



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

TAÍS RIZZO MOREIRA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E QUÍMICAS DO SOLO NA
COMUNIDADE DE FUNGOS E BACTÉRIAS EM LAVOURAS DE CAFÉ**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

TAÍS RIZZO MOREIRA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E QUÍMICAS DO SOLO NA
COMUNIDADE DE FUNGOS E BACTÉRIAS EM LAVOURAS DE CAFÉ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Dr. Alexandre Rosa dos Santos

Coorientador: Dr. Aldemar Polonini Moreli

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M835i Moreira, Taís Rizzo, 1991-
Influência das condições climáticas e químicas do solo na
comunidade de fungos e bactérias em lavouras de café / Taís
Rizzo Moreira. - 2023.
112 f. : il.

Orientador: Alexandre Rosa dos Santos.
Coorientador: Aldemar Polonini Moreli.
Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Clima. 2. Meio Ambiente. 3. Bactérias. 4. Fungos. 5.
Café. I. Santos, Alexandre Rosa dos. II. Moreli, Aldemar
Polonini. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de
Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

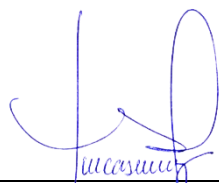
CDU: 630*38

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E QUÍMICAS DO SOLO NA COMUNIDADE DE FUNGOS E BACTÉRIAS EM LAVOURAS DE CAFÉ

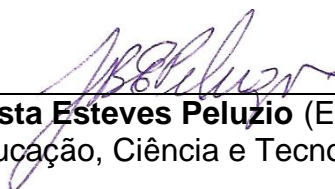
Taís Rizzo Moreira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2023.




Prof. Dr. Lucas Louzada Pereira (Examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo



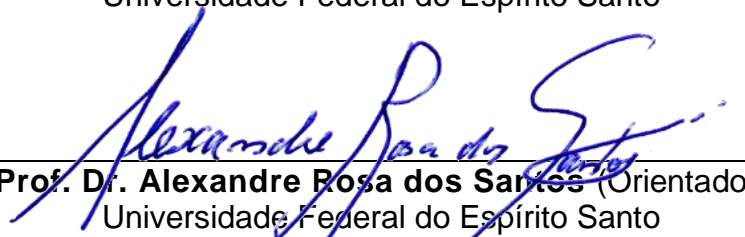
Prof. Dr. João Batista Esteves Peluzio (Examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo



Profª. Drª. Marliane de Cássia Soares da Silva (Examinadora externa)
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico a Deus, aos meus pais, meu irmão, cunhada, meus sobrinhos, tios e ao meu companheiro, por serem meus alicerces, minhas inspirações e meus exemplos. A vocês, meu eterno amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força e sustentação para concluir esta etapa.

Aos meus pais, Sônia e Adilson, meu irmão, Tiago, minha cunhada, Cristiane, meus sobrinhos, Rafael e Antônio, e a meus tios e tias, pelo amor e carinho confiados a mim, que em muitas vezes foram os motivos para manter-me firme em busca do meu objetivo.

Ao meu companheiro de vida, Jeferson, por ser um grande incentivador e pela parceria pessoal e profissional durante esses anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, ao IFES Campus Venda Nova do Imigrante e a Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade e estrutura para conclusão do doutorado.

Ao Sicoob Sul-Serrano, pelo financiamento desse estudo, à CAPES e a FAPES por também auxiliarem financeiramente alguns dos integrantes da pesquisa e meu doutorado Sanduíche em Córdoba na Espanha.

Ao prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos, meu orientador, pelas doses diárias de ânimo e inspiração para persistir em busca do melhor. Agradeço a contribuição em meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Dr. Lucas Louzada Pereira, pela dedicação e disponibilidade contínua em coordenar e executar várias etapas deste e de outros projetos. Agradeço o incentivo e o exemplo que me fazem querer sempre mais.

Ao Dr. Aldemar Polonini Moreli, pelo aprendizado, paciência e por ser, juntamente com o Dr. Lucas, responsável pela captação de investimento.

Aos colegas e amigos da UFES, pela saudável convivência e por compartilharem conhecimento que tanto contribui para o crescimento e aprendizado na instituição. Em especial, meu muito obrigada à família do Laboratório GAGEN.

Aos bolsistas do Ifes, pela amizade, pelas incontáveis horas de dedicação e por serem pilares durante a execução de todo o projeto. Em especial ao grupo do *Coffee Design* por contribuir com a formação pessoal e profissional de todos nós.

Aos parceiros da UFV, destaco aqui a Dr^a. Marliane Silva e o Dr. Tomás Gomes Reis Veloso, pela parceria, dedicação e paciência. Sou muito grata a todo o aprendizado que compartilharam comigo e com a equipe.

Aos meus amigos de longa data e as amigadas construídas durante o meu doutorado, por me ouvirem e auxiliarem.

Aos produtores rurais que participaram ativamente da pesquisa, que nos receberam de forma carinhosa, mesmo em período pandêmico, e que doaram material para análise. O meu muito obrigada por todo esforço e dedicação. O trabalho executado por suas famílias é responsável pelo alimento não somente em suas mesas, mas na de muitos outros brasileiros.

A todos vocês, muito obrigada!

*“Quando tudo nos parece dar errado
Acontecem coisas boas
Que não teriam acontecido
Se tudo tivesse dado certo.”
(Renato Russo)*

RESUMO

MOREIRA, Taís Rizzo. **Influência das condições climáticas e químicas do solo na comunidade de fungos e bactérias em lavouras de café**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Coorientador: Dr. Aldemar Polonini Moreli.

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo, com mais de 11 milhões de hectares globalmente dedicados à sua produção globalmente. O Brasil é o principal produtor e exportador de café, com destaque para as regiões onde as condições climáticas são aptas para o seu desenvolvimento. No entanto, essas regiões também são propensas à ocorrência de doenças e pragas que limitam a produção, como a ferrugem causada pelo fungo *Hemileia vastatrix*. A utilização de variedades resistentes à ferrugem é a estratégia mais eficiente e sustentável para o seu controle. A qualidade do solo também é de extrema importância para produção de café mais sustentável e pode ser avaliada por indicadores químicos, físicos e biológicos. Os solos abrangem uma gama variada de condições físicas, químicas e biológicas que interagem e impactam os processos críticos do ecossistema que sustentam a saúde das plantas. Entre os componentes do solo, a comunidade microbiológica funciona como um condutor ecológico de processos essenciais, sendo afetada por diferentes níveis de perturbação, fatores ecológicos e ambientais. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi compreender a correlação das variáveis ambientais, climáticas e da composição química com a comunidade de bactérias e fungos presentes no solo de plantios de café e avaliar a favorabilidade à ocorrência da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) em áreas de aptidão climática para a cultura do café arábica (*Coffea arabica* L.). Notamos que em áreas antropizadas, com dominância da espécie *Coffea arabica* e com gradiente considerável de latitude, a diversidade beta da comunidade de bactérias e fungos é mais afetada pelas variáveis climáticas do que pelas variáveis químicas do solo. Por outro lado, houve maior correlação entre variáveis bioclimáticas e diversidade bacteriana que fúngica, em plantios de *Coffea canephora* com menor distância espacial. A diversidade fúngica está mais correlacionada com a distância dos fragmentos florestais e disponibilidade de potássio nas fazendas de *Coffea canephora* no Espírito Santo. Além disso, nossos resultados fornecem uma base para a escolha das cultivares mais adequadas para cada região.

Palavras-chave: Clima, meio ambiente, bactérias, fungos, café.

ABSTRACT

MOREIRA, Taís Rizzo. **Influence of climatic and soil chemical conditions on the community of fungi and bacteria in coffee crops.** 2023. Thesis (Doctorate in Forestry Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Co-adviser: Dr. Aldemar Polonini Moreli.

Coffee is one of the most consumed beverages in the world, with over 11 million hectares globally devoted to its production globally. Brazil is the main producer and exporter of coffee, especially in regions where climatic conditions are suitable for its development. However, these regions are also prone to the occurrence of diseases and pests that limit production, such as rust caused by the fungus *Hemileia Vastatrix*. The use of rust-resistant varieties is the most efficient and sustainable strategy for its control. Soil quality is also extremely important for more sustainable coffee production and can be evaluated by chemical, physical and biological indicators. Soils encompass a diverse range of physical, chemical and biological conditions that interact and impact critical ecosystem processes that support plant health. Among soil components, the microbiological community functions as an ecological driver of essential processes, being affected by different levels of disturbance, ecological and environmental factors. In this context, the objective of this study was to understand the correlation of environmental, climatic and chemical composition variables with the community of bacteria and fungi present in the soil of coffee plantations and to evaluate the favorability of the occurrence of rust (*Hemileia vastatrix*) in areas of aptitude climate change for the cultivation of Arabica coffee (*Coffea arabica* L.). We noticed that in anthropized areas, with dominance of the *Coffea arabica* species and with a considerable latitude gradient, the beta diversity of the bacterial and fungal community is more affected by climatic variables than by soil chemical variables. On the other hand, there was a greater correlation between bioclimatic variables and bacterial than fungal diversity in *Coffea canephora* plantations with smaller spatial distance. Fungal diversity is more correlated with distance from forest fragments and potassium availability on *Coffea canephora* farms in Espírito Santo. In addition, our results provide a basis for choosing the most suitable cultivars for each region.

Keywords: Climate, environment, bacteria, fungi, coffee.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Localização e descrição das 23 fazendas analisadas neste trabalho. 26
- Figura 1.2. Representação das etapas metodológicas: A – área de estudo e coleta do material; B – Análise química; C – Extração de DNA, PCR e processamento de leitura bruta; D – dados climáticos, e; E – processamento estatístico..... 27
- Figura 1.3. Variáveis climáticas utilizadas neste estudo: A) Temperatura mínima (tmmn em °C) e Temperatura máxima (tmmx em °C); B) Radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²); C) Precipitação acumulada e déficit hídrico; D) Evapotranspiração potencial (pet em mm); E) Umidade do solo (soil em mm), e; F) Umidade média do ar (UmiRel em porcentagem). 32
- Figura 1.4. Análise Canônica de Análise de Componentes Principais (ACP) baseada na distância de dissimilaridade Bray-Curtis de comunidades bacterianas (A) e (B) fúngicas restritas a variáveis edáficas e climáticas. Os valores entre parênteses indicam a porcentagem de variância explicada por cada eixo. A variância explicada por cada grupo de variáveis (ou seja, edáfica ou climática) foi obtida pela partição da variância conforme proposto por Borcard; Gillet; Legendre (2018)..... 34
- Figura 1.5. Correlação entre os índices microbianos (riqueza, diversidade, equitabilidade, dominância e raridade) e variáveis de solo e clima. Apenas correlações significativas positivas (verde) e negativas (rosa) são mostradas. 36
- Figura 1.6. Correlação dos índices de diversidade alfa da comunidade bacteriana com algumas das variáveis climáticas: temperatura mínima (tmmn em °C), precipitação acumulada (pr em mm) e radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²). 37
- Figura 1.7. Correlação dos índices de diversidade alfa da comunidade fúngica com algumas das variáveis edáficas e climáticas: acidez ativa (pH), magnésio (Mg), radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²), evapotranspiração potencial (pet em mm), déficit hídrico (def em mm) e umidade média do ar (UmiRel)..... 38
- Figura 2.1. Etapas metodológicas para coleta e tratamento do material de estudo. .60
- Figura 2.2. Altitude (V1), distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2), índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI (V3) e variáveis climáticas (V4 a V22) das quatro fazendas do estado do Espírito Santo..... 64
- Figura 2.3. Propriedades químicas do solo das 4 fazendas analisadas, com representação dos valores médios..... 65
- Figura 2.4. A) Métrica alfa de comunidades bacterianas e fúngicas. Boxplots seguidos das mesmas letras não apresentam diferenças pelo teste de Kruskal-Wallis a 0,05 de probabilidade e B) Diversidade beta - Análise de coordenadas principais (PCoA) de comunidades bacterianas e fúngicas em solo de cafeeiros de quatro fazendas do estado do Espírito Santo. A ordenação é baseada na distância Bray-Curtis. O número entre parênteses representa a variância explicada por cada eixo canônico e as reticências representam um intervalo de confiança de 99%..... 66
- Figura 2.5. Composição taxonômica da comunidade de bactérias e fungos em solo de quatro fazendas do estado do Espírito Santo. Cada cor representa um filo bacteriano

ou fúngico. Apenas filões com abundância superior a 2% são mostrados. Os filões com menos de 2% estão agrupados na categoria “Outros”. 67

Figura 2.6. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis de diversidade microbiológica e: A) Ambiental e climática; B) variáveis químicas do solo selecionadas com base na técnica de “seleção direta”; C) Gráfico da relação entre diversidade de Shannon e acidez ativa (pH H₂O – V23) para a comunidade bacteriana e fúngica (nível de significância=0,05). 69

Figura 2.7. Cladograma com potenciais bactérias fixadoras de nitrogênio (NFB) no solo de *Coffea canephora*. A presença de quadrados coloridos nos anéis externos representa a presença do ASV na respectiva Fazenda (A, B, C ou D). Cada tip node representa um ASV previsto como potencial NFB pelo algoritmo *picrust2*. Para garantir a confiabilidade da previsão, apenas ASVs com Índice de Taxon de Sequência Mais Próxima abaixo de 0,15 foram considerados. No gráfico de barras, cada barra representa a abundância relativa de um gênero bacteriano. 71

Figura 3.1. Área de estudo. 89

Figura 3.2. Etapas metodológicas para a obtenção dos dados meteorológicos do *TerraClimate*. 90

Figura 3.3. Etapas metodológicas utilizadas para a elaboração do zoneamento climático do café arábica (*Coffea arabica* L.) no Brasil. 92

Figura 3.4. Variáveis utilizadas para elaboração do zoneamento climático para o café arábica e favorabilidade à ocorrência da ferrugem do cafeeiro. Onde: A) temperatura média; B) déficit hídrico; C) pressão de vapor; D) umidade relativa; E) unidades de conservação, e; F) uso e cobertura da terra para a área de estudo, sendo as variáveis climáticas calculadas considerando os dados de 1992 a 2021. 98

Figura 3.5. Zoneamento climático para o café arábica (A) e favorabilidade à ocorrência da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) (B). 100

Figura 3.6. Favorabilidade à ocorrência de ferrugem em áreas aptas e restritas ao cultivo de café arábica (A), áreas das classes de favorabilidade à ocorrência da ferrugem (B) e porcentagem das classes de aptidão do café arábica em cada classe de favorabilidade à ocorrência da ferrugem (C). 101

Figura 3.7. Classes de favorabilidade à ocorrência de *Hemileia vastatrix* por classe de aptidão (%). 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Faixas de aptidão térmica para as culturas do café arábica (<i>Coffea arabica</i> L.)	93
Tabela 3.2. Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café arábica (<i>Coffea arabica</i> L.)	93
Tabela 3.3. Classes de favorabilidade a ocorrência de ferrugem do cafeeiro em função dos intervalos de temperatura média e umidade relativa do ar	97
Tabela 3.4. Áreas favoráveis à ocorrência de ferrugem (km ²), nos estados aptos, aptos com irrigação, restritos e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica.	102

