
- COULIBALY, I.; LORIEUX, M.; CHARRIER, A.; HAMON, S.; LOUARN, J. Introgression of self-compatibility from *Coffea heterocalyx* to the cultivated species *Coffea canephora*. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 105, n. 6, p. 994-999, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-002-1008-z>
- COULIBALY, I.; REVOL, B.; NOIROT, M.; PONCET, V.; LORIEUX, M. et al. AFLP and SSR polymorphism in a *Coffea* interspecific backcross progeny [(*C. heterocalyx* × *C. canephora*) × *C. canephora*]. **Theoretical and Applied Genetics**, n.107, p. 1148-1155, 2003.
- COUTO, M. F.; PETERNELLI, L. A.; BARBOSA, M. H. P. Classification of the coefficients of variation for sugarcane crops. **Ciência Rural**, v. 43, n. 6, p. 957-961, 2013.
- COVRE, A.M.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GONTIJO, I. Micronutrients in the fruits and leaves of irrigated and non-irrigated coffee plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 9, p. 1119-1129, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431665>
- COVRE, A.M.; PARTELLI, F.L.; MAURI, A.L.; DIAS, M.A. Crescimento inicial de genótipos de café conilon. **Revista Agro@ambiente**, v.7, n.2, p.193-202, 2013.
- COVRE, A.M.; RODRIGUES, W.P.; VIEIRA, H.D.; BRAUN, H.; RAMALHO, J.C.; PARTELLI, F.L. Nutrient accumulation in bean and fruit from irrigated and non-irrigated *Coffea canephora* cv. Conilon. **Emir. J. Food. Agric.**, v.28, n.6, p. 402–409, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-04-341>
- CRUZ, C. D. GENES, a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**, v. 35, p. 271-276, 2013.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. v. 2, 585 p
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2004.
- CRUZ, C. D; CARNEIRO, P. C. S; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético** - Volume 2. Viçosa: Ed. UFV, 3ª ed. 668 p., 2014.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético** - Volume 2. Viçosa: Editora UFV, 2003. 585p.

- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético** (4 ed.), UFV, Viçosa, 2012.
- CUBRY, P.; DE BELLIS, F.; POT, D.; MUSOLI, P.; LEROY, T. Global analysis of *Coffea canephora* Pierre ex Froehner (Rubiaceae) from the Guineo-Congolese region reveals impacts from climatic refuges and migration effects. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 60, n. 2, p. 483-501, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10722-012-9851-5>
- CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazônica**, v. 37, p. 91-98, 2007.
- DA SILVA, D.O.; FERREIRA, F.M.; ROCHA, R.B.; ESPINDULA, M.C. et al. Genetic progress with selection of *Coffea canephora* clones of superior processed coffee yield. **Ciência Rural**, v.48, p.1-7, 2018.
- DALAZEN, J. R. et al. Base genética da cafeicultura e caracterização dos principais clones cultivados no estado de Rondônia. In: PARTELLI, F. L.; ESPINDULA, M. C. (Orgs.). **Café conilon: conhecimento para superar desafios**. 1ed. Alegre: CAUFES, p.165-177, 2019.
- DALAZEN, J.R.; ROCHA, R.B.; PEREIRA, L.L.; ALVES, E.A.; ESPINDULA, M.C.; SOUZA, C.A. Beverage quality of most cultivated *Coffea canephora* clones in the western Amazon, *Coffee Science*, 15: e151711, 2020. DOI: <https://doi.org/10.25186/v15i.1711>.
- DALCOMO, J.M.; VIEIRA, H.D.; FERREIRA, A.; PARTELLI, F.L. Growth comparison of 22 genotypes of conilon coffee after regular pruning cycle. **Afr. J. Agric. Res.**, v.12, n.1, p. 63–70, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11261>
- DALIPI, R.; BORGES, L.; TSUJI, K.; BONTEMPI, E.; DEPERO, E.L. Elemental analysis of teas, herbs and their infusions by means of total reflection X-ray fluorescence. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.67, p. 128-134, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.01.010>
- DALIPI, R.; MARGUÍ, E.; BORGES, L.; DEPERO, L.E. Multi- element multi-element analysis of vegetal foodstuff by means of low power total reflection X-ray fluorescence (TXRF) spectrometry. **Food chemistry**, v. 218, n.1, p. 348-355, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.022>
- DAMATO NETO, J.; SANTOS, M.A.; SOARES, A.C. et al. Avaliação do sistema radicular e eficiência nutricional de cálcio e magnésio em mudas de *Coffea arabica* e *Coffea canephora*. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 307-312, 2014.
- DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 18, p. 55-81, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/bDfpJwLr4xLcznSwy4b9zki/?format=pdf&lang=en>. Acesso em outubro de 2021.
- DAVIS, A. P. et al. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed based on molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution, and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 167, n. 4, p. 357-377, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2011.01177.x>

- DAVIS, A. P.; CHADBURIN, H.; MOAT, J.; O'SULLIVAN, R et al. High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. **Science advances**, v. 5, n. 1, p. eaav3473, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3473>
- DAVIS, A.P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D.M.; RUHSAM, M.; MOAT, J.; BRUMMITT, N.A. A global assessment of distribution, diversity, endemism, and taxonomic effort in the Rubiaceae. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v.96, n.1, p. 68-78, 2009.DOI: <https://doi.org/10.3417/2006205>
- DAVIS, A.P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D.M.; STOFFELEN, P. An annotated checklist of the genus *Coffea* L. (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, vol. 152, p. 465-512. 2006.DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2006.00584.x>
- DE LA CALLE, I.; COSTAS, M.; CABALEIRO, N.; LAVILLA, I.; BENDICHO, C. Fast method for multielemental analysis of plants and discrimination according to the anatomical part by total reflection X-ray fluorescence spectrometry. **Food chemistry**, v. 138, n. 1, p. 234-241, 2013.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.105>
- DEFRENET, E.; ROUPSARD, O.; MEERSCHKE, K.V.; CHARBONNIER, F. et al. Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. **Annals of botany**, v. 118, n. 4, p. 833-851, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw153>
- DELPRETE, P. G.; JARDIM, J. G. Systematics, taxonomy and floristics of Brazilian Rubiaceae: an overview about the current status and future challenges. **Rodriguésia**, v. 63, p. 101-128, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2175-78602012000100009>
- DEQIAN, L. A review on yttrium solvent extraction chemistry and separation process. **Journal of Rare Earths**, v.35, n.2, p. 107-112, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60888-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60888-3)
- DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.
- DOLAN, L.; DAVIES, J. Cell expansion in roots. **Curr. Opin. Plant Biol.**, v.7, p.33-39, 2004.
- DUBBERSTEIN, D.; DIAS, J.R.M.; ESPÍNDULA, M.C.; RAMAHO, J.C.; PARTELLI, F.L. Acúmulo de micronutrientes em frutos de *Coffea canephora* cultivado na Amazônia. **Res Net Health**, v.20, n.3, 2017.
- DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F.L.; ESPINDULA, M.C.; DIAS, J.R.M. Concentration and accumulation of micronutrients in robust coffee. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42685>
- DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F.L.; GUILHEN, J.H.S.; RODRIGUES, W.P.; RAMALHO, J.C.; RIBEIRO-BARROS, A.I. Biometric traits as a tool for the identification and breeding of *Coffea canephora* genotypes. **Genet. Mol. Res.**, v.19, n.2, p. 1-17, gmr18541, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.4238/gmr185>
- DUBBERSTEIN, Danielly et al. Concentration and accumulation of macronutrients in leaf of coffee berries in the Amazon, Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 5, p. 701-710, 2016.
- DUSSERT, S.; LASHERMES, P.; ANTHONY, F.; MONTAGNON, C.; TROUSLOT, P.; COMBES, M.C.; BERTHAUD, J. et al. **Le caféier**, *Coffea canephora*. In: HAMON, P.; SEGUIN, M.; PERRIER,

- X.; GLASZMANN, J. -C. (eds). **Diversité génétique des plantes tropicales cultivées**. CIRAD, Montpellier, France, pp. 175-794, 1999.
- EL MAZLOUZI, M.; MOREL, C.; ROBERT, T. et al. Phosphorus uptake and partitioning in two durum wheat cultivars with contrasting biomass allocation as affected by different P supply during grain filling. **Plant and Soil**, v. 449, n. 1, p. 179-192, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04444-0>
- EL-GHONEMY, A.A.; EL-GAZZAR, A.M.; WALLACE, A.; ROMNEY, E.M. Mineral element composition of the natural vegetation along a transect at Mareotis. **Egypt Soil Sci.**, v.124, n.1, p.16-26, 1977.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. p. 306, 2006. Rio de Janeiro: *Embrapa Solos*.
- ENCK, B.F.; RODRIGUES, J.C.W.; HASSANE, A.L.; TEMBOL, R.A. et al. Impact on soil attributes under forest conversion for cultivated areas in the south Amazon Region, Brazil. **Geografia Ensino e Pesquisa**, v.4, n.54, p. 1-23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499443591>
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2.ed. Massachussets: Sinauer, 380 p., 2005.
- ERIKSSON, O.; BREMER, B. Fruit characteristics, life forms, and species richness in the plant family Rubiaceae. **The American Naturalist**, v.138, n.3, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1086/285247>
- ESPINDULA, M. C. et al. Café em Rondônia. In: PARTELLI, F. L.; GONTIJO, I. (Org.). **Café conilon: Gestão e Manejo com Sustentabilidade**. 1ed. Alegre: CAUFES, v.1, p.83-102, 2017.
- FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v2, n.1, p.6-16, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100009>
- FALCÃO, N.P.S.; SILVA, J.R.A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central, **Acta Amazonica**, v.34, n.3, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000300001>
- FALCONER, D.S. **Introduction to Quantitative Genetics**, (2.ed.), Longman, London, 1983.
- FALUBA, J.S.; MIRANDA, G.V.; DE LIMA, R.O. et al. Genetic potential of maize population UFV 7 for breeding in Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1250-1256, 2010.
- FAZUOLI, L.C. Genética e melhoramento do cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, N.; YAMADA, J. (Eds). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade do cafeeiro**. Piracicaba, SP: POTAFOS, p. 87-113, 1986.
- FERNÁNDEZ-RUIZ, R.; FRIEDRICK, K.E.J.; PEDREJO, H.J. Effect of modulation of the particle size distributions in the direct solid analysis by total-reflection X-ray fluorescence. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 140, p. 76-83, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2017.12.007>
- FERRÃO, M. A. G. et al. Genetic divergence in Conilon coffee revealed by RAPD markers. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 9, n. 1, p. 67-74, 2009.
- FERRÃO, M. A. G. MENDONÇA, R.F.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G.; SENRA, J.F.B. et al. Characterization and genetic diversity of Coffea canephora accessions in a germplasm bank in Espírito Santo, Brazil. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332021v21n2a32>

- FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; VERDIN FILHO, A. C.; VOLPI, P. S. **Origem, Dispersão Geográfica, Taxonomia e Diversidade Genética de *Coffea canephora***. In: FERRÃO, R. G. et al. 2ªed. *Café conilon*. Vitória: Incaper Café Conilon, 2017b, p. 81-101.
- FERRÃO, M. A. G.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; de MUNER, L. H. *Coffea canephora*. In: FERRÃO, R. G. et al. 2ª ed. **Café conilon**. Vitória: Incaper Café Conilon, 2017a, p. 37-53.
- FERRÃO, R.G.; CRUZ, C.D.; FERREIRA, A. et al. Genetic parameters in Conilon coffee. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 61-69, 2008.
- FERRÃO, R.G.; DA FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; DE MUNER, L. H. **Conilon Coffee, 3rd Edition, updated and expanded**. Vitória: Incaper, 974p. 2019.
- FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; DE MUNER, L.H.; VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S.; MARQUES, E.M.G.; ZUCATELI, F. *Café Conilon: técnica de produção com variedades melhoradas*, 3ªed. Vitória, ES: Incaper, 60p. 2007.
- FERREIRA JUNIOR, M.; VIEIRA, A.O.S. Espécies arbóreo-arbustivas da família Rubiaceae Juss. Na bacia do rio Tibagi, PR, Brasil. **Hoehnea**, v.42, n.2, p.289-336, 2015.
- FERREIRA, E.P.B.; PARTELLI, F.L.; DIDONET, A.D.; MARRA, G.E.R.; BRAUN, H. Crescimento vegetativo de *Coffea arabica* L. influenciado por irrigação e fatores climáticos no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.34, n.6, p.3235-3244, 2013.
- FERREIRA, M. S.; FONTES, M.P.F.; PACHECO, A.A. et al. Riscos à saúde de oligoelementos potencialmente tóxicos em solos urbanos da cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. **Environ Geochem Health**, v. 43, p. 3407–3427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00834-0>
- FERREIRA, R.T.; VIANA, A.P. et al. Intrapopulation recurrent selection in sour passion fruit by mixed models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, p. 158-166, 2016a.
- FERREIRA, R.T.; VIANA, A.P.; SILVA, F.H. et al. Seleção recorrente intrapopulacional em maracujazeiro-azedo via modelos mistos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.38, n.1, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-260/14>
- FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**. 4. Ed. London: SAGE, 2013.
- FILHO, T. L.; DELLA LUCIA; S. M.; SARAIVA, S. H.; SARTORI, M. A. Composição físico-química e qualidade sensorial de café conilon produzido no estado do Espírito Santo e submetido a diferentes formas de processamento. **Semana: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1723-1730, 2013.
- FONSECA, A. F. A.; SEDIYAMA, T.; CRUZ, C. D.; SAKAIYAMA, N. S.; FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; BRAGANÇA, S. M. Divergência genética em café conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 41, n. 4, p. 599-605, abr. 2006.
- FONSECA, W.O.; ZAPPI, D.; JARDIM, J.; AONA, L.Y.S. A família Rubiaceae no parque nacional de Boa Nova, Estado da Bahia, Brasil. **Hoehnea**, v. 47, p. 1- 42, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2236-8906-46/2019>.
- FRANKOWSKI, M. Aluminum uptake and migration from the soil compartment into *Betula pendula* for two different environments: A polluted and environmentally protected area of Poland. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.**, v.23, p.1398–1407, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5367-9>
- FRAZER, L. Titanium dioxide: Environmental white knight. *Environ Health Perspect.* 109: 174–177, 2001.

- FRITSCHÉ-NETO, R. et al. Updating the ranking of the coefficients of variation from maize experiments. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 1, p. 99-101, 2012.
- FYTIANOS, K.; KATSIANIS, G. et al. Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil. **Bulletin of environmental contamination and toxicology**, v. 67, n. 3, p. 0423-0430, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001280141>
- GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G. C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant and Soil**, v.72, n. 2, p. 335-350, 1983. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-6836-3_45
- GILES, J. A. D.; FERREIRA, A. D.; PARTELLI, F. L.; AOYAMA, E. M.; RAMALHO, J. C.; FERREIRA, A.; FALQUETO, A. R. Divergence and genetic parameters between *Coffea* sp. genotypes based in foliar morpho-anatomical traits. **Scientia Horticulturae**. n. 245, p.231-236, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.038>
- GILES, J.A.D.; PARTELLI, F.L.; FERREIRA, A.; RODRIGUES, J.P.; OLIOSI, G.; SILVA, F.H.L.. Genetic diversity of promising 'conilon' coffee clones based on morpho-agronomic variables. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 2437-2446, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170523>
- GOHRE, V.; PASZKOWSKI, U. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. **Planta**, 223, 1115–1122.
- GOMES, W. R.; RODRIGUES, W. P.; VIEIRA, H. D.; OLIVEIRA, M. G.; DIAS, J. R. M.; PARTELLI, F. L. Genetic diversity of standard leaf nutrients in *Coffea canephora* genotypes during phenological phases. **Genetics and Molecular Research**, v.15, n.4, p.1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr.15048839>
- GOMEZ, C.; DUSSERT, S.; HAMON, P.; HAMON, S.; KOCHKO, A.; PONCET, V. Current genetic differentiation of *Coffea canephora* Pierre ex A, Frohn in the Guineo-Congolian African zone: cumulative impact of ancient climatic changes and recent human activities. **BMC Evolutionary Biology**, v.9, n.7, p.167, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2148-9-167>
- GONZALI, S.; KIFERLE, C.; PERATA, P. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability, **Current Opinion in biotechnology**, n.44, p.16-26, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004>
- GOVAERTS, R.; ANDERSSON, L.; ROBBRECHT, E.; BRIDSON, D.; DAVIS, A.; SCHANZER, I.; SONKE, B. 2018. **World checklist of Rubiaceae**. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew [online]. Disponível em: < <https://www.wcsp.science.kew.org> > Acesso em dezembro de 2021.
- GOVAERTS, R.; RUHSAM, M.; ANDERSSON, L.; ROBBRECHT, E.; BRIDSON, D.; DAVIS, A.; SCHANZER, I.; SONKÉ, B. 2016. **World checklist of Rubiaceae**. The broad of trustees of Royal Botanical Gardens, Kew. Disponível em:< <http://www.kew.org/wcsp/rubiaceae> > Acesso em outubro de 2021.
- GRANT, C.A.; BROWN, K.R.; RACZ, G.Z.; BAILEY, L.D. Influence of source, timing and placement of nitrogen on grain yield and nitrogen removal of Sceptre durum wheat under reduced and conventional-tillage management. **Can. J. Plant Sci.**, v.81, p. 17-27, 2001. DOI: <https://doi.org/10.4141/P00-091>