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1.....	30
Equação 1.2.....	30
Equação 3.1.....	96
Equação 3.2.....	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	REFERÊNCIAS	19
CAPÍTULO I		21
MICROBIOMA DO SOLO DE <i>COFFEA ARABICA</i> L. ASSOCIADO COM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E QUÍMICAS DO SOLO EM DIFERENTES DOMÍNIOS: MATA ATLÂNTICA, CAATINGA E CERRADO		21
1	INTRODUÇÃO	23
2	MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1	Área de estudo e coleta do material	25
2.2	Análise química	27
2.3	Extração de DNA, PCR e processamento de leituras brutas	28
2.4	Dados climáticos	29
2.5	Análise estatística	30
3	RESULTADOS	30
4	DISCUSSÃO	38
5	CONCLUSÕES	45
6	REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE		53
CAPÍTULO II		55
RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS BIOCLIMÁTICAS E AMBIENTAIS COM A DIVERSIDADE MICROBIANA EM PLANTIOS DE <i>COFFEA CANEPHORA</i> PIERRE EX A. FROEHNER		55
1	INTRODUÇÃO	57
2	MATERIAL E MÉTODOS	59
2.1	Área de estudo	59
2.2	Amostragem	60
2.3	Caracterização topográfica, ambiental e climática	61
2.4	Análise química	61
2.5	Extração de DNA, preparação de biblioteca e sequenciamento	62
2.6	Análise de dados	62

3 RESULTADOS	63
3.1 Caracterização topográfica, ambiental e climática	63
3.2 Paineis da análise química	64
3.3 Composição e diversidade da comunidade microbiana	65
4 DISCUSSÃO	72
5 CONCLUSÕES	77
6 REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE	84

CAPÍTULO III	85
FAVORABILIDADE CLIMÁTICA À OCORRÊNCIA DA <i>HEMILEIA VASTATRIX</i> EM ÁREAS APTAS AO CULTIVO DE <i>COFFEA ARABICA</i> L. NO BRASIL	85
1 INTRODUÇÃO	87
2 MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1 Área de estudo	88
2.2 Obtenção do banco de Dados	89
2.3 Zoneamento Climático	91
2.4 Favorabilidade climática à ocorrência da <i>Hemileia vastatrix</i>	95
2.5 Favorabilidade climática à ocorrência de <i>Hemileia vastatrix</i> em áreas aptas ao cultivo de café arábica	97
3 RESULTADOS	98
4 DISCUSSÃO	103
5 CONCLUSÕES	107
6 REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO GERAL

Desde a sua descoberta na Abissínia (hoje Etiópia) até se tornar uma das bebidas mais consumidas no mundo, o café cativou os entusiastas por séculos, devido ao seu aroma, sabor único e outras características sensoriais, além de seus efeitos como um estimulante para melhorar o desempenho mental (ELHALIS; COX; ZHAO, 2020; LIM; ZWICKER; WANG, 2019). O café, proveniente das espécies *Coffea arabica* (café arábica) e *Coffea canephora*, está entre as bebidas mais consumidas globalmente (ICO, 2021), com mais de 11 milhões de hectares dedicados à produção em todo o mundo (FAOSTAT, 2023).

O microbioma do solo é bastante diversificado, com uma estimativa de 6.400 a 38.000 táxons por grama de solo (CURTIS; SLOAN; SCANNELL, 2002). Há muito se pensa que a diversidade biológica de espécies confere benefícios em sustentabilidade, com o aumento da diversidade proporcionando resistência ao estresse, perturbação e mudanças nas condições do solo (CALDWELL et al., 2015; YACHI; LOREAU, 1999).

A qualidade do solo é influenciada pela interação de fatores químicos, físicos e biológicos (KARLEN; DITZLER; ANDREWS, 2003). Embora os indicadores químicos e físicos do solo sejam comumente usados por agricultores e cientistas para avaliar a qualidade do solo, os indicadores biológicos são frequentemente sub-representados (BÜNEMANN et al., 2018). Os organismos do solo são sensíveis à mudança no ambiente e desempenham um papel central no funcionamento do ecossistema. Portanto, incluir indicadores biológicos pode ajudar a entender melhor as respostas do solo à biodiversidade e ao manejo (FAUCON; HOUBEN; LAMBERS, 2017).

A região do solo que é influenciada pela raiz da planta é chamada de rizosfera, ambiente este rico em nutrientes e microrganismos (YURGEL et al., 2018). Algumas pesquisas, sobre a comunidade de fungos e bactérias presentes no solo, mostram que cada planta se associa a um grupo central de microrganismos, e que as estruturas da comunidade microbiana podem variar de acordo com características intrínsecas da vegetação (MA et al., 2021) e características ambientais como altitude (LI et al., 2021), tipo de solo (SCHREITER et al., 2014), e clima (ZOLTI et al., 2019). Há muito se sabe que essa microbiota pode afetar diretamente a saúde das plantas, promovendo o crescimento, suprimindo patógenos e reduzindo os efeitos deletérios da salinidade, estresse hídrico e xenobióticos (BUSBY et al., 2017). Assim, buscando aproveitar

esse fenômeno para beneficiar a agricultura, grande esforço tem sido despendido para entender como a microbiota afeta a saúde da planta e seu vigor (BUSBY et al., 2017).

Além do cuidado referente a diversidade da comunidade de fungos e bactérias presentes no solo, a escolha do cultivar mais adequado para cada região também é de extrema importância para uma produção mais sustentável.

O Brasil é o principal produtor e exportador mundial de café sendo o responsável por um terço da produção mundial de café (BOTE et al., 2018; SILVA ARAGÃO et al., 2020). Algumas regiões do Brasil ganham destaque na produção devido a variação de temperatura e precipitação serem ideais para o desenvolvimento da planta (BENTI et al., 2022). No entanto, muitas destas regiões também são ideais à favorabilidade de ocorrência de doenças e pragas que são fatores limitantes da produção. A doença mais devastadora que ataca os plantios de café é a ferrugem, causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* (MCTAGGART et al., 2016).

A *Hemileia vastatrix* infecta a superfície inferior das folhas, onde produz manchas cloróticas, em forma de buquê e de cor laranja, levando à desfolha prematura. O uso de variedades resistentes à ferrugem é considerado a estratégia mais sustentável, eficiente e ecologicamente correta para o controle dessa doença (SILVA et al., 2022). Dados espaciais das condições climáticas e dados referentes a favorabilidade de ocorrência da ferrugem podem ser utilizados para auxiliar na escolha de variedades mais adequadas para cada região, de acordo com suas características.

Tendo em vista a importância econômica do café para o Brasil e a área ocupada por esta cultura, este estudo tem como objetivo gerar base para maior entendimento da comunidade de fungos e bactérias presentes no solo dos plantios de café e sua relação com as variáveis ambientais, climáticas e com a composição química do solo, e para um melhor planejamento da variedade a ser implantada em cada região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Compreender a correlação das variáveis ambientais, climáticas e da composição química do solo com a comunidade de bactérias e fungos presentes no solo de plantios de café e avaliar a favorabilidade à ocorrência da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) em áreas de aptidão climática para a cultura do café arábica (*Coffea arabica* L.).

2.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar os fatores climáticos e a composição química do solo com a diversidade da comunidade de bactérias e fungos em plantações de *Coffea arabica* no Brasil;
- Correlacionar fatores topográficos, índice de vegetação, fatores climáticos, distância de fragmentos florestais e composição química com a diversidade da comunidade de bactérias e fungos presentes em plantios de *Coffea canephora*, no Espírito Santo;
- Espacializar as classes de aptidão climática para o cultivo de *Coffea arabica* no Brasil, e;
- Gerar o mapa de favorabilidade à ocorrência de *Hemileia vastatrix*.

3 REFERÊNCIAS

BENTI, F. et al. Modeling coffee (*Coffea arabica* L.) climate suitability under current and future scenario in Jimma zone, Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 1–14, 1 abr. 2022.

BOTE, A. D. et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. **European Journal of Agronomy**, v. 92, p. 115–122, 1 jan. 2018.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, maio 2018.

BUSBY, P. E. et al. Research priorities for harnessing plant microbiomes in sustainable agriculture. **PLOS Biology**, v. 15, n. 3, p. e2001793, 28 mar. 2017.

CALDWELL, A. C. et al. Prokaryotic Diversity in the Rhizosphere of Organic, Intensive, and Transitional Coffee Farms in Brazil. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, p. e0106355, 17 jun. 2015.

CURTIS, T. P.; SLOAN, W. T.; SCANNELL, J. W. Estimating prokaryotic diversity and its limits. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. 16, p. 10494–10499, 6 ago. 2002.

ELHALIS, H.; COX, J.; ZHAO, J. Ecological diversity, evolution and metabolism of microbial communities in the wet fermentation of Australian coffee beans. **International Journal of Food Microbiology**, v. 321, p. 108544, 16 maio 2020.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 28 dez. 2022.

FAUCON, M.-P.; HOUBEN, D.; LAMBERS, H. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 5, p. 385–394, maio 2017.

ICO. **Trade Statistics Tables**. Disponível em: <http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics>. 2021.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3–4, p. 145–156, jun. 2003.

LI, A. et al. Microbiome analysis reveals soil microbial community alteration with the effect of animal excretion contamination and altitude in Tibetan Plateau of China. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 4, p. 639–648, dez. 2021.

LIM, L. T.; ZWICKER, M.; WANG, X. Coffee: One of the most consumed beverages in the world. In: **Comprehensive Biotechnology**. Elsevier, 2019. p. 275–285.

MA, L. et al. The Impact of Stand Age and Fertilization on the Soil Microbiome of *Miscanthus x giganteus*. **Phytobiomes Journal**, v. 5, n. 1, p. 51–59, jan. 2021.

MCTAGGART, A. R. et al. Host jumps shaped the diversity of extant rust fungi

(Pucciniales). **New Phytologist**, v. 209, n. 3, p. 1149–1158, 1 fev. 2016.

SCHREITER, S. et al. Effect of the soil type on the microbiome in the rhizosphere of field-grown lettuce. **Frontiers in Microbiology**, v. 5, 8 abr. 2014.

SILVA ARAGÃO, O. O. DA et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 1 jun. 2020.

SILVA, M. DO C. et al. An Overview of the Mechanisms Involved in Coffee-Hemileia vastatrix Interactions: Plant and Pathogen Perspectives. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 326, 26 jan. 2022.

YACHI, S.; LOREAU, M. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 96, n. 4, p. 1463–1468, 16 fev. 1999.

YURGEL, S. N. et al. Dissecting Community Structure in Wild Blueberry Root and Soil Microbiome. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, 6 jun. 2018.

ZOLTI, A. et al. Root microbiome response to treated wastewater irrigation. **Science of The Total Environment**, v. 655, p. 899–907, mar. 2019.

CAPÍTULO I

1. Microbioma do solo de *Coffea arabica* L. associado com variáveis climáticas e químicas do solo em diferentes domínios: Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, com 2 milhões de hectares de terra dedicados ao cultivo, sendo que 75% da produção do país é de café arábica. O cultivo extensionista do café ameaça a biodiversidade em diferentes escalas, como a fragmentação e perda de habitats naturais, simplificação da paisagem, aumento do uso de agroquímicos, modificação do microclima e empobrecimento da comunidade de microrganismos do solo. Tais microrganismos são indispensáveis para produção agrícola por conduzirem uma ampla gama de processos ecossistêmicos, como decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Nosso estudo objetivou correlacionar a composição e diversidade do microbioma do solo de plantações de *Coffea arabica* L. no Brasil com as variáveis climáticas e a composição química do solo. Amostras de solo foram coletadas em 23 fazendas produtoras de café arábica, em 3 diferentes biomas: Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado, com gradiente latitudinal variando de 4,22° Sul a 23,50° Sul. Os dados climáticos e químicos destas regiões foram correlacionados com a composição e diversidade da comunidade de fungos e bactérias. Nossos resultados demonstram que em áreas antropizadas, com dominância da espécie *Coffea arabica* e com gradiente considerável de latitude, a diversidade beta da comunidade de bactérias e fungos é mais afetada pelas variáveis climáticas do que pelas variáveis químicas do solo. Além disso, a diversidade beta da comunidade de fungos possui maior sensibilidade em relação as variáveis climáticas e químicas do solo, do que a comunidade de bactérias. Os resultados deste estudo têm implicações importantes para maior entendimento do microbioma dos solos das fazendas produtoras de café arábica em regiões tropicais.

Palavras-chave: Diversidade; microrganismos; climatologia.

Soil microbiome of *Coffea arabica* L. associated with climatic and chemical variables in different biomes of Brazil: Atlantic Forest, Caatinga and Cerrado

ABSTRACT

Brazil is the largest coffee producer in the world, with 2 million hectares of land dedicated to cultivation, with 75% of the country's production being arabica coffee. The extensionist cultivation of coffee threatens biodiversity on different scales, such as fragmentation and loss of natural habitats, simplification of the landscape, increased use of agrochemicals, modification of the microclimate and impoverishment of the soil microorganism community. Such microorganisms are indispensable for agricultural production as they conduct a wide range of ecosystem processes, such as decomposition of organic matter and nutrient cycling. Our study aimed to correlate the composition and diversity of the soil microbiome of *Coffea arabica* L. plantations in Brazil with climatic variables and soil chemical composition. Soil samples were collected in 23 arabica coffee producing farms, in 3 different biomes: Atlantic Forest, Caatinga and Cerrado, with latitudinal gradient ranging from 4.22° South to 23.50° South. Climatic and chemical data from these regions were correlated with the composition and diversity of the fungal and bacterial community. Our results demonstrate that in anthropized areas, with dominance of the *Coffea arabica* species and with a considerable latitude gradient, the beta diversity of the bacterial and fungal community is more affected by climatic variables than by soil chemical variables. In addition, the beta diversity of the fungal community is more sensitive to climatic and soil chemical variables than the bacterial community. The results of this study have important implications for a better understanding of the soil microbiome in arabica coffee producing farms in tropical regions.

Keywords: Diversity; microorganisms; climatology.

1 INTRODUÇÃO

O café é uma das culturas de maior importância econômica no mundo, e o Brasil tem se destacado, como o maior produtor mundial de café, nos últimos dois séculos (FAOSTAT, 2023), sendo responsável por um terço da produção mundial (CONAB, 2022a). A área do território brasileiro ocupada por lavouras de café ultrapassa 2 milhões de hectares, com uma produção de aproximadamente 3,1 toneladas de grãos verdes, dos quais 75% são de *Coffea arabica* L. (café arábica) (CONAB, 2022a).

A extensão territorial ocupada pelo cultivo do café, no Brasil, é considerável e a prática de manejo extensionista ameaça a biodiversidade em diferentes escalas (FAHRIG et al., 2011; NEWBOLD et al., 2015). Na escala da paisagem, o aumento da área dedicada às monoculturas resulta na fragmentação e perda de habitats naturais e na consequente simplificação da paisagem (MÉNDEZ-ROJAS et al., 2022; TSCHARNTKE et al., 2012). Em escala local, a produção agrícola extensionista leva à completa supressão da vegetação original, aumento do uso de agroquímicos/insumos, modificação do microclima e alteração do microbioma (BYERS et al., 2023; LANDIS; WRATTEN; GURR, 2000; POMPEU, 2022).

As monoculturas são caracterizadas por comunidades biológicas empobrecidas na escala local, ou seja, baixa diversidade alfa, (BATÁRY et al., 2017; BOESING; NICHOLS; METZGER, 2018) e são geralmente dominadas por espécies generalistas, capazes de tolerar atividades antrópicas, isto é, comunidades homogêneas de composição (GÁMEZ-VIRUÉS et al., 2015; ORTIZ-ÁLVAREZ et al., 2021).