- GRYNPAS, M.D.; HAMILTON, E.; CHEUNG, R. et al. Strontium increases vertebral bone volume in rats at a low dose that does not induce mineralisation defect. **Bone**, v.18, n.3, p.253 – 359, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/8756-3282\(95\)00484-X](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)00484-X)
- GUHA, M. M.; MITCHELL, R. L. The trace and major element composition of the leaves of some deciduous trees: I. Sampling techniques. **Plant and Soil**, p. 323-338, 1965.
- GUPTA, D. K.; DEB, U.; WALTHER, C.; CHATTERJEE, S. **Strontium in the Ecosystem: Transfer in Plants via Root System**. Behaviour of Strontium in Plants and the Environment, p. 1–18, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66574-0_1
- GUPTA, N.; YADAV, K.K.; KUMAR, V. et al. Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2927-2942, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047>
- HABIBA, U.; ALI, S.; FARID, M. et al. EDTA enhanced plant growth, antioxidant defense system, and phytoextraction of copper by *Brassica napus* L. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 2, p. 1534-1544, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3431-5>
- HALDIMANN, M.; ALT, A.; BLANC, A.; BLONDEAU, K. Iodine content in food groups. **J Food Compos**, v.8, n.6, p.461-471, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.06.003>
- HASHEMI, A.; ABDOLZADEH, A. & SADEGHIPOUR, H.R. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. **Soil Sci. Plant Nutr.**, 56:244-253, 2010.
- HERRERA, J. C.; COMBES, M. C.; ANTHONY, A.; CHARRIER, A.; LASHERMES, P. Introgression into the allotetraploid coffee (*Coffea arabica* L.): segregation and recombination of the *C. canephora* genome in the tetraploid interspecific hybrid (*C. arabica* x *C. canephora*). **Theor. Appl. Genet.**, v.104, p.661-668, 2002.
- HIDAYAH, N. N.; ABIDIN, S. Z. The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction: A review. **Minerals Engineering**, v. 121, p. 146-157, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.018>
- HU, Z. Y.; RICHTER, H.; SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: a review. **J. Plant Nutr.**, v.27, p.183, 2004.
- HU, Z.; WANG, Y.; ZHAO, D. The chemistry and applications of hafnium and cerium(IV) metal-organic frameworks. **Chem Soc Rev**, v.50, n.7, p.4629–4683, 2021. <https://doi.org/10.1039/d0cs00920b>
- HUDED, A.K.C.; JINGADE, P.; BYCHAPPA, M.; MISHRA, M.K. Genetic diversity and population structure analysis of Coffee (*Coffea canephora*) Germplasm Collection in India Gene Bank Employing SRAP and SCoT Markers, **International Journal of Fruit Science**, v.20, n.2, p. 757-784, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1768618>
- ICO - International Coffee Organization (2021) Global coffee trade. Disponível em: http://www.ico.org/trade_statistics.asp. Acesso em 05 de fevereiro de 2022.
- ICO. (2019a). International Coffee Organization. Botanic aspects. http://www.ico.org/pt/botanical_p.asp. Acesso em novembro de 2021.

- IVOGLO, M. G.; FAZUOLI, L. C.; OLIVEIRA, A. C. B.; GALLO, P. B.; MISTRO, J. C.; SILVAROLLA, M. B.; TOMA-BRAGHINI, M. Divergência genética entre progênies de café robusta. **Bragantia**, v.67, n.4, p.823-831, 2008.
- IZYDORCZYK, G.; LIGAS, B.; MIKULA, K.; WITEK-KROWIAK, A.; MOUSTAKAS, K.; CHOJNACKA, K. Biofortification of edible plants with selenium and iodine- A systematic literature review, **Science of the total environment**, v.754, n.141983, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141983>
- JAEGGI, M.E.P.C.; ZACARIAS, A.J.; PEREIRA, I.M. et al. Associations between morpho-agronomic traits in Conilon (*Coffea canephora*) 8142 with different green manure management. **Research Society and Development**, v. 9, n. 11, e2229119731, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9731>.
- JHA, M. K.; PANDA, R.; KUMAR, J.R. et al. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. **Hydrometallurgy**, v. 165, n.1, p. 2-26, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.035>
- KATHPALIA, R.; BHATLA, S. C. Plant Mineral Nutrition. Plant Physiology, **Development and Metabolism**, p.37–81, 2018 DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_2
- KELLER, C.; RIZWAN, M.; DAVIDIAN, J.C. et al. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 µM Cu. **Planta**, v.241, p.847–860, 2015.
- KIFERLE, C.; MARTINELLI, M.; SALZANO, A. M.; GONZALI, S.; BELTRAMI, S.; SALVADORI, P. A. et al. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants. **Front. Plant Sci.**, v.12, p.616868, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. PHOSPHORUS: FROM THE NUTRIENT TO POLLUTANT!. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1713-1721, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/223611706430>
- KLOCKENKÄMPER, R.; VON BOHLEN, A. **Total-reflection X-ray fluorescence analysis and related methods**. John Wiley & Sons, 2014.
- KLUG, B.; SPECHT, A.; HORST, W.J. Aluminium localization in root tips of the aluminium-accumulating plant species buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). **J. Exp. Bot.**, v.62, n.15, p.5453–5462, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/err222>
- KORNDÖRFER, G.; SOUZA, S. R. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**, cap. 15, 563-599, 2018.
- Krishnamurthy N, Gupta CK. Extractive Metallurgy of Rare Earths. 2a. ed. Boca Raton: CRC Press; 2016. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals
- KROHLING, C. A.; RAMOS, A. C.; EUTRÓPIO, F. J. **Toxidez de cloro em mudas de café arábica cultivadas em vasos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 41., 2015, Poços de Caldas. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2015. 2 p.
- KROHLING, C.A.; EUTRÓPIO, F.J.; FIGUEIRA, F.F.; CAMPOSTRINI, E.; DOBBSS, L.B.; RAMOS, A.C. **Níveis tóxicos de ferro em lavouras de café conilon (*Coffea canephora*) em solos de tabuleiros costeiros**, Coffee Science, v.11, n.2, p.255-266, 2016.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association, v.47, n. 260, p.583–621, 1952.

- KUZEL, S.; HRUBY, M.; CIGLER, P.; TLUSTOS, P.; VAN. P.N. Mechanism of Physiological Effects of Titanium Leaf Sprays on Plants Grown on Soil. **Biol Trace Elem Res.**, v.91, n.2, p.179-190.
- LAFETÁ, B.O.; CARVALHO, F.A.N.; ASSUNÇÃO, S.D.; SANTOS, M.A.; PERPÉTUO, I.A.; PIMENTA, I.A.; PENIDO, T.M.A.; VIEIRA, D.S. Crown quality and hipsometric relationships for Rubiaceae Family in water springs of Atlantic Forest fragment. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v4, n. 1, p. 402-410, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n1-035>
- LANA, R.M.Q. DE OLIVEIRA, S.A.; LANA, A.M.Q.; DE FARIA, M.V. Levantamento do estado nutricional de plantas de *Coffea arabica* L. pelo dris, na região do Alto Paranaíba- Minas gerais. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.34, p.1147-1156, 2010.
- LARA-ALMAZÁN, N.; ZARAZÚA-ORTEGA, G.; ÁVILA-PÉREZ, P.; CARREÑO -DE LEÓN, C.; BARRERA-DÍAZ, C.E. Multielemental analysis by total reflection X-ray fluorescence spectrometry and phytochelatin determination in aquatic plants. **X-Ray Spectrometry**, v. 50, n. 5, p. 414-424, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.3220>
- LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C. et al. Alocação de fotoassimilados em folhas e frutos de cafeeiro cultivado em duas altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1521-1530, 2007.
- LAVIOLA, B.G.; DIAS, L.A.S. et al. **Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes**. Embrapa Agroenergia-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2008.
- LAZOF, D.B.; GOLDSMITH, J.G.; RUFTY, T.W.; LINTON, R.W. Rapid uptake of aluminum into cells of intact soybean root tips (a microanalytical study using secondary ion mass spectrometry). **Plant Physiology**, v.106, p. 1107–1114, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.106.3.1107>.
- LEIGH, R.A.; WYN JONES, R.G. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. **New Phytol.** n.97, 1984.
- LEMONS, M.F.; PEREZ, C.; DA CUNHA, P.H.P.; FILGUEIRAS, P.R; PEREIRA, L.L.; DA FONSECA, A.F.A.; IFA, D.R.; SCHERER, R. Chemical and sensory profile of new genotypes of Brazilian *Coffea canephora*. **Food Chemistry**, v. 310, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125850>
- LEROY, T. et al. Reciprocal recurrent selection applied to *Coffea Canephora* Pierre .2. Estimation of genetic-parameters. **Euphytica**, v.74, n.1-2, p.121-128, 1994.
- LEUSCHNER, C. MOSER, G.; BERTSCH, C. et al. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. **Basic and Applied Ecology**, v. 8, n. 3, p. 219-230, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2006.02.004>
- LEVENE, H. **In Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling**, I. Olkin et al. eds., Stanford University Press, pp. 278-292.1960.
- LEYGRAF, C.; CHANG, T.; HERTING, G.; WALLINDER, I.O. The origin and evolution of copper patina colour. **Corrosion Science**, v.157, n.15, p.337-346, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.025>
- LI, S.W.; XUE, L.; XU, S.; FENG, H.; AN, L. 2009. Mediators, genes and signaling in adventitious rooting. **The Botanical Review**, v.75, n.2, p.230–47, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12229-009-9029-9>