O microbioma do solo conduz uma ampla gama de processos do ecossistema, como decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (FIERER, 2017; XU et al., 2020), que têm *feedback* sobre o crescimento das plantas e manutenção da fertilidade do solo (SEMCHENKO et al., 2018).

A diversidade dos microrganismos do solo e a composição da comunidade são frequentemente associadas ao tipo de vegetação, condições climáticas e fatores edáficos (PAN et al., 2019; PRZEMIENIECKI et al., 2021). No entanto, alguns estudos relataram pouco ou nenhum efeito do tipo de vegetação sobre o microbioma do solo, porque a maioria dos microrganismos do solo podem se adaptar a uma ampla variedade de plantas (LEKBERG; WALLER, 2016). E a distribuição geográfica dos microrganismos do solo em diferentes tipos de vegetação é confundida com o clima e

com as propriedades edáficas (CROWTHER et al., 2014). Isso ocorre porque o clima influencia o comportamento e os tipos de biomas/vegetação de uma dada região, e cada vegetação têm necessidades nutricionais específicas, que são atendidas por meio de adubação, em áreas agrícolas com sistema de manejo convencional. Estes fatores que estão interligados afetam significativamente a composição da comunidade microbiana do solo (CROWTHER et al., 2014), temos então uma simbiose das interações entre clima-planta-solo-microrganismo.

O microbioma do solo evolui estreitamente em uma simbiose mútua ou antagônica das interações clima-planta-solo-microrganismos (DELGADO-BAQUERIZO et al., 2016), mas seus fatores de controle são mal resolvidos (LEFF et al., 2018; TESTE et al., 2017). O crescimento e a atividade bacteriana e fúngica do solo são influenciados de forma diferente pelos fatores climáticos e químicos (WU et al., 2020). Por exemplo, algumas bactérias estão associadas apenas a algumas espécies de plantas específicas (BERG; SMALLA, 2009). Espécies distintas de plantas estão associadas a táxons microbianos específicos do solo, que podem causar diferentes mudanças na diversidade microbiana e na composição da comunidade (BARBERÁN et al., 2017; ISLAM et al., 2020). Em comparação com bactérias de crescimento rápido, os fungos de crescimento lento são geralmente menos sensíveis às mudanças ambientais (DOVE et al., 2021; FIERER, 2017; ZHOU et al., 2016), mas estão fortemente associados à especificidade da planta (PAN et al., 2023; SEMCHENKO et al., 2018). Como tal, bactérias e fungos do solo podem responder de forma diferente às variáveis climáticas, propriedades edáficas e as plantas. No entanto, os principais impulsionadores de sua diversidade ou composição da comunidade permanecem indefinidos.

Nossa hipótese é que fatores climáticos e a composição química do solo são altamente correlacionadas com a composição e diversidade de bactérias e fungos em plantações de *Coffea arabica*, ao longo de um gradiente latitudinal considerável, no Brasil. Com isso, espera-se entender quais dos fatores analisados são os mais correlacionados com as métricas beta e alfa da diversidade bacteriana e fúngica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

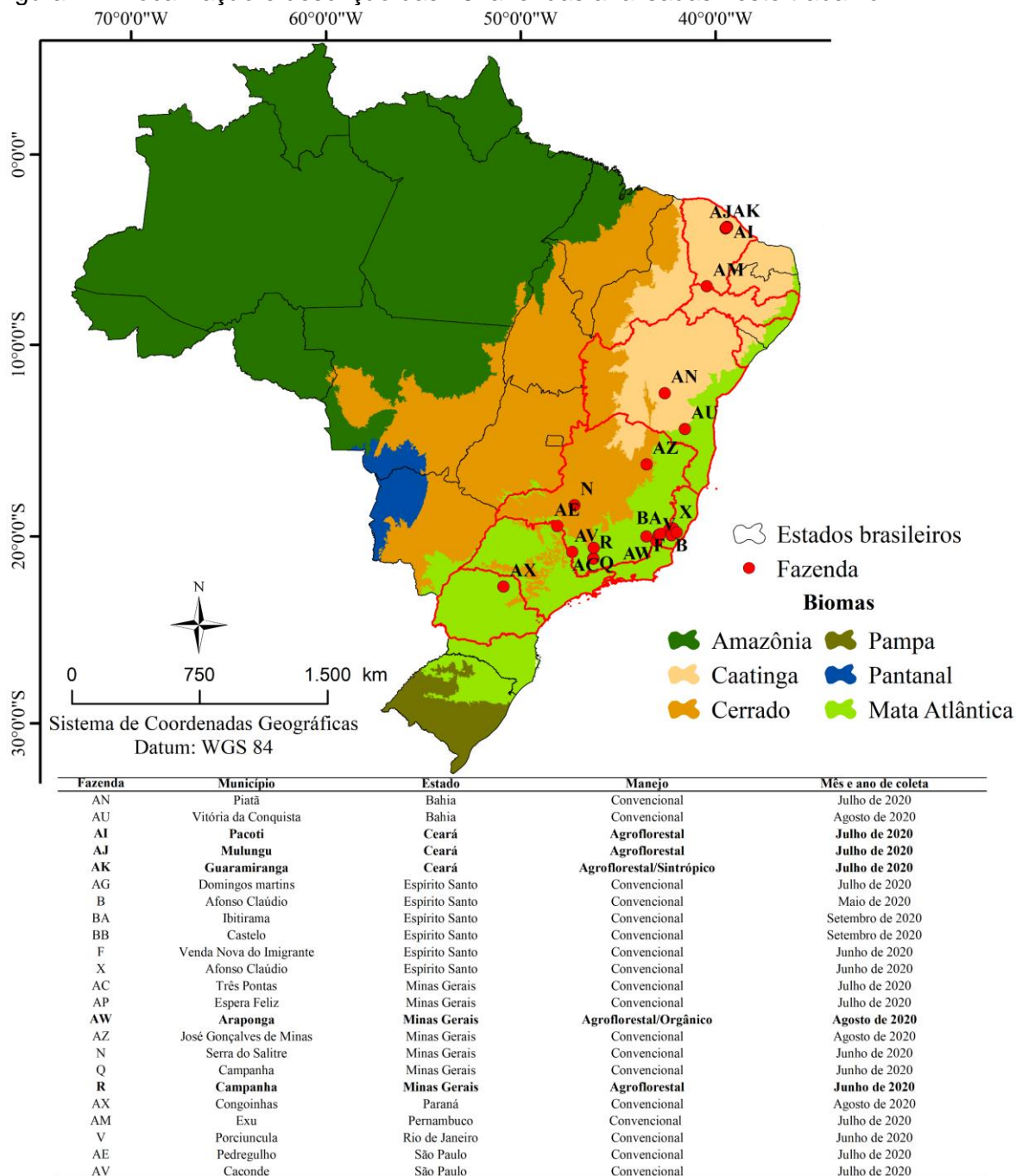
2.1 Área de estudo e coleta do material

Este estudo foi desenvolvido no Brasil, que abrange uma área de aproximadamente 8.510.295 km² com uma população estimada de mais de 215 milhões de habitantes (IBGE, 2022). O Brasil também responsável por um terço da produção mundial de café (BOTE et al., 2018; SILVA ARAGÃO et al., 2020).

As fazendas produtoras de café arábica, suas localizações, tipos de manejo e mês de coleta do material estão representados na Figura 1.1. É possível observar que as fazendas AI, AJ, AK, AW e R apresentam manejo com técnicas agroflorestais, enquanto as demais possuem manejo convencional.

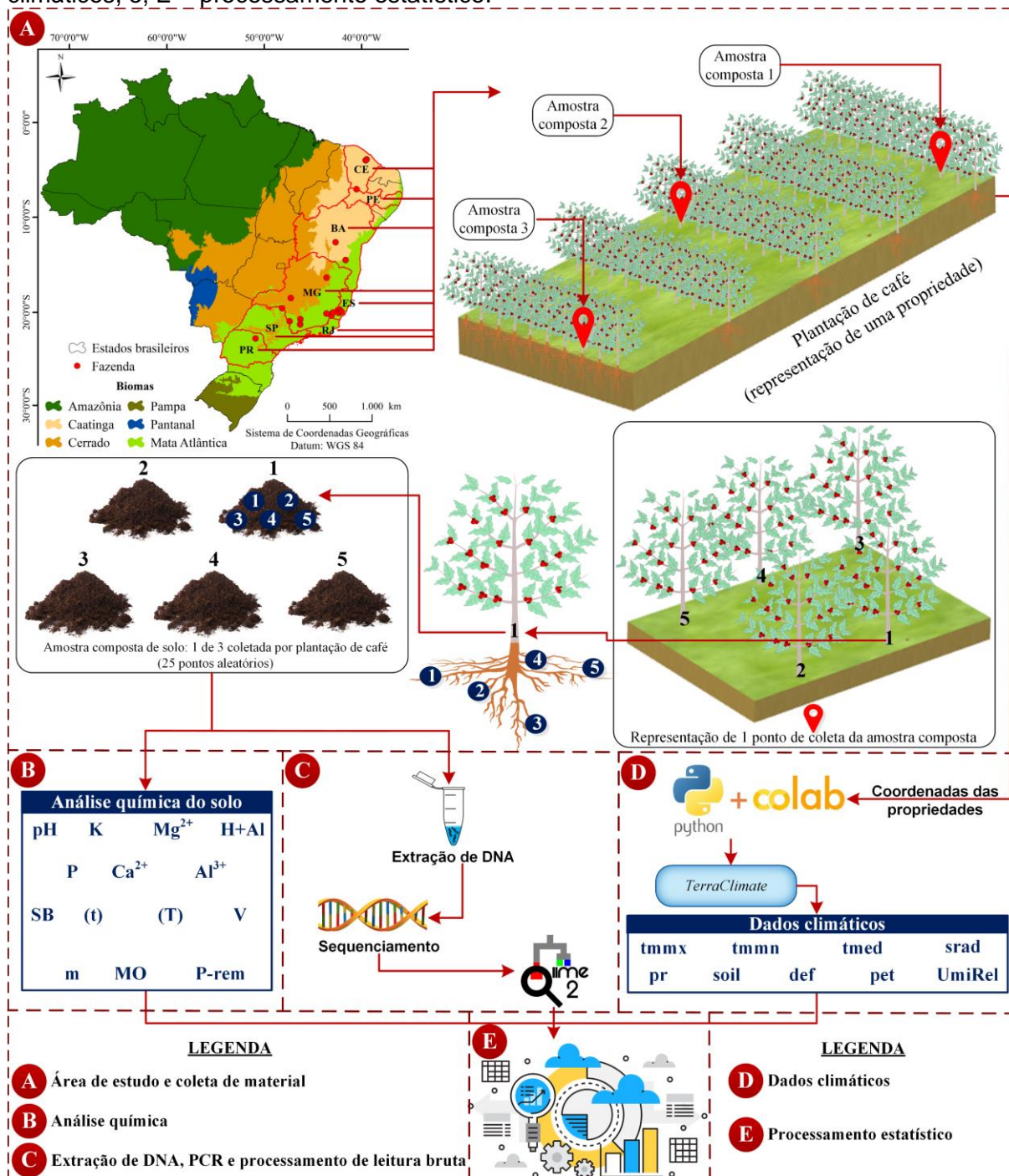
Foram coletadas amostras de solo com raiz em 23 fazendas produtoras de café arábica, em 8 estados brasileiros (3 diferentes biomas: Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado), com gradiente latitudinal variando de 4,22° Sul a 23,50° Sul. Em cada fazenda produtora de café, foram coletadas três amostras compostas de solo (cerca de 400 gramas/cada), cada amostra composta foi provenientes de vinte e cinco pontos aleatórios ao redor de 5 plantas, colhidas a 10 cm de profundidade e sob a projeção da copa do cafeeiro (Figura 1.2A). Durante a coleta de amostras, a borda dos cafeeiros foi excluída, evitando possíveis efeitos de bordadura. Em seguida, todas as amostras foram armazenadas em sacos plásticos estéreis e transportadas ao laboratório sob refrigeração, mantidas a -20 °C, conforme metodologia proposta por Veloso et al. (2020).

Figura 1.1. Localização e descrição das 23 fazendas analisadas neste trabalho.



Fonte: a autora.

Figura 1.2. Representação das etapas metodológicas: A – área de estudo e coleta do material; B – Análise química; C – Extração de DNA, PCR e processamento de leitura bruta; D – dados climáticos, e; E – processamento estatístico.



Fonte: a autora.

2.2 Análise química

Para análise de solo (Apêndice 1.1) foi utilizado um total de 100 mg, de cada amostra composta de solo, para descrição de sua composição química (Figura 1.2B) no Laboratório de Análise de Solos de Viçosa, MG. O pH do solo foi medido em água (relação solo: água = 1: 2,5), e a acidez potencial foi determinada com acetato de

cálcio em pH 7,0. Para a extração de fósforo (P) e potássio (K) foi utilizada a solução do ácido Mehlich⁻¹. O cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o alumínio (Al) foram extraídos por solução de KCl (1 mol/L) e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados permitiram determinar a soma de bases, saturação de bases, saturação de alumínio, capacidade efetiva de troca catiônica e capacidade de troca catiônica em pH 7 (DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, 1981)

2.3 Extração de DNA, PCR e processamento de leituras brutas

Para extração de DNA (Figura 1.2C), foi utilizado um total de 250 mg de cada amostra de solo, usando o kit *NucleospinSoil*[®] (*Macherey-Nagel*). A lise celular foi realizada por 50 segundos a 4000 rpm usando o homogeneizador *Precellys 24*. As demais etapas foram realizadas de acordo com os protocolos do fabricante do kit de extração. Após as extrações, a quantidade e a qualidade do DNA foram avaliadas por eletroforese em gel de agarose 0,8% corado com brometo de etídio sob luz violeta.

A região V3-V4 do 16S rDNA foi amplificada com os primers 341F (5'-CCTACGGGGAGGCAGCAG-3') e 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3') (PARADA; NEEDHAM; FUHRMAN, 2016) e o espaçador interno transcrito 1 (ITS1) foi amplificados com os primers ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') e ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3') (GARDES; BRUNS, 1993). Todas as reações de PCR foram realizadas com *Phusion*[®] *High-Fidelity* PCR Master Mix (New England Biolabs) e códigos de barras específicos para cada amostra. As PCRs foram avaliadas em gel de agarose 2% usando SYBR green. Foram utilizadas as bandas com a faixa de intensidade principal entre 400 e 450 pb para o preparo das bibliotecas. Os produtos de PCR foram misturados em proporções de equidensidade e purificados com Qiagen Gel Extraction Kit (Quiagen, Alemanha).

As bibliotecas de sequenciamento foram preparadas usando o *NEBNext*[®] *Ultra*[™] *DNA Library Prep Kit for Illumina*[®] de acordo com as recomendações do fabricante. A qualidade da biblioteca foi avaliada em um *Qubit 2.0 Fluorometer* (*Thermo Scientific*) e sistema *Agilent Bioanalyzer 2100*. Finalmente, a plataforma *Illumina NovaSeq 6000* foi usada para sequenciar as bibliotecas para produzir leituras pareadas de 250 pb.

As etapas de processamento de leituras brutas foram realizadas usando QIIME2 2021.4 (BOLYEN et al., 2019a). As leituras brutas foram inicialmente demultiplexadas em arquivos separados. Os primers e adaptadores foram removidos usando a ferramenta *cut adapt* do Qiime2 para remover primers e adaptadores

(MARTIN, 2011). Em seguida, a etapa de remoção de ruídos (*denoising*) foi realizada com a ferramenta DADA2 (CALLAHAN et al., 2016). Assim todas as sequências de baixa qualidade, quimeras foram removidas. As sequências restantes de alta qualidade foram anotadas taxonomicamente usando o banco de dados SILVA 138 (QUAST et al., 2012) para bactérias e o banco de dados UNITE (NILSSON et al., 2019) para fungos. Todas as sequências classificadas como mitocôndrias ou cloroplastos foram removidas para as análises posteriores.

2.4 Dados climáticos

Os dados meteorológicos necessários para elaboração deste estudo foram adquiridos do laboratório de climatologia, *TerraClimate*, com base nas coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras de solo (Figura 1.2D) por meio de script python transcrito no Google Colab. O *TerraClimate* é constituído pelos dados de clima mensal e o balanço hídrico climático para superfícies terrestres globais. Esses dados fornecem insumos importantes para estudos ecológicos e hidrológicos em escala global que requerem alta resolução espacial e dados variáveis no tempo. Todos os dados têm resolução temporal mensal e resolução espacial de aproximadamente 4 km² (ABATZOGLOU et al., 2018).

As variáveis utilizadas foram: temperatura máxima (tmmx em °C), temperatura mínima (tmmn em °C), temperatura média (tmed em °C), radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²), precipitação acumulada (pr em mm), déficit hídrico (def em mm), evapotranspiração potencial (pet em mm) e umidade do solo (soil em mm).

Todas as variáveis analisadas foram baixadas mensalmente e agrupadas a nível anual, considerando, o décimo segundo mês do ano, como, o mês de coleta dos frutos de cada fazenda produtora de café arábica analisada (Figura 1.1). Precipitação (pr) e déficit hídrico (def) foram obtidas pela soma dos valores dos 12 meses que antecederam a coleta, resultando em valores acumulados. As demais variáveis foram obtidas pela média referente aos 12 meses que antecederam a coleta.

A variável umidade média do ar (UmiRel em porcentagem) foi calculada com base na equação proposta por Tetens (TETENS, 1930), estimando inicialmente a pressão máxima de vapor d'água (Equação 1.1) e, em seguida, a umidade (Equação 1.2).

$$e_s = 0,611 * 10^{[(7,5 * T_{ar}) / (237,3 + T_{ar})]} \quad \text{Equação 1.1}$$

Em que:

e_s é a pressão máxima de vapor d'água (kpa), e;

T_{ar} é a temperatura do ar (°C).

$$UR = \frac{e_a}{e_s} * 100 \quad \text{Equação 1.2}$$

Em que:

UR é a umidade relativa do ar (%);

e_a é a pressão atual de vapor d'água (kpa), e;

e_s é a pressão máxima de vapor d'água (kpa).

2.5 Análise estatística

Cada grupo de variáveis ambientais (ou seja, climáticas e edáficas) foi submetido à seleção direta para remover variáveis redundantes da análise (BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2018). Para avaliar a explicação fornecida pelas variáveis ambientais sobre a diversidade microbiana beta, cada grupo de variáveis ambientais foi submetido ao procedimento de partição de variância (Figura 1.2E), por meio da função *varpart* disponível no pacote *vegan* (BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2018; OKSANEN et al., 2022).

A diversidade beta das bactérias e fungos foi avaliada usando a Análise Canônica de Componentes Principais (ACP) com base na distância de Bray Curtis entre as amostras. Para isso, foi realizado uma ACP para cada grupo de variáveis ambientais e tipo microbiano (bactérias ou fungos). As métricas de diversidade alfa (Riqueza, equabilidade de Pielou e entropia de Shannon) foram calculadas usando o pacote *microbiome* (LAHTI; SHETTY, 2017) e suas correlações com as variáveis ambientais avaliadas pelas funções fornecidas pelo pacote *corrplot* (WEI; SIMKO, 2021). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa R (R CORE TEAM, 2022).

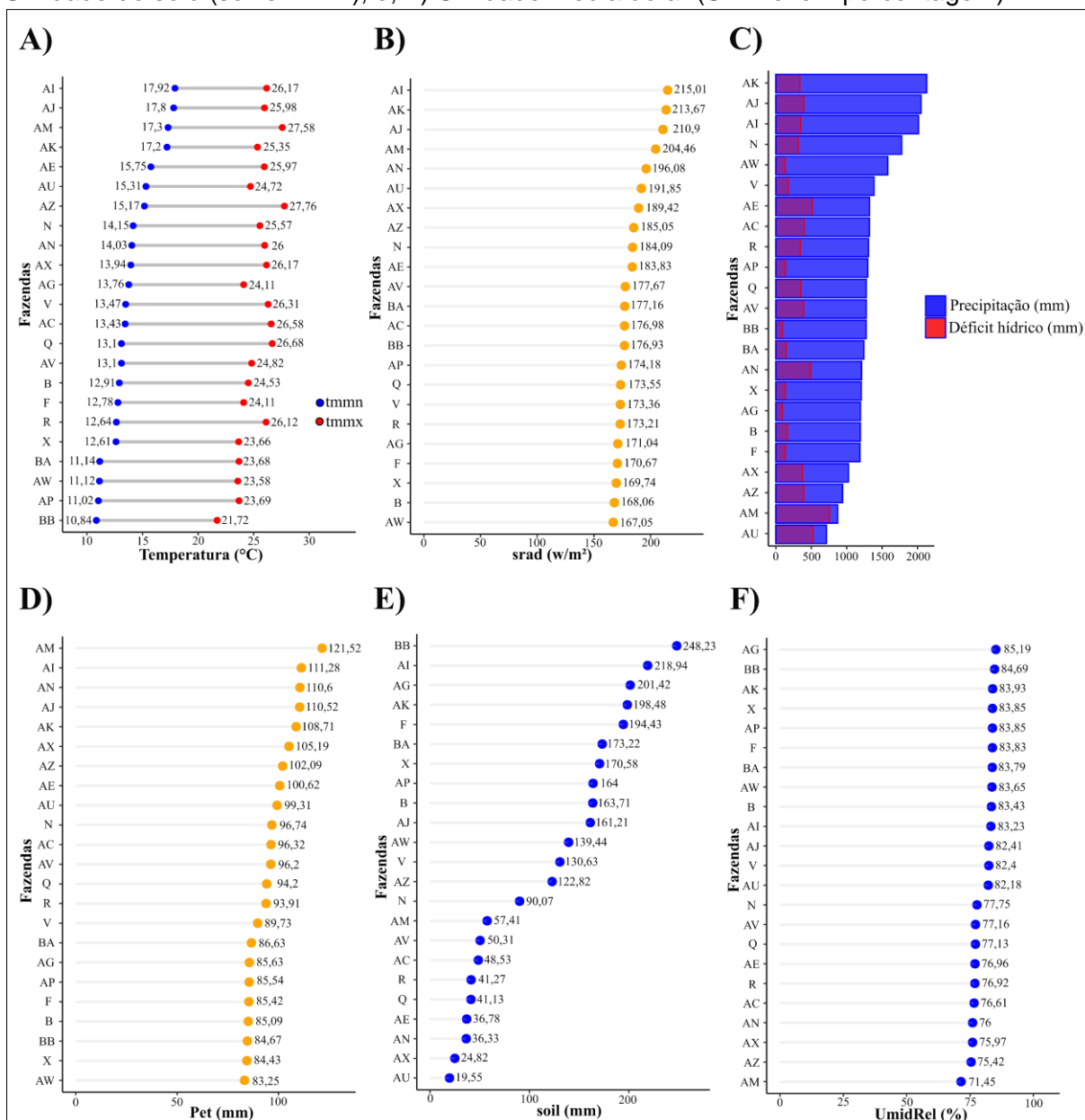
3 RESULTADOS

Dentre as fazendas com plantios de café arábica analisadas, nota-se que as fazendas do Ceará e de Pernambuco (AI, AJ, AM e AK) são as com temperatura

mínima mais elevada (Figura 1.3A) e com maior incidência de radiação solar de ondas curtas (Figura 1.3B) que está associada ao fato de o volume de radiação variar conforme a região do globo: as zonas que mais a recebem são as que ficam perto da linha do equador (CHEN et al., 2022), no caso deste estudo as fazendas do Ceará e Pernambuco.

A evapotranspiração potencial corresponde ao processo de transferência da água do solo para a atmosfera, ou a passagem de água do estado líquido para o gasoso. Tal processo requer suprimento de energia, e a única fonte disponível para isso é a radiação solar, de tal modo, as fazendas que recebem mais incidência de radiação solar (Figura 1.3B) e possuem água disponível (Figura 1.3C) tendem a possuir maior evapotranspiração potencial (Figura 1.3D), como, observado no estudo em relação às fazendas AM, AI, AN, AJ e AK, que apresentam maior evapotranspiração.

Figura 1.3. Variáveis climáticas utilizadas neste estudo: A) Temperatura mínima (tmmn em °C) e Temperatura máxima (tmmx em °C); B) Radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²); C) Precipitação acumulada e déficit hídrico; D) Evapotranspiração potencial (pet em mm); E) Umidade do solo (soil em mm), e; F) Umidade média do ar (UmiRel em porcentagem).



Fonte: a autora.

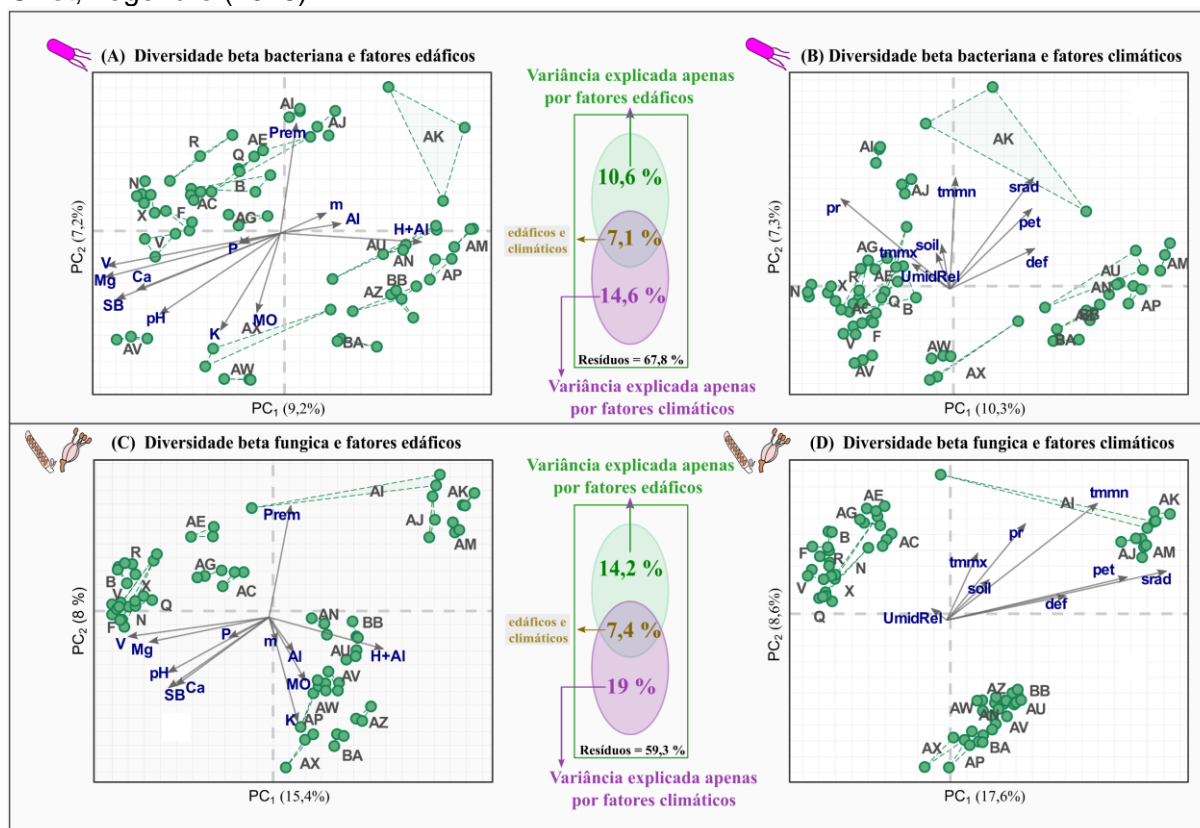
A diversidade beta das comunidades bacteriana e fúngica são afetadas tanto pelas condições edáficas quanto pelas ambientais (Figura 1.4). A variação da diversidade beta em ambos os tipos de microrganismos (fungos e bactérias) é melhor explicada pelas variáveis climáticas do que pelas do solo. Entretanto, grande parte da variância (67,8% para bactérias e 59,3% para fungos) não é explicada por nenhuma dessas variáveis, revelando que outros fatores também são responsáveis por essas diferenças.

A diversidade fúngica beta foi caracterizada pela formação de três grupos (Figura 1.4C e Figura 1.4D). O primeiro grupo, formado pelas fazendas AI, AJ, AK e AM localizados nos estados do Ceará e Pernambuco apresentou composição da comunidade fúngica diferente dos outros dois grupos. Estas fazendas também apresentaram os maiores valores de radiação, evapotranspiração e temperaturas mínimas.

O grupo 2 (Q, V, X, R, N, F, B, AG, AC, AE) e 3 (AX, AP, BA, AN, AW, AV, AU, AZ, BB) também apresentaram composição microbiana distinta entre eles e diferem do grupo 1 pelos menores valores de radiação, temperaturas mínimas e médias, e evapotranspiração.

Esses três grupos também estiveram presentes no ACP com as variáveis químicas de solo, porém, a separação não foi tão clara quanto para as variáveis climáticas. Os solos do grupo 1 foram caracterizados por menor quantidade de cátions (SB) e também baixa capacidade tampão de fósforo, refletindo na baixa quantidade de fósforo disponível (P).

Figura 1.4. Análise Canônica de Análise de Componentes Principais (ACP) baseada na distância de dissimilaridade Bray-Curtis de comunidades bacterianas (A) e (B) fúngicas restritas a variáveis edáficas e climáticas. Os valores entre parênteses indicam a porcentagem de variância explicada por cada eixo. A variância explicada por cada grupo de variáveis (ou seja, edáfica ou climática) foi obtida pela partição da variância conforme proposto por Borcard; Gillet; Legendre (2018).



pH = acidez ativa; P = Fósforo; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H+Al = acidez potencial; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica a pH 7; V = saturação de base; m = saturação de alumínio; MO = Matéria orgânica; Prem = fósforo restante; tmmx = temperatura máxima; tmmn = temperatura mínima; srad = radiação solar de ondas curtas; pr = precipitação acumulada; soil = umidade do solo; def = déficit hídrico; pet = evapotranspiração potencial e UmiRel = umidade média do ar.

Fonte: a autora.