- LIMA, L.F.; LIMA, P.B.; ALMEIDA-JR, E.B.; ZICKEL, C.S. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de *Guettarda platypoda* DC. (Rubiaceae). **Biota Neotropica**, v.10, n.1, p.156–160, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000100015>.
- LÓPEZ-LIMA, D.; CARRIÓN, G.; SÁNCHEZ-NAVA, P.; DESGARENNES, D.; VILLAIN, L. 2020. Fungal diversity and *Fusarium oxysporum* pathogenicity associated with coffee corky-root disease in Mexico. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. v.52, n.1, p. 276-292, 2020.
- LYU, S.; WEI, X.; CHEN, J. et al. Titanium as a beneficial element for crop production. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 597, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00597>
- MA, J.F. & YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cel. Molec. Life Sci.**, v.65,p.3049-3057, 2008.
- MA, J.F.; MIYAKE, Y. & TAKAHASHI, E. **Silicon as a beneficial element for crop plant**. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H., eds. Silicon in agriculture. Amsterdam, Elsevier, 2001. p.17-39
- MAKSIMOVIC, I. et al. Effect of yttrium on photosynthesis and water relations in young maize plants. **Journal of Rare Earths**, v. 32, n. 4, p. 372-378, 2014.
- MALAVOLTA, E. Nutrição mineral do cacauzeiro e cafeeiro. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola- Superior, 127p., 1997.
- MALAVOLTA, E. **Nutrition, fertilization and amendment for the coffee tree**. In: Rena, A.B., Malavolta E., Rocha M., Yamada, T. (Eds.). Coffee tree culture: Factors that affect the productivity, Potafos:Piracicaba, 165–274, 1986.
- MALAVOLTA, E.; FAVARIN, J.L.; MALAVOLTA, M.; CABRAL, C.P.; HEINRICH, R.; SILVEIRA, J.S.M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.37, n.7, p. 1017–1022, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700016>
- MALTSEV, A.S.; CHUPARINA, E.V.; PASHKOVA, G.V.; SOKOL'NIKOVA, J.V. et al. Features of sample preparation techniques in the total-reflection X-ray fluorescence analysis of tea leaves. **Food Chemistry**, v. 343, p. 128502, 2021.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128502>
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v.18, n.1, p.50–60, 1947.
- MARCOLAN, A. L. et al. **Cultivo dos cafeeiros Conilon e Robusta para Rondônia**. 3. ed. rev. atual. 61p. Porto Velho: Embrapa Rondônia, p. 67. 2009.
- MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. 1. ed. Brasília, DF: EMBRAPA Rondônia, 2015.
- MARGUÍ, E.; DALIPI, R.; BORGES, L.; DEPERO, L.E.; QUERALT, I. Possibilities and drawbacks of total reflection X-ray fluorescence spectrometry as a fast, simple, and cost-effective technique for multielement analyses of cosmetics. **Analytica chimica acta**, v. 1075, p. 27-37, 2019.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.05.005>
- MARIANO, E.D.; KELTJENS, W.G. Long-term effects of aluminum exposure on nutrient uptake by maize genotypes differing in aluminum resistance. **Journal Plant Nutr.**, v.28, p.323–333, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1081/PLN-200047625>

- MARRÉ, W. B.; PARTELLI, F. L.; ESPINDULA, M. C.; DIAS, J. R. M.; GONTIJO, I.; VIEIRA, H. D. Micronutrient accumulation in conilon coffee berries with different maturation cycles. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 39, p.1456-1462, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS2014064925>
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**; Academic Press Ltd.: London, UK, p. 1–889, 1995
- MARSCHNER, P.; MARHAN, S.; KANDELER, E. Microscale distribution and function of soil microorganisms in the interface between rhizosphere and detritosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 49, p. 174-183, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.033>
- MARSHALL, A.H.; COLLINS, R.P.; HUMPHREYS, M.W.; SCULLION, J. A new emphasis on root traits for perennial grass and legume varieties with environmental and ecological benefits. **Food Energy Secur**, v.5, p. 56-39, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.78>
- MARTINEZ, H. E. P.; CLEMENTE, J.M.; LACERDA, J.S. et al. Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, v. 61, p. 838-848, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461000009>
- MARTINS, A.L. **História do café**. São Paulo: Contexto. 2008. 316p.
- MARTINS, L. D. RODRIGUES, W.N.; MACHADO, L.S.; BRINATE, S.V.B. et al. Evidence of genetic tolerance to low availability of phosphorus in the soil among genotypes of *Coffea canephora*. **Genet. Mol. Res**, v. 14, p. 10576-10587, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4238/2015.September.8.19>
- MARTINS, L. D.; RODRIGUES, W. N.; MACHADO, L. S.; BRINATE, S. V. B.; COLODETTI, T. V.; FERREIRA, D. S.; COGO, A. D.; APOSTOLICO, M. A. et al. Genotypes of conilon coffee can be simultaneously clustered for efficiencies of absorption and utilization of N, P and K. **African Journal of Agricultural Research**, n.11, v.38, p.3633-3642, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11418>
- MARTINS, L. D.; TOMAZ, M. A.; AMARAL, J. F. T.; BRAGANÇA, S. M.; MARTINEZ, H. E. P. Efficiency and response of conilon coffee clones to phosphorus fertilization. **Revista Ceres**, n.60, v.3, p.406-411. 2013a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000300014>
- MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; DO AMARAL, J.F.T.; CHRISTO, L.F.; RODRIGUES, W.N.; COLODETTI, T.V.; BRINATI, S.V.B. Alterações morfológicas em clones de cafeeiro conilon submetidos a níveis de fósforo. **Sci. Plena**, v.9, n.4, 2013b.
- MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; LIDON, F.J.C.; DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. Plants. **Climatic change**, v. 126: p. 1-11, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1236-7>
- MARTINS, Q. M.; PARTELLI, F. L.; GOLYNSKI, A.; PIMENTEL, N. S.; FERREIRA, A.; BERNARDES, C. O.; RIBEIRO BARROS, A. I.; RAMALHO, J. C. Adaptability and stability of *Coffea canephora* genotypes cultivated at high altitude and subjected to low temperature during the winter. **Scientia Horticulturae**, n.252, p. 238-242, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.04429>
- MATEUS, M.P.B.; TAVANTI, R.F.R.; TAVANTI, T.R.; SANTOS, E.F.; JALAL, A.; DOS REIS, A.R. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants.

- Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.209, n.111772, p.1-10, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>
- MAURIN, O.; DAVIS, P.A.; CHESTER, M.; MVUNG, E.F.; JAUFEEERALLY-FAKIM, Y.; FAY, M.F. Towards a phylogeny for *Coffea* (Rubiaceae): Identifying well-supported lineages based on nuclear and plastid DNA sequences. **Annals of Botany**, v. 100, n. 7, p. 1565-1583, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcm257>
- MEDRANO MACÍAS, J.; LÓPEZ CALTZONTZIT, M. G.; RIVAS MARTÍNEZ, E. N. et al. Enhancement to Salt Stress Tolerance in Strawberry Plants by Iodine Products Application. **Agronomy**, v.11, p.602, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030602>
- MEDRANO-MACÍAS, J.; KEIJA-MARTINEZ, P.; GONZÁLEZ-MORALES, S.; JUÁREZ-MALDONADO, A.; BENAVIDES-MENDOZA, A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops, **Frontiers in Plant Science**, v.7, n. 1146, p. 1-20, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>
- MELO, B.; SOUSA, L.B. Biology of reproduction *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre [Biologia da reprodução de *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre] Revista Verde, v.6, p.1-7, 2011.
- MELO, N.C.; RIBEIRO, F.; COSTA, H.M.S.; SOUZA, F.J.L. et al. Conservação do solo: um estudo de caso sobre o processo de ensino e aprendizagem no campus agrícola do Instituto Federal do Amapá. **Research Society and Development**, v.10, n.6, e22810615723, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15723>
- MENDES, A. J. T. Observações Citológicas em *Coffea*. VI. Desenvolvimento do endosperma e do embrião em *Coffea arabica* L. **Bragantia** 2 p. 115-128, 1942.
- MENDOZA, H.; RAMÍREZ, B.R.; JIMENÉZ, L.C. **Rubiaceae de Colombia Guía Ilustrada de Géneros**. Bogotá, Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia, 351p. 2004.
- MERLO, P. M. S. **Conilon capixaba: 100 anos de desafios, crescimento e evolução**. Vitória, ES: Bumerangue Produção de Comunicação. 2012. 100 p.
- MEUNIER, P.J.; LORENC, R.S. et al. Strontium ranelate: New efficient anti-osteoporotic agent for treatment of vertebral osteoporosis in postmenopausal women. **Osteoporosis International**, v. 13, n. Suppl. 3, p. S34, 2002. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2268/82068>. Acesso em março de 2022.
- MIGUEL, P. S. B.; DA ROCHA, W.S.D.; DE CARVALHO, C.A. et al. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES revista**, v. 24, n. 1, p. 13-29, 2010.
- MISHRA, M. K.; SLATER, A. Recent advances in the genetic transformation of coffee. **Biotechnology research international**, v. 2012, 17p., 2012. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/580857>
- MISTRO, J.C.; DE RESENDE, M.D.V.; FAZUOLI, L.C.; VENCOVSKY, R. Effective population size and genetic gain expected in a population of *Coffea canephora*. *Crop Breeding Appl. Biotechnology*, v.19, n.1, p.1-7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n1a01>
- MOHIUDDIN, M.; IRSHAD, M.; PING, A.; HUSSAIN, Z.; SHAHZAD, M. Bioavailability of iodine to mint from soil applied with selected amendment. **Env. Poll. Bioaval.** v. 31, p.138–144, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/26395940.2019.1588077>