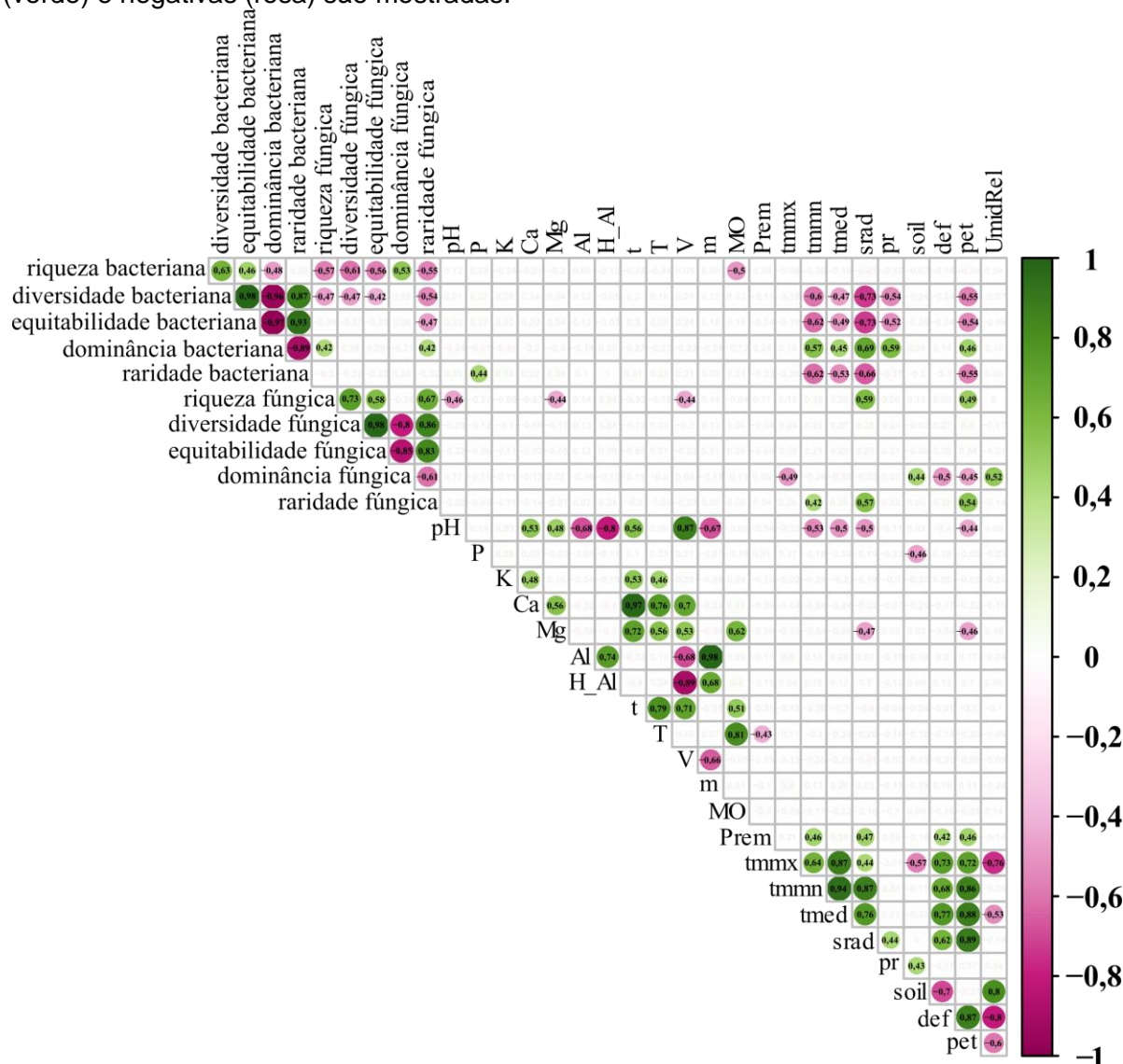
Assim como observado para a diversidade beta (Figura 1.4), as métricas de diversidade alfa (riqueza, diversidade, equitabilidade, dominância e raridade) das comunidades microbianas apresentaram correlações mais significativas com o clima do que com as variáveis químicas do solo (Figura 1.5).

A diversidade e equitabilidade bacteriana apresentam correlação negativa com as temperaturas mínima (tmmn), temperatura média (tmed), radiação solar de ondas curtas (srad), precipitação (pr) e evapotranspiração potencial (pet), ao mesmo tempo que essas variáveis foram positivamente correlacionadas com a dominância, mostrando que altos valores dessas variáveis climáticas levam à dominância de poucas espécies.

A raridade bacteriana se correlaciona positivamente com o fósforo presente no solo e negativamente com a temperatura mínima (tmmn), temperatura média (tmed), radiação de ondas curtas (srad) e evapotranspiração (pet) (Figura 1.5).

Por outro lado, para a comunidade fúngica baixos valores de pH, magnésio (Mg) e saturação por bases (V) e altos valores de radiação e evapotranspiração correlacionaram-se positivamente com a riqueza fúngica. A temperatura máxima (tmmx), déficit hídrico (def) e evapotranspiração (pet) se correlacionam negativamente com a dominância fúngica que se correlaciona positivamente com a umidade do solo (soil) e umidade média do ar (UmidRel); enquanto, a raridade fúngica se correlaciona positivamente com a temperatura mínima (tmmn), radiação de ondas curtas (srad) e evapotranspiração (pet) (Figura 1.5).

Figura 1.5. Correlação entre os índices microbianos (riqueza, diversidade, equitabilidade, dominância e raridade) e variáveis de solo e clima. Apenas correlações significativas positivas (verde) e negativas (rosa) são mostradas.

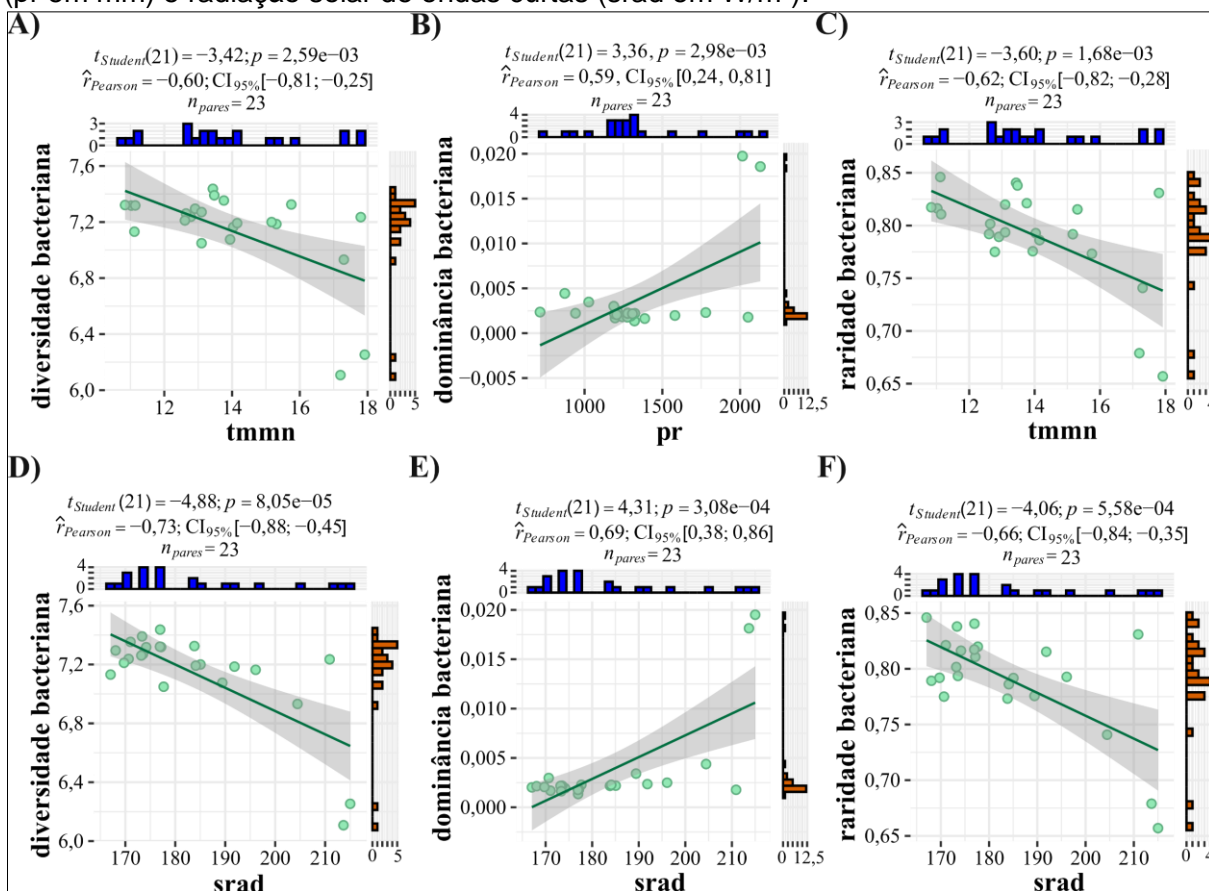


pH = acidez ativa; P = Fósforo; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; H_Al = acidez potencial; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica a pH 7; V = saturação de base; m = saturação de alumínio; MO = Matéria orgânica; Prem = fósforo restante; tmmx = temperatura máxima; tmmn = temperatura mínima; tmed = temperatura média; srad = radiação solar de ondas curtas; pr = precipitação acumulada; soil = umidade do solo; def = déficit hídrico; pet = evapotranspiração potencial e UmidRel = umidade média do ar.

Fonte: a autora.

Em relação a comunidade de bactérias nota-se que as variáveis climáticas demonstraram maior correlação com os índices analisados (Figura 1.4 e Figura 1.5), com destaque para a temperatura mínima, que apresenta correlação negativa com a diversidade (Figura 1.6A) e raridade (Figura 1.6C); precipitação, que apresenta correlação positiva com a dominância (Figura 1.6B); e, radiação de ondas curtas que apresenta correlação negativa com diversidade (Figura 1.6D) e raridade (Figura 1.6F), e positiva com dominância (Figura 1.6E).

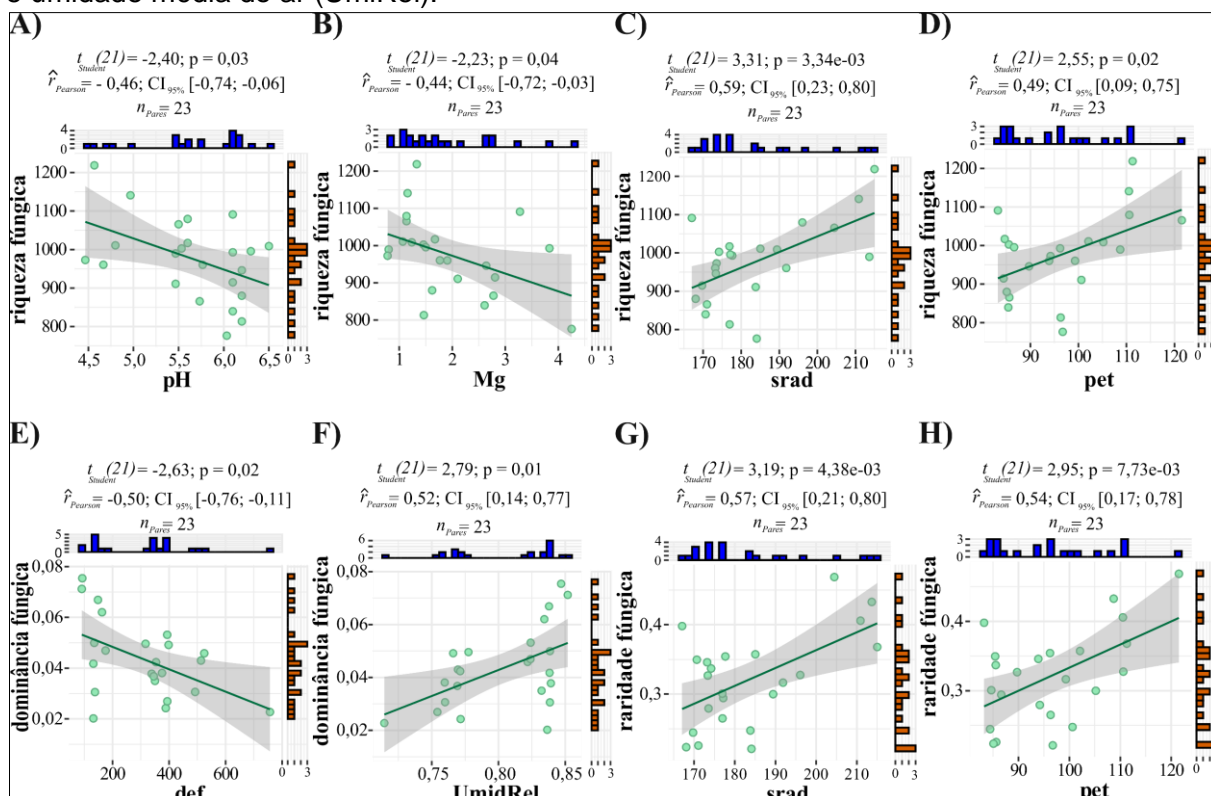
Figura 1.6. Correlação dos índices de diversidade alfa da comunidade bacteriana com algumas das variáveis climáticas: temperatura mínima (tmmn em °C), precipitação acumulada (pr em mm) e radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²).



Fonte: a autora.

Os índices referentes a diversidade da comunidade fúngica apresentaram correlação com as variáveis edáficas (química do solo) e climática. A correlação das variáveis químicas do solo, em relação a riqueza fúngica, foram negativas, com destaque para a acidez (pH) e o magnésio (Mg) (Figura 1.7A e Figura 1.7B). Enquanto, as variáveis climáticas, que mais se correlacionaram com os índices de diversidade alfa da comunidade fúngica, apresentaram correlação positiva, como: radiação de ondas curtas (srad) e evapotranspiração (pet) em relação a riqueza (Figura 1.7C e Figura 1.7D), umidade do ar (soil) em relação a dominância (Figura 1.7F) e radiação de ondas curtas (srad) e evapotranspiração (pet) em relação a raridade (Figura 1.7G e Figura 1.7H), a exceção é deficiência hídrica (def) que apresenta correlação negativa com a dominância fúngica (Figura 1.7E).

Figura 1.7. Correlação dos índices de diversidade alfa da comunidade fúngica com algumas das variáveis edáficas e climáticas: acidez ativa (pH), magnésio (Mg), radiação solar de ondas curtas (srad em W/m²), evapotranspiração potencial (pet em mm), déficit hídrico (def em mm) e umidade média do ar (UmiRel).



Fonte: a autora.

4 DISCUSSÃO

Nosso estudo fornece alguns *insights* sobre os padrões de diversidade de fungos e bactérias no solo de plantios de café arábica, correlacionando com variáveis climáticas e químicas do solo. Este é o primeiro estudo a analisar de maneira ampla a comunidade microbológica do solo nas principais regiões produtoras de café arábica no Brasil.

Espécies agrícolas e florestais necessitam de condições especiais a seu desenvolvimento, o *Coffea arabica* L. necessita de temperaturas moderadas, solos férteis e bem drenados, disponibilidade adequada de água e são sensíveis a geadas (CASSAMO et al., 2023; OVALLE-RIVERA et al., 2015). Essas características são ideais ao desenvolvimento, fazendo com que algumas áreas situadas entre os trópicos de Capricórnio e Câncer, ou seja, entre latitudes de 20 graus sul e 20 graus norte, sejam adequadas para o cultivo. Algumas regiões do Brasil possuem as condições adequadas para o desenvolvimento do café arábica, o que auxilia sua manutenção

como o maior país produtor e exportador de café arábica no mundo (VOLSI et al., 2019). No entanto, apesar das áreas produtoras de café possuírem características gerais comuns, cada área possui especificidades, o que as tornam únicas em relação à associação das variáveis climáticas, topográficas e edáficas.