- MOJENA, R. Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation. **The Computer Journal**, v. 20, n. 4, p. 359-363, 1977.
- MONTAGNON, C., LEROY, T., CILAS, C. et al. Heterozygous genotypes are efficient testers for assessing between-population combining ability in the reciprocal recurrent selection of *Coffea canephora*. **Euphytica**, v.160, p. 101–110, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9561-9>
- MONTAGNON, C.; LEROY, T.; YAPO, A. Diversité génotypique et phénotypique de quelques groupes de caféiers (*Coffea canephora* Pierre) en collection. **Café Cacao Thé**, Paris, v.36, p.187-197, 1992.
- MORAES, M.S.; ROCHA, R.B.; TEIXEIRA, A.L. et al. Adaptability of *Coffea canephora* Pierre ex Froehner genotypes in the Western Amazon. **Ciência Rural**, v.50, n.1, p. 1-10, e20190087, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20190087>
- MORAES, M.S.; TEIXEIRA, A.L.; RAMALHO, A.R et al. Characterization of gametophytic self-incompatibility of superior clones of *Coffea canephora*, **Genetic Molecular Resource**, v.17, p. 1-11, 2019.
- MORAIS, J.A.M.; ROCHA, R.B.; ALVES, E.A.; ESPÍNDULA, M.C. et al. Beverage quality of *Coffea canephora* genotypes in the western Amazon, Brazil. **Acta Scientiarum**, v.43, p. 1-9, e52095, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i.52095>
- MORAIS, L.E.; CAVATTE, P.C.; MEDINA, E.F.; SILVA, P.E. M.; MARTINS, S.C.V.; VOLPI, P.S.; ANDRADE JÚNIOR, S.; MACHADO FILHO, J.A.; RONCHI, C.P.; DAMATTA, F.M. The effects of pruning at different times on the growth, photosynthesis and yield of Conilon coffee (*Coffea canephora*) clones with varying patterns of fruit maturation in southeastern Brazil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.48, n.2, p.210-221, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479711001141>
- MORALES, E.A.; VALOIS, A.C.C.; NASS, L.L. **Recursos genéticos vegetales**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa- Cenargen, 78 p., 1997.
- MOSSOR-PIETRASZEWSKA, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. **Acta Biochim. Pol.**, v.48, 673–686, 2001.
- MUSOLI, C.P.; CUBRY, P.; ALUKA, P.; BILLOT, C.; DUFOUR, M.; DE BELLIS, F. et al. Genetic differentiation of wild and cultivated populations: Diversity of *Coffea canephora* Pierre in Uganda, **Genome**, n. 52, p. 634-646, 2010.
- NARDUCCI, T.S.; YARED, J.A.G.; BRIENZA JÚNIOR, S.; DA SILVA, V.C.S.; SOUZA, S.R. Variabilidade de fósforo e potássio disponível no solo em diferentes espaçamentos de plantio de Taxi branco (*Tachigali vulgaris*), **Agri- Environmental Sciences**, v.5, e019006, 2019. DOI: <https://doi.org/10.36725/agries.v5i0.1442>
- NASCIMENTO, V. L.; SOUZA, B. C. O. Q.; LOPES, G., GUILHERME, L.R.G. On the role of iodine in Plants: A commentary on Benefist of this element. **Frontiers in Plant Science**, v.13, n. 836835, p. 1-4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.836835>
- NASCIMENTO, W. M. O.; GURGEL. F.L.; BHERING, L.L. et al. Pre-breeding of camucamuzeiro: a study of genetic parameters and dissimilarity. **Revista Ceres**, v. 61, p. 538-543, 2014.
- NEENU, S.; KARTHIKA, K.S.; PHILIP, P.S.; KUMAR, A.K.S. Role of chlorine in coconut nutrition, **Harit Dhara**, c.3, n.1, p.1-6, 2020.

- NETO, A.P.; FAVARIN, J.L.; HAMMOND, J.P.; TEZOTTO, T.; COUTO, T.Z.H. Analysis of phosphorus use efficiency traits in *Coffea* genotypes reveals *Coffea arabica* and *Coffea canephora* have contrasting Phosphorus uptake and utilization efficiencies, **Frontiers in Plant Science**, v7, n. 408, p. 1-10, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.00408>
- NOWAK, M. D.; DAVIS, A. P.; ANTHONY, F.; YODER, A. D. Expression, and trans-specific polymorphism of self-incompatibility RNases in *Coffea* (Rubiaceae). **PLoS ONE**, v.6, n.6, p.1-11, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021019>
- NUNES, E.N.; FERNANDES, Y.T.D.; MONTENEGRO, I.N.A.; ALVES, C.A.B.; SOUTO, J.C. Translocation efficiency of nutrients in plants, **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento sustentável**, v.8, n.5, p. 90-95, 2013.
- NUNES-NESI, A.; BRITO, D.S.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. et al. The complex role of mitochondrial metabolism in plant aluminum resistance. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 6, p. 399-407, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.12.006>
- NYHOLM, N.E.I.; TYLER, G., Rubidium content of plants, fungi and animals closely reflects potassium and acidity conditions of forest soils, **For. Ecol. Manage.**, v.134, p. 89, 2000.
- OKSANEN, J. et al. Package ‘vegan’. **Community ecology package, version**, v. 2, n. 9, p. 1-295, 2013.
- OLIOSI, G.; PARTELLI, F.L.; SILVA, C.A. et al. Seasonal variation in leaf nutrient concentration of conilon coffee genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 1, p. 74-85, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700016>
- OLIOSI, G.; RODRIGUES, J.O. et al. Fluorescência transiente da clorofila e crescimento vegetativo em cafeeiro conilon sob diferentes fontes nitrogenadas. **Coffee Science**, v.12, n.2, p.248-259, 2017.
- OLIVEIRA, J.A.; SALIMENA, F.R.G.; ZAPPI, D.C. Rubiaceae da Serra Negra, Minas Gerais, Brasil. **Rodriguésia**, v. 65, n. 2, p. 471-504, 2014. Disponível em: <http://rodriguesia.jbrj.gov.br/>. Acesso em dezembro de 2021.
- OLIVEIRA, L.N.L.; ROCHA, R.B.; FERREIRA, F.M.; SPINELLI, V.M.; RAMALHO, A.R.; TEIXEIRA, A.L. Selection of *Coffea canephora* parentes from the botanical varieties Conilon and Robusta for the production of intervarietal hybrids, **Ciência Rural, Santa Maria**, v.48, n.4, p. 1-7, e20170444, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20170444>
- OLIVEIRA, N.S.; CARVALHO FILHO, J.L.S.; SILVA, D.O.; Pastoriza, R.A. et al. Selection and genetic parameters of coriander progenies with heat tolerance. **Horticultura Brasileira**, v.33, p. 319-323, 2015.
- PAASIKALLIO, A.; RANTAVAARA, A.; SIPPOLA, J. The transfer of cesium-137 and strontium-90 from soil to food crops after the Chernobyl accident. **Science of the total environment**, v. 155, n. 2, p. 109-124, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90285-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90285-2)
- PAIVA, R. F.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; REZENDE, J. C.; FERREIRA, A. D.; CARVALHO, A. M. Comportamento de cultivares de cafeeiros *C. arabica* L. enxertados sobre cultivar ‘Apoatã IAC 2258’ (*Coffea canephora*). **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 155-1160, 2012.
- PANDA, S.K.; CHOUDHURY, S. Chromium stress in plants. **Braz. J. Plant Physiology**, v.17, n.1, p.95-102, 2005.

- PARTELLI, F. L.; ESPINDULA, M. C.; MARRÉ, W. B.; VIEIRA, H. D. Dry matter and macronutrient accumulation in fruits of conilon coffee with different ripening cycles. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.38, v.1, p.214-222, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-0683201400010002134>
- PARTELLI, F. L.; GOMES, W. R.; OLIVEIRA, M. G.; DIAS, J. R. M.; ESPINDULA, M. C. Normas foliares e diagnóstico nutricional do cafeeiro na pré-florada e granação, no Espírito Santo. **Coffee Science**, n.11, v.4, p.544-554, 2016. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v11i4.1177>
- PARTELLI, F. L.; MARRÉ, W. B.; FALQUETO, A. R.; VIEIRA, H. D.; CAVATTI, P. C. Seasonal vegetative growth in genotypes of *Coffea canephora*, as related to climatic factors. **Journal of Agricultural Science**, n.5, v.8, p.108-116, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v5n8p10833>
- PARTELLI, F. L.; OLIVEIRA, M. G.; COVRE, A. M.; VIEIRA, H. D.; DIAS, J. R. M.; BRAUN, H. Nutritional standards and nutritional diagnosis of the Conilon coffee plants in phenological growth stages. **Journal of Plant Nutrition**, n.41, v.19, p.1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1510513>
- PARTELLI, F.L.; GILES, J.A.D.; OLIOSI, G.; COVRE, A.M.; FERREIRA, A.; RODRIGUES, E.V.M. Tributun: A coffee cultivar developed in partnership with farmers. **Crop Breed. Appl. Biotechnol.** v.20, n.2, p.1-4, e30002025, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n2c21>
- PARTELLI, F.L.; OLIOSI, G.; DALAZEN, J.R.; DA SILVA, C.A.; VIEIRA, H.D.; ESPINDULA, M.C. Proportion of ripe fruit weight and volume to green coffee: Differences in 43 genotypes of *Coffea canephora*, **Agronomic Application of Genetic Resources**, p.1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20617>
- PASHKOVA, G.V.; CHUBAROV, V.M.; AKHMETZHANOV, T.F. et al. Total-reflection X-ray fluorescence spectrometry as a tool for the direct elemental analysis of ores: Application to iron, manganese, ferromanganese, nickel-copper sulfide ores and ferromanganese nodules. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 168, p. 105856, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105856>
- PEDRO, F. C. et al. Comportamento agrônômico de progênies F4 de cafeeiros oriundos do cruzamento entre os cultivares Mundo Novo e Catuaí. **Revista Ceres**, v.58, n.3, p.315-322, 2011.
- PEDROSA, A.W.; MARTINES, H.E.P.; CRUZ, C.D.; DAMATTA, F.M.; CLEMENTE, J.M.; NETO, A.P. Characterizing zinc use efficiency in varieties of arabica coffee, **Acta Scientiarum**, v.35, n.3, p.343-348, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.16322>
- PELEJA, V.L.; SOUZA, F.I.B.; REGO, A.K.C.; DA SILVA JÚNIOR, M.L.; FURTADO, A.C.S.; FELSEMBURGH, C.A.; TRIBUZY, E.S. Aluminium interference on radicular growth, absorption and phosphor accumulation in paricá plants, *Ibero-American Journal of Environmental Sciences*, v.11, n.1, p.1-8, 2020 DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0001>
- PENDERGAST, M. Coffee second only to oil? Is coffee really the second largest commodity? Mark Pendergrast investigates and finds some startling results. **Tea & Coffee Trade Journal**, n.4, p.38-41, 2009.
- PEREIRA, A. A. et al. Descrição do crescimento vegetativo do cafeeiro cultivar Rubi MG 1192, utilizando modelos de regressão. **Coffee Science**, v.9, n.2, p. 266-274, 2014.

- PETERNELLI, L. A. et al. Análise dos coeficientes de endogamia e de parentesco para qualquer nível de ploidia usando o pacote estatístico R. **Bragantia**, v. 68, p. 849-855, 2009.
- PICINI, A. G.; CAMARGO, M.B.P.; ORTOLANI, A.A. et al. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, v. 58, p. 157-170, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051999000100015>
- POLTRONIERI, Y.; CECON, P.R.; PEREIRA, V.V.; LOPES, L.M.V. et al. **Eficiência de uso de macronutrientes e correlação com o crescimento em genótipos de café**. X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil- ISSN:1984-9249, 2019.
- POSCHENRIEDER, C.; GUNSÉ, B.; CORRALES, I.; BARCELÓ, J. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. **Science of the total environment**, v. 400, n. 1-3, p. 356-368, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.003>
- POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G.; GUIMARÃES, T.G.; FIGUEIREDO, F.C.; ARAÚJO, A.R. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, n.33, p. 1705-1714, 2009.
- QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATIÑO, S. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, n. 5, p. 1515-1541, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>
- RAHMAN, M.A.; LEE, S.H.; JI, H.C.; KABIR, A.H.; JONES, C.S.; LEE, K.W. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminium toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities, **International Journal of Molecular Sciences**, n.19, 3073, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19103073>
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**, 1ª ed.; International Plant Nutrition Institute: Piracicaba, 2011.
- RAJAPAKSHA, D.; WADUGE, V.; PADILLA-ALVAREZ, R.; KALPAGE, M.; RATHNAYAKE, R.M. N.P.; MIGLIORI, A. et al. XRF to support food traceability studies: Classification of Sri Lankan tea based on their region of origin. **X-Ray Spectrometry**, v.4, n.4, p.220-224, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/xrs.2748>
- RAMALHO, A. R. et al. **Cultivares de cafeeiros Conilon e Robusta indicadas para o Estado de Rondônia**. Comunicado Técnico, v. 348, p. 1-10, abr. 2009.
- RAMALHO, A. R.; ROCHA, R.B.; SOUZA, F.F. et al. Progresso genético da produtividade de café beneficiado com a seleção de clones de cafeeiro 'Conilon'. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 516-523, 2016.
- RAMALHO, A.R.; ROCHA, R.B.; SOUZA, F.F.; TEIXEIRA, A.L.; VENEZIANO, W. Progresso genético com a seleção de clones de conilon no estado de Rondônia, VII simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil, 2011.
- RAMALHO, J.D.C.; RODRIGUES, A.P.D.; SEMEDO, J.M.N.; PAIS, I.M.P.R.; MARTINS, L.D.; COSTA, M.C.S.; LEITAO, A.E.B.; FORTUNATO, A.S.; BATISTA-SANTOS, P.; PALOS, I.; TOMAZ, M.A. et al. Sustained photosynthetic performance of *Coffea* spp. Under long-term enhanced [CO₂]. **Plos One**, 8: e82712, 2013.

- RAMALHO, M.A.P.; SANTOS, J.B.; ZIMMERMAN, M.J.O. **Genética quantitativa em plantas autógamas: aplicações ao melhoramento do feijoeiro**. Goiânia: UFG, 1993. 271p
- RAMALHO, T.O.; FIGUEIRA, A.R.; SOTERO, A.J.; WANG, R. et al. Characterization of Coffee ringspot virus-Lavras: A model for an emerging threat to coffee production and quality. **Virology**, v.464-465, p.385-396, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.virol.2014.07.031>
- RAMÍREZ-BUILES, V.H.; KÜSTERS, J.; DE SOUZA, T.R.; SIMMES, C. Calcium nutrition in Coffee and its influence on Growth, Stress Tolerance, Cations Uptake, and Productivity, **Frontiers in Agronomy**, v.2, n. 590892, 2020, DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.590892>
- REBÊLO, A. G.D.M. MONTEIRO, M.T.F.; FERREIRA, S.J.F.; RÍOS-VILAMIZAR, E.A. et al. BIOGEOQUÍMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA LITEIRA EM AMBIENTE DE FLORESTA NATURAL NA AMAZÔNIA CENTRAL. **Química Nova**, v. 44, p. 1252-1260, 2021.DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170789>
- REBÊLO, A.G.D.M.; MONTEIRO, M.T.F.; FERREIRA, S. J. F.; RÍOS-VILLAMIZAR, E. A.; QUESADA, C.A.N.; & DUVOISIN JUNIOR, S. Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia central. **Química Nova**, v. 43, n. 5, p.534-539, 2020.
- REGINSTER, J-Y.; SAWICKI, A.; DEVOGELAER, J.P. et al. Strontium ranelate reduces the risk of hip fracture in women with postmenopausal osteoporosis. **Osteoporosis International**, v. 13, n. Suppl. 3, p. S14, 2002.Disponível em: <https://hdl.handle.net/2268/81717>. Acesso em março de 2022.
- RÊGO, M. M. et al. Pollen tube behavior in yellow passion fruit following compatible and incompatible crosses. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 101, n. 5, p. 685-689, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001220051531>
- REIS, R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Sci. Agric.** v.59, p.537-542, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000300019>
- RENA, A. B.; MAESTRI, M. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987.
- RENGEL, Z. Aluminium cycling in the soil-plant-animal-human continuum. **Biometals**, v.17, p.669-689, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-004-1201-4>
- RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.
- RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. B. do; JANK, L. **Melhoramento de forrageiras tropicais**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2008. 293p.
- RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C. & KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistemas plantio direto. **Ciência Rural**, 38:576-586, 2008.
- RIBEIRO, B. B. et al. Avaliação química e sensorial de blends de *Coffea canephora* Pierre e *Coffea arabica* L. **Coffee Science**, 9(2):178-186, 2014.
- RIBEIRO, R.V.; SILVA, L.; RAMOS, R.A.; ANDRADE, C.A.; ZAMBROSI, F.C.B.; PEREIRA, S.P. O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, n.35, p.939-948, 2011.