Ao analisarmos as variáveis climáticas das fazendas produtoras de café, deste estudo, é possível notar que, devido a distribuição geográfica, no sentido norte-sul do território brasileiro temos uma variação de latitude (um dos principais fatores climáticos). As fazendas posicionadas mais ao norte (AI, AJ, AM e AK), mais próximas a linha do equador (Figura 1.2), apresentam maiores valores de radiação solar de ondas curtas (Figura 1.3B) e maiores temperaturas (Figura 1.3A). Isso ocorre devido ao fato de que as áreas com baixos valores de latitude, que se encontram próximas à linha do equador, recebem uma iluminação mais intensa dos raios solares, que incidem de maneira vertical. Já nas regiões de elevadas latitudes, mais próximas das zonas polares, os raios solares incidem obliquamente, resultando em menor intensidade (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Com isso, estabelece-se a seguinte relação entre o clima e as latitudes: quanto menor a latitude, maiores são as temperaturas por se ter maior radiação solar (Figura 1.2, Figura 1.3A e Figura 1.3B).

O fator climático latitude também afeta a precipitação (Figura 1.3C). De forma geral, as áreas mais próximas à linha do equador apresentam precipitação maior do que áreas mais distantes. Isso ocorre em razão do maior potencial de evaporação, na presença de água, devido a maior incidência dos raios solares (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; SOARES; BATISTA; TETTO, 2015). Embasado nesta correlação nota-se que as fazendas AK, AJ e AI apresentaram maior precipitação anual acumulada (Figura 1.3C), vale ressaltar que existe a influência de outros fatores como maritimidade/continentalidade e altitude, mas na análise geral ocorre uma maior influência do fator latitude em áreas com diferença significativa em relação a posição geográfica.

A evapotranspiração potencial está correlacionada com a quantidade de água, temperatura, vento e radiação solar que constitui a energia motora para conversão da água de estado líquido para gasoso (ZITOUNA-CHEBBI et al., 2023). De tal modo, as fazendas com maior temperatura e radiação solar tendem a ter maior evapotranspiração o que é observado neste trabalho, as fazendas AM, AI, AJ, AK e AN (Figura 1.3D), apresentam maiores valores de evapotranspiração potencial, destacamos aqui a fazenda AN localizada na Bahia em latitude um pouco superior as

demais, recebendo menos radiação solar, mas devido a associação dos demais fatores apresenta valores elevados de evapotranspiração potencial.

Os nutrientes minerais podem ser fornecidos à planta pelo solo e suplementados pelo uso de cal, fertilizante orgânico e fertilizante mineral, enquanto a natureza fornece o dióxido de carbono, energia solar, necessária para o processo fotossintético, e a água (DE CARVALHO ALVES et al., 2022). Os solos ideais ao cultivo de café arábica são aqueles com um pH neutro ou levemente ácido, também é importante que eles contenham nutrientes essenciais para o crescimento da planta, como nitrogênio, fósforo e potássio. Além disso, solos ricos em matéria orgânica são ideais para o cultivo de café arábica, pois ajudam a melhorar a estrutura do solo e aumentar a retenção de água (PREZOTTI; ROCHA, 2004). As áreas analisadas neste estudo possuem pH ácido a neutro e apresentam valores distintos para os macronutrientes e micronutrientes presentes no solo (Apêndice 1.1).

A diversidade beta da comunidade de bactérias e fungos, demonstrou uma sensibilidade maior em relação às variáveis climáticas do que em relação aos constituintes químicos do solo (Figura 1.4). Vários estudos analisaram a composição da microbiota do solo (BHATTACHARYA et al., 2022; GUANGHUA et al., 2008; LI et al., 2022; LIU et al., 2020; MALIK et al., 2017; SUN et al., 2013; ZHONG et al., 2019) e seus resultados expõem uma maior correlação da diversidade com a vegetação e a composição química do solo. No entanto, a maioria desses estudos utilizou técnicas de baixa resolução, as quais avaliam apenas alguns grupos funcionais de microrganismos, e usaram uma escala espacial relativamente pequena (regional), com gradiente climático relativamente baixo, ou foram realizadas em áreas não antropizadas. Nosso estudo possui gradiente latitudinal variando de 4,22° Sul a 23,50° Sul (Figura 1.2), o que constitui uma escala que abrange um gradiente considerável de condições climáticas e possui como cobertura vegetal uma única espécie, o *Coffea arabica* (com exceção de 5 fazendas, AI, AJ, AK, AW e R – sistema agroflorestal), em sistema de produção convencional, com adubação que atenda às necessidades da cultura, o que potencialmente justifica a maior influência dos fatores climáticos quando comparado a composição química.

Não há um único preditor ambiental que preveja consistentemente as mudanças na diversidade microbiana em diferentes escalas espaciais (LLADÓ; LÓPEZ-MONDÉJAR; BALDRIAN, 2017, 2018; MARTINY et al., 2011; POWELL et al., 2015), embora as propriedades do solo, o clima e as características das plantas estejam entre os preditores mais importantes e consistentes da diversidade

microbiana do solo, em escala espacial relativamente grande (DENG et al., 2018; MAESTRE et al., 2015; YANG et al., 2019).

Em nosso estudo, grande parte da variância na composição da diversidade beta (67,8% para bactérias e 59,3% para fungos) não foi explicada nem pela composição química do solo e nem pelas variáveis climáticas (Figura 1.4). Mas vale ressaltar que existe maior variação da comunidade fúngica explicada pela composição química do solo e pelas variáveis climáticas (14,2% pela composição química do solo, 19% pelas variáveis climáticas e 7,4% por ambas) do que da comunidade bacteriana (10,6% pela composição química do solo, 14,6% pelas variáveis climáticas e 7,1% por ambas). Tal resultado vai ao encontro do apresentado por trabalhos (LIU et al., 2020; VOŘÍŠKOVÁ; ELBERLING; PRIEMÉ, 2019), onde foi demonstrado que a diversidade de fungos apresenta maior sensibilidade a mudanças de temperatura do que a diversidade bacteriana. Tal resultado sugere que as comunidades fúngicas do solo são mais variáveis de acordo com as condições climáticas e químicas do solo.

As fazendas produtoras de café analisadas neste estudo formaram 3 grupos em relação a composição da comunidade fúngica (Figura 1.4C e Figura 1.4D) que são mais evidenciados pela ACP relativa às variáveis climáticas, destacando a temperatura mínima, radiação de ondas curtas e evapotranspiração potencial. O primeiro grupo foi formado pelas fazendas localizadas mais próximas à linha do equador (AI, AJ, AK e AM), que apresentam maiores valores de temperatura mínima, radiação e evapotranspiração potencial. Como mencionado anteriormente a temperatura e a evapotranspiração estão diretamente ligadas a radiação solar (ZITOUNA-CHEBBI et al., 2023).

Apesar da dificuldade em avaliar a resposta à temperatura da comunidade de microrganismos do solo *in situ*, os avanços no sequenciamento e nas matrizes de genes funcionais revelam que as mudanças na comunidade estão associadas ao aumento de temperatura no campo (CLASSEN et al., 2015; MELILLO et al., 2017; ROMERO-OLIVARES; ALLISON; TRESEDER, 2017; SCHINDLBACHER et al., 2011). O aquecimento tem impactos contrastantes sobre os fungos do solo em diferentes ecossistemas (JANSSON; HOFMOCKEL, 2020), resultando na estimulação ou na supressão da biomassa e atividade fúngica; essas diferenças são presumivelmente devidas a diferenças na umidade do solo e/ou vegetação em diferentes locais (ALLISON; TRESEDER, 2008). A similaridade dessas fazendas em relação a comunidade fúngica também está associada ao fato da adaptabilidade e

aptidão de cada microrganismo a condições ambientais e climáticas (SCHINDLBACHER et al., 2011).

Ao analisarmos as métricas de diversidade alfa (riqueza, diversidade, equitabilidade, dominância e raridade) da comunidade de bactérias notamos maior correlação com as variáveis climáticas do que com a composição química do solo (Figura 1.5). A diversidade bacteriana está mais correlacionada com a temperatura mínima ($\hat{r}_{t_{\text{mmn}}}$, $H^2 = -0,6$) e com a radiação solar de ondas curtas (\hat{r}_{srad} , $H^2 = -0,73$), do que com as demais variáveis (Figura 1.5 e Figura 1.6). Estudo realizado por Zhou et al. (2016) sugere que a temperatura é um fator importante na determinação da diversidade microbiana. No entanto, não é possível separar os efeitos diretos e indiretos da temperatura e da radiação nas comunidades microbianas porque essas variáveis são altamente correlacionadas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Li et al. (2022) também relatou que as comunidades microbianas em ambientes de alta temperatura são frequentemente dominadas por alguns tipos de microrganismos e muitas vezes são significativamente menos diversas do que aquelas em habitats de temperatura mais baixa.

A dominância bacteriana (Figura 1.5 e Figura 1.6) apresentou correlação positiva com a temperatura mínima ($\hat{r}_{t_{\text{mmn}}}$, $\gamma = 0,57$) e com a radiação solar de ondas curtas (\hat{r}_{srad} , $\gamma = 0,69$), resultado inverso ao obtido em relação a diversidade bacteriana. Isso ocorre porque em ecossistemas com baixa diversidade bacteriana, é mais comum que uma ou poucas bactérias sejam altamente dominantes (WANG et al., 2023), ou seja, que representem uma grande porcentagem do total de bactérias presentes.

Além disso, notou-se que a dominância bacteriana (Figura 1.5 e Figura 1.6) está correlacionada positivamente com a precipitação (\hat{r}_{pr} , $\gamma = 0,59$). A precipitação pode impactar a diversidade e distribuição de bactérias devido as alterações na disponibilidade de água e nutrientes. No entanto, deve-se ter cautela ao analisar a precipitação isoladamente, o estudo desenvolvido por Mateos-Rivera et al. (2016) demonstrou que a temperatura, precipitação e pH desempenham papel importante na formação da diversidade e dominância da comunidade bacteriana e que devido à alta correlação desses fatores e da influência deles sobre o desenvolvimento da planta a análise isolada deve ser cautelosa, sendo a correlação entre a comunidade de microrganismos mais associada a temperatura. Além do mais, um estudo desenvolvido por Wang, N. et al. (2014) em ambiente com simulação de precipitação

(irrigado) demonstrou não haver alteração da composição da comunidade bacteriana dominante, indicando que não somente a precipitação é responsável pela composição da comunidade bacteriana (diversidade e dominância) mas a associação de condições.

O índice de riqueza da comunidade fúngica (Figura 1.5 e Figura 1.7) apresentou correlação negativa com a acidez ativa ($\hat{r}_{\text{pH, chao1}} = -0,46$), magnésio ($\hat{r}_{\text{Mg, chao1}} = -0,44$) e índice de saturação por bases ($\hat{r}_{\text{v, chao1}} = -0,44$). Como o índice de saturação por bases reflete a soma de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}), incluindo o magnésio, destaca-se uma resposta da riqueza fúngica a presença de magnésio e a acidez ativa. Segundo Melz e Tiago (2009) os fungos são mais adaptados a valores baixos de pH (pH = 5) o que justifica o fato de termos encontrado em nosso estudo maior riqueza fúngica em solos mais ácidos. Vale ressaltar que possivelmente devido a faixa de pH analisada em nosso estudo (pH variando de 4,4 a 6,7) não notamos uma correlação forte entre o pH e a comunidade de bactérias, já que são mais adaptadas a valores de pH variando entre 6 e 8 (SOUTO et al., 2008).

Por outro lado, houve correlação positiva entre o índice de riqueza da comunidade fúngica (Figura 1.5 e Figura 1.7) e algumas variáveis climáticas, radiação solar de ondas curtas ($\hat{r}_{\text{srad, chao1}} = 0,59$) e evapotranspiração potencial ($\hat{r}_{\text{pet, chao1}} = 0,49$). Comportamento que se assemelha ao índice de raridade, que se correlacionou positivamente com a radiação solar de ondas curtas ($\hat{r}_{\text{srad, rar}} = 0,57$) e evapotranspiração potencial ($\hat{r}_{\text{pet, rar}} = 0,54$). Isso possivelmente ocorre devido ao fato de termos utilizado em nosso estudo o índice de riqueza de Chao1, que é igual a riqueza observada, somada ao quadrado do número de espécies representadas por apenas um indivíduo (*singletons*), dividido pelo dobro do número de espécies com apenas dois indivíduos (*doubletons*) (COLWELL; CODDINGTON, 1994; HUGHES et al., 2001), desta forma este índice leva em consideração a raridade, tendo uma correlação positiva com espécies que apresentam um único indivíduo. Ao analisar o comportamento dos dois índices (riqueza e raridade), pode-se concluir que a radiação solar e a evapotranspiração potencial se correlacionam de forma positiva com a ocorrência de espécies raras de fungos.

Valores mais elevados de evapotranspiração potencial estão ligados a vários fatores, como temperaturas mais altas, umidade relativa baixa, ventos fortes, e alta radiação solar (SOARES; BATISTA; TETTO, 2015), destacamos aqui a relação proporcional entre o aumento da radiação solar e da evapotranspiração potencial. Um

estudo desenvolvido por Zhang et al. (2018) que analisou os padrões biogeográficos da distribuição da comunidade de fungos em larga escala também encontrou correlação positiva entre a evapotranspiração potencial e o índice de raridade da comunidade fúngica.

A correlação negativa entre a dominância fúngica e o déficit hídrico ($\hat{r}_{\text{def}, \gamma} = -0,50$) e a correlação positiva entre a dominância fúngica e a umidade do solo ($\hat{r}_{\text{soil}, \gamma} = 0,44$), observado nas Figuras 1.5 e 1.7, sugere que a umidade do solo modera a competição entre os táxons de fungos indo ao encontro do sugerido por Hawkes et al. (2011).

Uma explicação possível para esse resultado é uma combinação de processos na forma de controle exercido pela planta em seu microbioma, culminando na resposta do microbioma (BAZANY et al., 2022). Existem duas hipóteses para essa interação, a primeira se embasa no fato de que a planta recruta intencionalmente os microrganismos que auxiliam na redução do estresse sofrido (RIZALUDIN et al., 2021; RODRIGUEZ; DURÁN, 2020; ROLFE; GRIFFITHS; TON, 2019), por meio da liberação de exsudados que funcionam como quimioatrativos e/ou fontes nutricionais para estimular comunidades microbianas benéficas, que não eram abundantes até aquele momento, a colonizar e fornecer alívio (DE VRIES et al., 2018).

A segunda explicação é que alteração na comunidade de microrganismos pode ser um subproduto do impacto causado pela umidade do solo sobre o banco de microrganismos do solo que passará a competir pelo elemento faltante, neste caso, a água (TRIVEDI et al., 2022). Isso ocorre porque os fungos têm maior dificuldade em competir com as plantas e outros organismos para obter água quando ela é escassa. Além disso, muitos fungos requerem umidade elevada para crescer e reproduzir-se, sendo assim, ambiente com solo úmido, baixa deficiência hídrica, beneficiam a multiplicação de alguns táxons fúngicos (KAISERMANN et al., 2015).

Desvendar os fatores determinantes da diversidade microbiana do solo são essenciais para direcionar o manejo das lavouras *C. arabica*. Uma vez compreendido quais fatores edáficos tendem a beneficiar populações microbianas promotoras de crescimento vegetal, a realização de manejo do solo durante a condução da lavoura pode otimizar o uso destes fatores que promovem incremento na produção vegetal via associação com microrganismos benéficos. Também vale ressaltar que grande parte da variação observada na diversidade microbiana em solos de *Coffea arabica* são explicados por fatores não abordados neste estudo (parte residual do diagrama da Figura 1.4). Desta forma, estudos futuros devem também investigar fatores

adicionais para propor um modelo mais completo para explicar os efeitos observados no microbioma.

5 CONCLUSÕES

No geral, a análise de áreas antropizadas, com dominância da espécie *Coffea arabica* e com gradiente considerável de latitude, demonstra que a diversidade beta da comunidade de bactérias e fungos é mais afetada pelas variáveis climáticas do que pelas variáveis químicas do solo. Além disso, a diversidade beta da comunidade de fungos possui maior sensibilidade em relação às variáveis climáticas e químicas do solo, do que a comunidade de bactérias. A temperatura mínima, radiação solar de ondas curtas e evapotranspiração potencial foram as variáveis que mais colaboraram para a formação dos grupos das fazendas em relação à similaridade da diversidade beta da comunidade fúngica. Por outro lado, em relação a diversidade alfa, as bactérias estão mais correlacionadas com a temperatura, radiação solar de ondas curtas, precipitação e evapotranspiração; enquanto, que os fungos estão mais correlacionados com a radiação solar de ondas curtas, evapotranspiração potencial, umidade relativa, umidade do solo e pH.

Os resultados deste estudo têm implicações importantes para maior entendimento do microbioma dos solos das áreas produtoras de café arábica em regiões tropicais. A diversidade de espécies, as propriedades do solo e as condições climáticas devem ser utilizadas como indicadores que auxiliem no desenvolvimento de formas de manejo mais sustentáveis, visando beneficiar a microbiota benéfica do solo para melhorar a multifuncionalidade do solo e do ecossistema.

6 REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 9 jan. 2018.
- ALLISON, S. D.; TRESEDER, K. K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. **Global Change Biology**, v. 14, n. 12, p. 2898–2909, dez. 2008.
- BARBERÁN, A. et al. Hiding in Plain Sight: Mining Bacterial Species Records for Phenotypic Trait Information. **mSphere**, v. 2, n. 4, 30 ago. 2017.
- BATÁRY, P. et al. The former Iron Curtain still drives biodiversity–profit trade-offs in German agriculture. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 9, p. 1279–1284, 21 ago. 2017.
- BAZANY, K. E. et al. Water deficit affects inter-kingdom microbial connections in plant rhizosphere. **Environmental Microbiology**, v. 24, n. 8, p. 3722–3734, 17 ago. 2022.
- BERG, G.; SMALLA, K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 68, n. 1, p. 1–13, abr. 2009.
- BHATTACHARYA, P. et al. Edaphic factors override temperature in shaping soil bacterial diversity across an elevation-vegetation gradient in Himalaya. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104306, 1 fev. 2022.
- BOESING, A. L.; NICHOLS, E.; METZGER, J. P. Biodiversity extinction thresholds are modulated by matrix type. **Ecography**, v. 41, n. 9, p. 1520–1533, set. 2018.
- BOLYEN, E. et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. **Nature Biotechnology**, v. 37, n. 8, p. 852–857, 24 jul. 2019.
- BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecology with R**. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- BOTE, A. D. et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. **European Journal of Agronomy**, v. 92, p. 115–122, 1 jan. 2018.
- BYERS, A. K. et al. Soil depth as a driver of microbial and carbon dynamics in a planted forest (*Pinus radiata*) pumice soil. **SOIL**, v. 9, n. 1, p. 55–70, 12 jan. 2023.
- CALLAHAN, B. J. et al. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. **Nature Methods**, v. 13, n. 7, p. 581–583, 23 maio 2016.
- CASSAMO, C. T. et al. Impact of climate changes in the suitable areas for *Coffea arabica* L. production in Mozambique: Agroforestry as an alternative management system to strengthen crop sustainability. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 346, p. 108341, 15 abr. 2023.

CHEN, Q. W. et al. Characterization of dominant factors on evapotranspiration with seasonal soil water changes in two adjacent forests in the semiarid Loess Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 613, p. 128427, 1 out. 2022.

CLASSEN, A. T. et al. Direct and indirect effects of climate change on soil microbial and soil microbial-plant interactions: What lies ahead? **Ecosphere**, v. 6, n. 8, p. art130, ago. 2015.

COLWELL, R. K.; CODDINGTON, J. A. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 345, n. 1311, p. 101–118, 29 jul. 1994.

CONAB. **Séries históricas das safras**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/894-cafe-arabica>>. 2022.

CROWTHER, T. W. et al. Predicting the responsiveness of soil biodiversity to deforestation: a cross-biome study. **Global Change Biology**, v. 20, n. 9, p. 2983–2994, set. 2014.

DE CARVALHO ALVES, M. et al. The role of machine learning on Arabica coffee crop yield based on remote sensing and mineral nutrition monitoring. **Biosystems Engineering**, v. 221, p. 81–104, set. 2022.

DE VRIES, F. T. et al. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2 ago. 2018.

DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, MG (Brazil), 1981.

DELGADO-BAQUERIZO, M. et al. Carbon content and climate variability drive global soil bacterial diversity patterns. **Ecological Monographs**, v. 86, n. 3, p. 373–390, ago. 2016.

DENG, Y. et al. Spatial scaling of forest soil microbial communities across a temperature gradient. **Environmental Microbiology**, v. 20, n. 10, p. 3504–3513, out. 2018.

DOVE, N. C. et al. Fire alters plant microbiome assembly patterns: integrating the plant and soil microbial response to disturbance. **New Phytologist**, v. 230, n. 6, p. 2433–2446, 4 jun. 2021.

FAHRIG, L. et al. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. **Ecology Letters**, v. 14, n. 2, p. 101–112, fev. 2011.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 28 dez. 2022.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, v. 15, n. 10, p. 579–590, 21 out. 2017.

GÁMEZ-VIRUÉS, S. et al. Landscape simplification filters species traits and drives biotic homogenization. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 8568, 20 out. 2015.

GARDES, M.; BRUNS, T. D. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes - application to the identification of mycorrhizae and rusts. **Molecular Ecology**, v. 2, n. 2, p. 113–118, 1 abr. 1993.

GUANGHUA, W. et al. Effects of fertilization on bacterial community structure and function in a black soil of Dehui region estimated by Biolog and PCR-DGGE methods. **Acta Ecologica Sinica**, v. 28, n. 1, p. 220–226, jan. 2008.

HAWKES, C. V. et al. Fungal community responses to precipitation. **Global Change Biology**, v. 17, n. 4, p. 1637–1645, abr. 2011.

HUGHES, J. B. et al. Counting the Uncountable: Statistical Approaches to Estimating Microbial Diversity. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 67, n. 10, p. 4399–4406, out. 2001.

IBGE. **Censo Brasileiro**. Disponível em:
<<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. 2022.

ISLAM, W. et al. Role of environmental factors in shaping the soil microbiome. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41225–41247, 23 nov. 2020.

JANSSON, J. K.; HOFMOCKEL, K. S. Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, n. 1, p. 35–46, 4 jan. 2020.

KAISERMANN, A. et al. Fungal communities are more sensitive indicators to non-extreme soil moisture variations than bacterial communities. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 158–164, fev. 2015.

LAHTI, L.; SHETTY, S. microbiome R package. 2017.

LANDIS, D. A.; WRATTEN, S. D.; GURR, G. M. Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. **Annual Review of Entomology**, v. 45, n. 1, p. 175–201, jan. 2000.

LEFF, J. W. et al. Predicting the structure of soil communities from plant community taxonomy, phylogeny, and traits. **The ISME Journal**, v. 12, n. 7, p. 1794–1805, 9 jul. 2018.

LEKBERG, Y.; WALLER, L. P. What drives differences in arbuscular mycorrhizal fungal communities among plant species? **Fungal Ecology**, v. 24, p. 135–138, dez. 2016.

LI, J. et al. Plant diversity and soil properties regulate the microbial community of monsoon evergreen broad-leaved forest under different intensities of woodland use. **Science of The Total Environment**, v. 821, p. 153565, maio 2022.

LIU, S. et al. Decoupled diversity patterns in bacteria and fungi across continental forest ecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 144, p. 107763, maio 2020.

LLADÓ, S.; LÓPEZ-MONDÉJAR, R.; BALDRIAN, P. Forest Soil Bacteria: Diversity, Involvement in Ecosystem Processes, and Response to Global Change. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 81, n. 2, jun. 2017.

LLADÓ, S.; LÓPEZ-MONDEJAR, R.; BALDRIAN, P. Drivers of microbial community structure in forest soils. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 10, p. 4331–4338, 30 maio 2018.

MAESTRE, F. T. et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 51, p. 15684–15689, 22 dez. 2015.

MALIK, A. A. et al. Bacterial physiological adaptations to contrasting edaphic conditions identified using landscape scale metagenomics. **mBio**, v. 8, n. 4, p. 799–816, 1 jul. 2017.

MARTIN, M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. **EMBnet.journal**, v. 17, n. 1, p. 10, 2 maio 2011.

MARTINY, J. B. H. et al. Drivers of bacterial β -diversity depend on spatial scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 19, p. 7850–7854, 10 maio 2011.

MATEOS-RIVERA, A. et al. The effect of temperature change on the microbial diversity and community structure along the chronosequence of the sub-arctic glacier forefield of Styggedalsbreen (Norway). **FEMS Microbiology Ecology**, v. 92, n. 4, p. fnw038, abr. 2016.

MELILLO, J. M. et al. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. **Science**, v. 358, n. 6359, p. 101–105, 6 out. 2017.

MELZ, E. M.; TIAGO, P. V. Propriedades físico-químicas e microbiológicas do solo de um Parque em Tangará da Serra, MT, uma área de transição entre Amazônia e Cerrado. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 829–834, 2009.

MÉNDEZ-ROJAS, D. M. et al. How diverse are sun-grown coffee plantations? Local and landscape heterogeneity drives Andean rove beetle diversity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 339, p. 108122, nov. 2022.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

NEWBOLD, T. et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. **Nature**, v. 520, n. 7545, p. 45–50, 2 abr. 2015.

NILSSON, R. H. et al. The UNITE database for molecular identification of fungi: handling dark taxa and parallel taxonomic classifications. **Nucleic Acids Research**, v. 47, n. D1, p. D259–D264, 8 jan. 2019.

OKSANEN, J. et al. **Community Ecology Package [R package vegan version 2.6-4]**. Comprehensive R Archive Network (CRAN), , 11 out. 2022. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=vegan>>. Acesso em: 21 dez. 2022

ORTIZ-ÁLVAREZ, R. et al. Network Properties of Local Fungal Communities Reveal the Anthropogenic Disturbance Consequences of Farming Practices in Vineyard Soils. **mSystems**, v. 6, n. 3, 29 jun. 2021.

OVALLE-RIVERA, O. et al. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. **PLOS ONE**, v. 10, n. 4, p. 13, 14 abr. 2015.

PAN, J. et al. Long-term optimization of crop yield while concurrently improving soil quality. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 8, p. 897–909, 15 maio 2019.

PAN, J. et al. Controlling factors for soil bacterial and fungal diversity and composition vary with vegetation types in alpine grasslands. **Applied Soil Ecology**, v. 184, p. 104777, abr. 2023.

PARADA, A. E.; NEEDHAM, D. M.; FUHRMAN, J. A. Every base matters: assessing small subunit rRNA primers for marine microbiomes with mock communities, time series and global field samples. **Environmental Microbiology**, v. 18, n. 5, p. 1403–1414, maio 2016.

POMPEU, J. Legal deforestation can jeopardize plant diversity conservation in an agricultural frontier in the Brazilian Cerrado: a spatial explicit contribution to Santana and Simon (2022). **Biodiversity and Conservation**, v. 31, n. 11, p. 2899–2903, 5 set. 2022.

POWELL, J. R. et al. Deterministic processes vary during community assembly for ecologically dissimilar taxa. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 8444, 5 out. 2015.

PREZOTTI, L. C.; ROCHA, A. C. DA. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, v. 63, n. 2, p. 239–251, 2004.

PRZEMIENIECKI, S. W. et al. Biometric, chemical, and microbiological evaluation of common wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings fertilized with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae meal. **Applied Soil Ecology**, v. 167, p. 104037, nov. 2021.

QUAST, C. et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. D1, p. D590–D596, 27 nov. 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, 2022. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RIZALUDIN, M. S. et al. The Chemistry of Stress: Understanding the ‘Cry for Help’ of Plant Roots. **Metabolites**, v. 11, n. 6, 1 jun. 2021.

RODRIGUEZ, R.; DURÁN, P. Natural Holobiome Engineering by Using Native Extreme Microbiome to Counteract the Climate Change Effects. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, 4 jun. 2020.

ROLFE, S. A.; GRIFFITHS, J.; TON, J. Crying out for help with root exudates: adaptive mechanisms by which stressed plants assemble health-promoting soil microbiomes. **Current opinion in microbiology**, v. 49, p. 73–82, 1 jun. 2019.

ROMERO-OLIVARES, A. L.; ALLISON, S. D.; TRESEDER, K. K. Soil microbes and

their response to experimental warming over time: A meta-analysis of field studies. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 107, p. 32–40, abr. 2017.

SCHINDLBACHER, A. et al. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1417–1425, jul. 2011.

SEMCHENKO, M. et al. Fungal diversity regulates plant-soil feedbacks in temperate grassland. **Science Advances**, v. 4, n. 11, 2 nov. 2018.

SILVA ARAGÃO, O. O. DA et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 1 jun. 2020.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015.

SOUTO, P. C. et al. Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 151–160, fev. 2008.

SUN, B. et al. Assessing the Relative Effects of Geographic Location and Soil Type on Microbial Communities Associated with Straw Decomposition. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 79, n. 11, p. 3327–3335, jun. 2013.

TESTE, F. P. et al. Plant-soil feedback and the maintenance of diversity in Mediterranean-climate shrublands. **Science**, v. 355, n. 6321, p. 173–176, 13 jan. 2017.

TETENS, O. Uber einige meteorologische Begriffe. **Z. geophys**, v. 6, p. 297–309, 1930.

TRIVEDI, P. et al. Plant–microbiome interactions under a changing world: responses, consequences and perspectives. **New Phytologist**, v. 234, n. 6, p. 1951–1959, 25 jun. 2022.

TSCHARNTKE, T. et al. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. **Biological Reviews**, v. 87, n. 3, p. 661–685, ago. 2012.

VELOSO, T. G. R. et al. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 14692, 7 dez. 2020.

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. e0219742, 1 jul. 2019.

VOŘÍŠKOVÁ, J.; ELBERLING, B.; PRIEMÉ, A. Fast response of fungal and prokaryotic communities to climate change manipulation in two contrasting tundra soils. **Environmental Microbiome**, v. 14, n. 1, p. 6, 18 dez. 2019.

WANG, J. et al. Changes in soil bacterial and fungal community characteristics in response to long-term mulched drip irrigation in oasis agroecosystems. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108178, abr. 2023.

WANG, N. et al. Effects of variation in precipitation on the distribution of soil bacterial diversity in the primitive Korean pine and broadleaved forests. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 11, p. 2975–2984, 29 nov. 2014.

WEI, T.; SIMKO, V. **R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix**. 2021. Disponível em: <<https://github.com/taiyun/corrplot>>

WU, X. et al. Land use change and stand age regulate soil respiration by influencing soil substrate supply and microbial community. **Geoderma**, v. 359, p. 113991, fev. 2020.