- RIBEIRO, W. R. PINHEIRO, A. A.; FERREIRA, D. S.; GONÇALVES, M. S. et al. Water deficit as a limiting factor to the initial growth of coffee conilon variety diamante. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 22, n. 5, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/41156>
- RICKARD, W.H.; PRICE, K.R. Strontium-90 in Canada goose eggshells and reed canary grass from the Columbia River, Washington. **Environ Monit Assess**, v.14, p.71–76, 1990.
- ROBBRECHT E. 1988. **Tropical woody Rubiaceae. Opera Botanica Belgica** v.1, p.1–271.
- ROBBRECHT, E. 2018. Monographic and sistematic studies in Rubiaceae. National Botanic Garden of Belgium. Disponível em: <http://www.br.fgov.be/RESEARCH/PROJECTS/rubiaceae.php>. Acesso em novembro de 2021.
- ROCHA, R. B. et al. **Melhoramento de *Coffea canephora*: Considerações e metodologias**. In: MARCOLAN, L. A.; ESPINDULA, M. C. (Eds.). **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, p.101-1126, 2015.
- ROCHA, R.B.; TEIXEIRA, A.L.; RAMALHO, A.R.; ESPÍNDULA, M.C. et al. *Coffea canephora* breeding: estimated and achieve gains from selection in the Western Amazon, Brazil, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.51, n.5, p. 1-11, e20200713, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200713>
- RODRIGUES, R. R. et al. Crescimento inicial do cafeeiro conilon sob déficit hídrico no solo. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.33-38, 2016.
- [RODRIGUES, W.N.; TOMAZ, M.A.; FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A. et al. Estimativa de parâmetros genéticos de grupos de clones de café conilon. **Coffee Science**, v.7, n.2, p.177-186, 2012.](#)
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**, 1ª ed.; Embrapa Monitoramento por Satélite: Campinas, 2010.
- ROZANE, D.E.; MELLO, P.R.; FACINCANIM, F.C.; WILLIAM, N. Eficiência de absorção, transporte e utilização de macronutrientes por porta enxertos de caramboleira, cultivados em soluções nutritivas, **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v.31, n.4, p.1020-1026, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000400012>
- RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; WATT, M.; RICHARDSON, A.E. Plant roots: understanding structure and function in an ocean of complexity. **Annals of Botany**, v. 118, n. 4, p. 555-559, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw192>
- SAKIYAMA, N.S.; PEREIRA, A.A.; ZAMBOLIM, L. Melhoramento de Café Arábica. IN: **Melhoramento de espécies cultivadas** (editor) Aluizio Borém, Viçosa: UFV, 2005, 817, p.:il
- SALLES, R. A.; JORDAIM, R.B.; COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N de et al. Nutritional characteristics of conilon coffee genotypes grown in transition altitude with water management in soil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145013721>
- SAMANTARAY, S.; ROUT, G.R.; DAS, P. Role of chromium on plant growth and metabolism. **Acta Physiologiae plantarum**, v.20, n.2, p. 201-212, 1998.
- SANTIN, M.R.; COELHO, M.C.; SAYD, R.M.; PEIXOTO, J.R. et al. Yield, maturation cycle, and estimates of genetic parameters of robusta coffee genotypes under irrigation in the Cerrado. **Crop Breeding Appl. Biotechnology**, v.19, p. 387-394, 2019.

- SANTOS, L.C.S.; DA SILVA, G.A.M.; ABRANCHES, M.O.; ROCHA, J.L.A. O papel do silício nas plantas. *Research, Society and Development*, v.10, n.7, e3810716247, 2021a. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16247>
- SANTOS, M.M.; SILVA, C.S.; OZA, E.F. et al. Concentration of Nutrients in Leaves, Flowers, and Fruits of Genotypes of *Coffea canephora*. **Plants**, v. 10, n. 12, p. 2661, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10122661>
- SCHMIDT, R.; SILVA, C.A.; DUBBERSTEIN, D.; DIAS, J.R.M. et al. Genetic Diversity Based on Nutrient Concentrations in Different Organs of Robusta Coffee. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 640, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030640>
- SCOTTI-CAMPOS, O.; PAIS, I.P.; RIBEIRO-BARROS, A.I. MARTINS, L.D. et al. Lipid profile adjustments may contribute to warming acclimating and to heat impact mitigation by elevated [CO₂] in *Coffea* spp. **Environmental Exp. Bot**, v.167, e103856, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103856>
- SENRA, J.F.B.; FERRÃO, M.A.G.; MENDONÇA, R.F.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G. et al. Genetic variability of access of the active germplasm bank of *Coffea canephora* of Incaper in Southern Espírito Santo. **Journal Genetic Resource**, v.6, n.2, p.172-184, 2020.
- SERRANO, L.A.L.; DA SILVA, V.M.; FORMENTINI, E.A. Uso de compostos orgânicos no plantio do cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, v.58, p.100-107, 2011.
- SERUFF, L.A.; VERA, Y. **Estudo da separação do ítrio em meio clorídrico pela técnica de extração por solvente**. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belo Horizonte-MG, 2019.
- SHALTOUT, A.A.; MOHARRAM, M.A.; & MOSTAFA, N.Y. Wavelength dispersive X-ray fluorescence analysis using fundamental parameter approach of *Catha edulis* and other related plant samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 67, 74–78, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.01.004>
- SHANKER, A.K.; CERVANTES, C.; LOZA-TAVERA, H.; AVYDAINAYAGAM, S. Chromium toxicity in plants. **Environment International**, n.31, p. 739-753, 2005.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, v.52, n. 3, p.591-611, 1965.
- SHTANGEEVA, I. Accumulation of scandium, cerium, europium, hafnium, and tantalum in oats and barley grown in soils that differ in their characteristics and level of contamination. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18247-y>
- SHTANGEEVA, I.; BERTINS, M.; VIKSNA, A.; CHELINABOV, V.; GOLOVIN, A. Stress effects on Rubidium on Two Plant Species (Field Experiment), **Russian Journal of Plant Physiology**, v.68, n.1, p. s131-s139, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1134/S102144372107013X>
- SILVA JÚNIOR, E.C.; WADT, L.H.O.; SILVA, K.E.; LIMA, R.M.B. et al. Geochemistry of selenium, barium, and iodine in representative soils of the Brazilian Amazon rainforest, *Science of the Total Environment*, v.828, 154426, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154426>.

- SILVA, D.O.; FERREIRA, F.M.; ROCHA, R.B. et al. Genetic progress with selection of *Coffea canephora* clones of superior processed coffee yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48. N.3, p. 1-7, e20170443, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20170443>
- SILVA, D.R.; SILVA, D.R.; DAMACENO, J.B.D.; ANDRADE, R.A. et al. Compatibility test and agronomic performance of coffee genotypes (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner), in the State of Rondônia, Brazil. **Journal Agri. Science**, v.11, p.162-170,2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n15p162>.
- SILVA, L.O.E.; SCHMIDT, R.; VALANI, G.P.; FERREIRA, A. et al. Root trait variability in *Coffea canephora* genotypes and its relation to plant height and crop yield. **Agronomy**, v.10, n.9, p.1934, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091394>
- SILVA, M.O.; HONFOGA, J.N.B.; MEDEIROS, L.L.; MADRUGA, M.S.; BEZERRA, T.K.A. Obtaining bioactive compounds from the coffee husk (*Coffea arabica* L) Using different extraction methods. **Molecules**, v.26, n.1, p.46, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26010046>
- SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. **Indian Journal Genetic Plant Breeding**, v.41, p.237-245, 1981.
- SINGH, S.; KUMAR, M. Heavy Load of Soil, Water, and Vegetables In Peri-Urban Delhi. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.120, p. 79-91, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9050-3>
- SINGH, S.; TRIPATHI, D.K.; SINGH, S.; SHARMA, S.; DUBEY, N.K.; CHAUHAN, D.K.; VACULÍK, M. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. **Environ. Exp. Bot.**, v. 137, p.177–193, 2017.
- SMOLEN, S.; KOWALSKA, I.; SADY, W. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system. **Scientia Horticulturae**, v.166, p. 9-16, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.11.011>
- SNEDECOR, G. W. **Em Statistical methods**, p. 422, v.4. The Iowa State College Press, Ames. Iowa. USA, 1945.
- SOUZA, C.A.; ROCHA, R.B.; SANTOS, M.R.A.; LOPES, T.A. et al. *In vitro* pollination of gametophytic microscopy for characterization of gametophytic self-incompatibility of *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.21, n.4, p. 1-8, e37692142, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332021v21n4a51>
- SOUZA, C.A.; ROCHA, R.B.; ALVES, E.A.; ESPINDULA, M.C.; RAMALHO, A.R.; TEIXEIRA, A.L.; FERRÃO, M.A.G. Componentes genéticos do desenvolvimento e maturação de frutos de *Coffea canephora* Pierre ex. A. Froehner. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, p.355-364, 2017.
- SOUZA, F. D. F. **Divergência genética em clones de café conilon (*Coffea canephora* Pierre.) coletados em Rondônia**. Porto Velho-RO: Embrapa Rondônia, 3p. (Embrapa Rondônia. Comunicado Técnico, 289). 2005.
- SOUZA, F.F.; CAIXETA, E.T.; FERRÃO, L.F.V.; PENA, G.F. et al. Molecular diversity in *Coffea canephora* germoplasm conserved and cultivated in Brazil, **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 13:221-227, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-70332013000400001>

- SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica Sistemática: Guia ilustrado para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG II**. Instituto Plantarum, Nova Odessa. p. 640. 2008.
- STARLING, L.C.T.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N.; REINICKE, T.M. et al. Genetic diversity in nutritional parameters in response to drought of *Coffea canephora* cultivated in Rondonia state, Brazil. **Genetic Molecular Resource**, v.18, p. 1-12, 2019.
- STOFFELEN, P.; NOIROT, M.; COUTURON, E.; BONTEMS, S.; DE BLOCK, P.; ANTHONY, F. *Coffea anthonyi*, a new self-compatible Central African coffee species, closely related to an ancestor of *Coffea arabica*. **Taxon**, v. 58, n.1, p.133-140, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1002/tax.581014>
- STOSNACH, H. On-site analysis of heavy metal contaminated areas by means of total reflection X-ray fluorescence analysis (TXRF). **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 61, n. 10-11, p. 1141-1145, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2006.06.007>
- STRACHAN, S. Trace elements. **Current Anaesthesia & Critical Care**, v.21, p. 44-48, 2010.
- SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS - SUFRAMA. Amazônia Ocidental. 2017. Disponível em: <http://www.suframa.gov.br/invest/zona-franca-de-manaus-amazonia-ocidental.cfm>. Acesso em: dezembro de 2021.
- SUSTR, A.; SOUKUP, A.; TYVLOVA, E. Potassium in root growth and development. **Plants**, n.8, v. 435, p. 1-16, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/plants8100435>
- SWAINE, D.J. Why trace elements are import. **Fuel Processing Technology**, v.65, n.66, p21-23, 2000.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal, 6th ed.; Porto Alegre: Artmed, Brazil, 2017.
- TAKASHI, H.; KOPRIVA, S.; GIORDANO, M.; SAITO, K.; HELL R. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. **Annual Review of Plant Biology**, v.62, p.157–184, 2011.
- TAYLOR, C. M.; CAMPOS, M.T.V.A.; ZAPPI, D. Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil: Rubiaceae. **Rodriguésia**, v. 58, n. 3, p. 549-616, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rod/a/LQcBFWLHSf8GZrHPnbMwNZN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em outubro de 2021.
- TEAM, R. D. C. **R Programming. R Development Core Team**, 2021.
- TEAM, RStudio. **RStudio: integrated development for R**. Boston, MA: RStudio, PBC, 2020.
- TEIXEIRA, A.L.; TOCHA, R.B.; ESPINDULA, M.C.; RAMALHO, A.R.; VIEIRA JÚNIOR, J.R. et al. Amazonian Robustas- new *Coffea canephora* coffee cultivars for the western Brazilian Amazon. **Crop Breeding Appl. Biotechnology**, v.20, n.3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3c53>
- TEIXEIRA, L.G.V. Seleção precoce para produção de grãos em café arábica pela avaliação de caracteres morfológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.8, p.1110-1117, 2012.
- The Angiosperm Phylogeny Group. “An Ordinal Classification for the Families of Flowering Plants.” **Annals of the Missouri Botanical Garden**, vol. 85, no. 4, Missouri Botanical Garden Press, 1998, pp. 531–53. DOI: <https://doi.org/10.2307/2992015>. Disponível em:

<https://www.jstor.org/publisher/mobot?refreqid=excelsior%3A4c7efe0cb2186b18b6621a3c1f9057>.

Acesso em: novembro de 2021.

- TITO, G.A.; CHAVES, L.H.G.; DE VASCONCELOS, A.C.F. **Distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de cambre**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016 29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil
- TOMAZ, M. A., MARTINEZ, H. E. P., CRUZ, C. D. et al. Genetics differences in the efficiency of absorption, translocation and use of K, Ca and Mg in grafted seedlings of coffee. **Ciênc. Rural**, v.38, p.1540–1546, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-847820080006_00008
- TOMAZ, M. A.; MARTINEZ, H. E. P.; RODRIGUES, W. N. et al. Eficiência de absorção e utilização de boro, zinco, cobre e manganês em mudas enxertadas de cafeeiro. **Rev. Ceres**, 58:108-114, 2011
- TOMAZ, M. A.; MARTINEZ, H. E. P.; RODRIGUES, W. N.; FERRARI, R. B.; PEREIRA, A. A.; SAKIYAMA, N. S. Efficiency of absorption and utilization of boron, zinc, copper and manganese in grafted coffee seedlings. **Rev. Ceres**, v.58, p. 108–114, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000100016>
- TOMAZ, M.A.; SILVA, S.R.; SAKIYAMA, N.S.; MARTINEZ, H.E.P. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista brasileira de Ciência do solo**, v.27, p.885-892, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500013>
- TORRES, J.D.; ESPÍNDULA, M.C.; ARAÚJO, L.F.B.; MARCOLAN, A.L.; ROCHA, R.B. Grain yield of coffee plants fertilized with different doses of 20-00-20 NPK formulation under rainfed conditions, **Rev. Caatinga**, v.34, n.2, p. 486-493, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n225rc>
- TRAN, H.T.M. et al. Advances in genomics for the improvement of quality in coffee, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.96, n. 10, p. 3300-3312, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7692>
- VARGAS, A (Ed.). **100 anos de conilon capixaba**. Especial 100 anos de conilon capixaba. A Gazeta. Vitória, ES: Caderno especial, 2012. 48 p.
- VARGAS, I.B.; MARTINS, L.F.S. Occurrence's review concerning genera and species of the Rubiaceae Juss., family in the State of São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.8, p.63632-63646, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-699>.
- VEGA, F.E., ROSENQUIST, E., COLLINS, W. Global project needed to tackle coffee crisis. **Nature**, 425, 343, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1038/425343a>
- VENEZIANO, W.; FAZUOLI, L. C. **Avaliação de cultivares de cafeeiros Robusta (*Coffea canephora*) em Rondônia**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., Poços de Caldas, Anais... Poços de Caldas, MG: EMBRAPA CAFÉ/MINASPLAN, 2000. p. 459-461.
- VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 673-684, 2015.
- VEIRA, J. PIMENTA, J.; GOMES, A.; LAIA, J. et al. The identification of the Rosa S-locus and implications on the evolution of the Rosaceae gametophytic self-incompatibility systems. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83243-8>

- VITARELLI, N. C.; SANTOS, M. Anatomia de estípulas e coléteres de *Psychotria carthagenensis* Jacq.(Rubiaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, n. 4, p. 923-928, 2009.
- WANG, X.; CHEN, C.; WANG, J. Phytoremediation of strontium contaminated soil by *Sorghum bicolor* (L.) Moench and soil microbial community-level physiological profiles (CLPPs). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 8, p. 7668-7678, 2017.
- WENG, H.; WENG, J.; YAN, A.; HONG, C.; YONG, W.; QIN, Y. Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil. **Biol Trace Elem Res**, v.123, p.218-228, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8094-y>
- WENG, H.X.; HONG, C.L.; XIA, T.H.; BAO, L.T.; LIU, H.P.; LI, D.W. Iodine biofortification of vegetable plants — an innovative method for iodine supplementation. **Chin Sci Bull**, v.58, p.2066-2072, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5709-2>
- WIKSTRÖM, N.; BREMER, B.; RYDIN, C. Conflicting phylogenetic signals in genomic data of the coffee family (Rubiaceae). **Journal of Systematics and Evolution**, v.58, n.4, p. 440-460, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jse.12566>
- WILLEY, N.J. Soil to plant transfer of radionuclides: predicting the fate of multiple radioisotopes in plants. **J Environ Radioact**, v.133, p.31–34, 2014.
- WINGER, R.J.; KÖNIG, J.; HOUSE, D. A. Technological issues associated with iodine fortification of foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 19, n. 2, p. 94-101, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.08.002>
- WINKLER, A.; RAUWOLF, M.; STERBA, J.H.; WOBRAUSCHEK, P.; STRELLI, C.; & TURJANSKAYA, A. Total reflection X-ray fluorescence analysis of elemental composition of herbal infusions and teas. **Journal of The Science of Food and Agriculture**, 100, 4226–4236, 2020.
- WU, W.; WU, P.; YANG, F.; SUN, D.-L.; ZHANG, D.-X.; ZHOU, Y.-K. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. **Sci. Total Environmental**, v.630, p. 53–61, 2018.
- ZANÃO JÚNIOR, L.A.; FONTES, R.L.F.; COELHO, P.H.M.; KORNDÖRFER, G.H. & ZAMBOLIM, L. Soil-applied silicon decreases severity of wheat spot blotch on silicon deficient soils. **R. Bras. Ci. Solo**, 34:401-408, 2010.
- ZAPPI, D.C.; CALIÓ, M.F.; PIRANI, J.R. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: Rubiaceae. **Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo**, v.32, n.1, p.71-140, 2014.
- ZENG, Q.; ZHU, J.G.; CHENG, Z.B. et al. Phytotoxicity of lanthanum in rice in haplic acrisols and cambisols. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 64, n. 2, p. 226-233, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.016>