XU, X. et al. Microbial macroecology: In search of mechanisms governing microbial biogeographic patterns. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 11, p. 1870–1886, 4 nov. 2020.

YANG, T. et al. Phylogenetic imprint of woody plants on the soil mycobiome in natural mountain forests of eastern China. **The ISME Journal**, v. 13, n. 3, p. 686–697, 23 mar. 2019.

ZHANG, J. et al. Distinct large-scale biogeographic patterns of fungal communities in bulk soil and soybean rhizosphere in China. **Science of The Total Environment**, v. 644, p. 791–800, dez. 2018.

ZHONG, Z. et al. Edaphic factors but not plant characteristics mainly alter soil microbial properties along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* stands on Mt. Ziwuling, China. **Forest Ecology and Management**, v. 453, p. 117625, 1 dez. 2019.

ZHOU, J. et al. Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils. **Nature Communications**, v. 7, n. 1, p. 12083, 5 jul. 2016.

ZITOUNA-CHEBBI, R. et al. Documenting evapotranspiration and surface energy fluxes over rainfed annual crops within a Mediterranean hilly agrosystem. **Agricultural Water Management**, v. 277, p. 108117, 1 mar. 2023.

Apêndice

Apêndice 1.1. Resultado da análise química do solo das fazendas produtoras de café arábica analisadas neste estudo.

Fazenda	Repetição	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	(t)	(T)	V	m	MO	P-rem
AN	1	5,8	82,3	300	3,25	1,07	0	1,65	5,09	5,09	6,74	75,5	0	2,28	48,1
AN	2	5,5	139,5	260	3,55	1,02	0	2,64	5,23	5,23	7,87	66,5	0	2,28	67,2
AN	3	5,5	152,2	350	4	1,32	0	1,65	6,22	6,22	7,87	79	0	2,55	55,9
AU	1	4,5	123,7	200	4,66	1,42	0,2	8,25	6,59	6,79	14,84	44,4	2,9	5,51	38,3
AU	2	4,8	95,2	270	5,07	2,25	0	8,25	8,01	8,01	16,26	49,3	0	5,78	41,1
AU	3	4,7	161,1	330	5,78	1,63	0,1	8,25	8,25	8,35	16,5	50	1,2	6,18	41,1
AI	1	4,6	10,9	110	4,69	1,1	0	4,29	6,07	6,07	10,36	58,6	0	3,36	48,1
AI	2	4,6	7,3	145	4,88	1,42	0	4,95	6,67	6,67	11,62	57,4	0	4,43	46,1
AI	3	4,5	6,7	158	4,94	1,47	0	5,28	6,81	6,81	12,09	56,3	0	4,3	46,1
AJ	1	5,2	70,1	200	3,55	1,67	0,1	3,3	5,73	5,83	9,03	63,5	1,7	2,96	48,1
AJ	2	5	22,4	240	3,16	0,88	0,1	5,94	4,65	4,75	10,59	43,9	2,1	3,63	46,1
AJ	3	4,7	31,6	180	2,65	0,92	0,1	4,95	4,03	4,13	8,98	44,9	2,4	2,69	48,1
AK	1	5,1	5,9	70	2,8	0,89	0	3,3	3,87	3,87	7,17	54	0	2,82	39,6
AK	2	5,7	4,8	60	2,8	0,8	0	2,97	3,75	3,75	6,72	55,8	0	3,09	33,6
AK	3	5,6	5	64	2,64	0,71	0	2,64	3,51	3,51	6,15	57,1	0	2,82	33,6
AG	1	5,8	8,9	390	5,66	2,75	0	2,97	9,41	9,41	12,38	76	0	5,37	31,6
AG	2	5,8	7	310	7,33	3	0	3,3	11,12	11,12	14,42	77,1	0	5,51	31,6
AG	3	5,6	6,1	350	5,59	2,58	0	4,29	9,07	9,07	13,36	67,9	0	5,51	27,3
B	1	6,2	25,8	92	3,26	1,51	0	0,66	5,01	5,01	5,67	88,4	0	2,69	33,6
B	2	6,3	8,2	100	4,05	1,63	0	0,33	5,94	5,94	6,27	94,7	0	2,42	33,6
B	3	6,1	35,8	115	3,49	1,72	0	1,32	5,5	5,5	6,82	80,6	0	2,42	34,6
BA	1	6,5	25,1	430	7,23	1,76	0	1,32	10,09	10,09	11,41	88,4	0	3,9	20,1
BA	2	6,2	12	320	4,51	1,27	0	4,95	6,6	6,6	11,55	57,1	0	3,9	20,1
BA	3	6,2	26,5	490	5,66	1,47	0	3,96	8,38	8,38	12,34	67,9	0	4,43	20,1
BB	1	5,6	19	134	3,29	1,28	0	4,62	4,91	4,91	9,53	51,5	0	4,43	48,1
BB	2	5,8	19,6	144	4,71	2,33	0	3,3	7,41	7,41	10,71	69,2	0	4,3	32,6
BB	3	5,4	13,5	175	3,53	1,41	0	5,94	5,39	5,39	11,33	47,6	0	3,9	28,1
F	1	6,2	32,6	180	5,5	2,5	0	1,65	8,46	8,46	10,11	83,7	0	3,63	39,6
F	2	5,9	139,5	178	6,98	2,5	0	3,3	9,94	9,94	13,24	75,1	0	3,76	33,6
F	3	6,2	67,2	137	7,58	2,83	0	1,65	10,76	10,76	12,41	86,7	0	4,03	28,1
X	1	6,3	37	157	4,53	2,42	0	1,32	7,35	7,35	8,67	84,8	0	3,09	28,9
X	2	6,1	19,6	250	5,14	2,83	0	1,32	8,61	8,61	9,93	86,7	0	3,63	32,6
X	3	5,9	12,8	190	6,88	3,17	0	1,98	10,54	10,54	12,52	84,2	0	3,9	37
AC	1	5,7	243,9	570	7,68	1,35	0	1,32	10,49	10,49	11,81	88,8	0	3,76	42,6
AC	2	6,4	272,8	300	4,63	1,41	0	0,99	6,81	6,81	7,8	87,3	0	2,42	48,1
AC	3	6,5	280,7	550	5,52	1,63	0	1,32	8,56	8,56	9,88	86,6	0	2,42	44,3
AP	1	5,4	76,1	300	4,06	0,87	0	7,59	5,7	5,7	13,29	42,9	0	3,63	20,7
AP	2	5,2	116,2	350	4,62	1	0,1	7,59	6,52	6,62	14,11	46,2	1,5	3,76	21,8
AP	3	6	127,5	220	6,43	2,5	0	3,96	9,49	9,49	13,45	70,6	0	4,16	19
AW	1	6,2	14,4	360	8,88	3,83	0	3,63	13,63	13,63	17,26	79	0	6,85	21,3
AW	2	6,1	41,1	108	5,87	2,83	0	4,29	8,98	8,98	13,27	67,7	0	5,51	19
AW	3	6	82,3	180	7,83	3,17	0	4,62	11,46	11,46	16,08	71,3	0	6,31	20,7
AZ	1	4,7	48,1	250	3,75	0,82	0,4	9,24	5,21	5,61	14,45	36,1	7,1	5,1	19,6
AZ	2	4,7	30,6	270	4,35	1,18	0,3	7,92	6,22	6,52	14,14	44	4,6	5,1	18,5
AZ	3	5	26,5	230	4,32	1,2	0,1	8,58	6,11	6,21	14,69	41,6	1,6	5,1	23,7

N	1	5,8	17,5	115	8,68	3,83	0	4,62	12,8	12,8	17,42	73,5	0	5,1	32,6
N	2	6	17,5	127	12,63	4,75	0	1,65	17,7	17,7	19,35	91,5	0	6,99	31,6
N	3	6,3	15,2	370	10,68	4,17	0	1,65	15,8	15,8	17,45	90,5	0	6,18	26,5
Q	1	4,6	46,1	220	3,21	0,84	0,2	5,94	4,61	4,81	10,55	43,7	4,2	2,82	33,6
Q	2	4,4	37	192	3,09	0,8	0,2	7,26	4,38	4,58	11,64	37,6	4,4	3,22	32,6
Q	3	4,4	38,3	240	2,1	0,7	0,3	6,27	3,41	3,71	9,68	35,2	8,1	2,82	31,6
R	1	5,8	48,1	165	11,63	1,37	0	0,99	13,42	13,42	14,41	93,1	0	3,36	38,3
R	2	5,7	91,9	250	11,03	1,6	0	1,32	13,27	13,27	14,59	91	0	3,63	41,1
R	3	5,8	105,4	300	12,73	2,75	0	1,32	16,25	16,25	17,57	92,5	0	4,03	42,6
AX	1	6,3	34,6	460	10,68	0,75	0	0,66	12,61	12,61	13,27	95	0	2,69	21,8
AX	2	6,5	32,6	640	11,23	1,42	0	0,33	14,29	14,29	14,62	97,7	0	2,96	21,8
AX	3	6,7	31,6	400	10,58	1,54	0	0,99	13,14	13,14	14,13	93	0	2,82	23,1
AM	1	5,1	31,6	160	4,24	1,02	0	4,95	5,67	5,67	10,62	53,4	0	4,43	37
AM	2	5,7	7,9	153	3,81	1,37	0	2,64	5,57	5,57	8,21	67,8	0	4,03	31,6
AM	3	5,7	7	172	3,23	1,02	0	2,97	4,69	4,69	7,66	61,2	0	3,63	28,9
V	1	6,4	147,9	178	7,73	2,5	0	1,32	10,69	10,69	12,01	89	0	3,63	24,4
V	2	6,2	29,8	70	5,86	3	0	1,65	9,04	9,04	10,69	84,6	0	3,49	25,1
V	3	6	131,4	88	5,24	2,42	0	2,31	7,89	7,89	10,2	77,4	0	3,09	26,5
AE	1	5,5	98,5	80	2,02	2,08	0	2,97	4,3	4,3	7,27	59,1	0	2,15	41,1
AE	2	5,7	41,1	66	2,01	2,42	0	2,31	4,6	4,6	6,91	66,6	0	2,02	39,6
AE	3	5,2	30,6	50	1,92	1,81	0	3,63	3,86	3,86	7,49	51,5	0	2,82	37
AV	1	5,8	42,6	560	7,18	3,42	0	2,64	12,03	12,03	14,67	82	0	5,1	29,8
AV	2	6,2	127,5	640	8,63	3,83	0	1,98	14,1	14,1	16,08	87,7	0	5,78	29,8
AV	3	6,3	95,2	840	10,53	4,25	0	0,99	16,93	16,93	17,92	94,5	0	5,91	32,6

CAPÍTULO II

2. Relação das variáveis bioclimáticas e ambientais com a diversidade microbiana em plantios de *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner

RESUMO

Os solos abrangem uma gama variada de condições físicas, químicas e biológicas que interagem e impactam os processos críticos do ecossistema que sustentam a saúde das plantas. Entre os componentes do solo, a comunidade microbiológica funciona como um condutor ecológico de processos essenciais, sendo afetada por diferentes níveis de perturbação, fatores ecológicos e ambientais. Nosso objetivo aqui é correlacionar esses fatores com marcadores microbiológicos do solo em plantações de *Coffea canephora* no estado do Espírito Santo com diferentes características edafoclimáticas. Amostras de solo foram coletadas em fazendas de café canephora localizadas sob a copa das plantações de café. Condições topográficas, ambientais e climáticas foram analisadas para melhor entendimento de cada área de cultivo e correlação com a diversidade microbiológica. A comunidade bacteriana apresentou maior diversidade alfa e homogeneidade dentro de cada propriedade do que a comunidade fúngica. Além disso, houve maior correlação entre variáveis bioclimáticas e diversidade bacteriana do que fúngica. No entanto, a diversidade fúngica está mais correlacionada com a distância aos fragmentos florestais e a disponibilidade de potássio nas fazendas de *Coffea canephora*. Esses resultados ajudam a entender melhor a dependência de fatores da diversidade microbiana nas fazendas de café, que fornecem condições de solo para produtividade, qualidade do café e outros serviços do agroecossistema.

Palavras-chave: Café, fatores ambientais, microbioma do solo.

**Relation of bioclimatic and environmental variables with microbial diversity in
Coffea canephora Pierre ex A. Froehner plantations**

ABSTRACT

Soils encompass a varied range of physical, chemical, and biological variables that interact and impact critical ecosystem processes supporting plant health. Among the soil components, the microbiological community works as an ecological driver of essential processes, being affected by different levels of disturbance, ecological and environmental factors. We aim here to correlate these factors with soil microbiological markers in *Coffea canephora* plantation in the state of Espírito Santo with different edaphoclimatic features. Soil samples were collected in Robusta coffee farms located under the canopy of the coffee plantations. Topographic, environmental and climatic conditions were carried out for a better understanding of each cultivation area and correlation with microbiological diversity. The bacterial community showed greater alpha diversity and homogeneity within each property than the fungal community. In addition, there was a higher correlation between bioclimatic variables and bacterial diversity than fungal one. However, fungal diversity is more correlated with distance to forest fragments and potassium availability in *Coffea canephora* farms. These results help to better understand the factor-dependence of microbial diversity on coffee farms, which provide soil condition for productivity, coffee quality and other agroecosystem services.

Keywords: Coffee, environmental factors, soil microbiome.

1 INTRODUÇÃO

Uma gama diversificada de variáveis físicas, químicas e biológicas estão alojadas nos solos, interagem e impactam sinergicamente os processos críticos do ecossistema, apoiando a saúde das plantas (SCHLATTER et al., 2022). Os solos armazenam água, controlam a temperatura, fornecem a matriz física para o crescimento das raízes e disponibilizam os macro e micronutrientes requeridos pelas plantas, abrigando um grande número de microrganismos com funcionalidades diversas, que interagem e contribuem para as trocas que ocorrem entre as plantas e o solo, por exemplo, por bactérias fixadoras de nitrogênio (NFB), que promove diversos benefícios para as culturas agrícolas, como o aumento da produtividade (HELLEQUIN et al., 2021).

Os microrganismos do solo são engenheiros ecológicos de processos essenciais, pois realizam a decomposição da serrapilheira, transformam o carbono do solo e a ciclagem de nutrientes (FUHRMAN, 2009; NAYLOR et al., 2020). O desenvolvimento tecnológico em sequenciamento de alto rendimento aumentou significativamente a capacidade de caracterizar comunidades microbiológicas e explorar as forças motrizes das funções microbianas no solo, a fim de planejar e otimizar o manejo de diferentes culturas (XUE; MINASNY; MCBRATNEY, 2022). Ao fazer isso, as plantas moldam a composição e a diversidade da microbiota do solo por meio de rizodépósitos e da arquitetura de suas raízes (ZAK et al., 2003), afetando a comunidade microbiana do solo direta ou indiretamente, enriquecendo e/ou ativando microrganismos específicos e esgotando e/ou inibindo outros (HELLEQUIN et al., 2021). Tais comunidades de microrganismos contribuem para a saúde dos solos e são fundamentais para os serviços ecossistêmicos, como ciclagem de carbono e nutrientes, agregação do solo por meio da produção de compostos extracelulares (COSTA; RAAIJMAKERS; KURAMAE, 2018; SCHLATTER et al., 2022), degradação de poluentes (GALAZKA et al., 2018), aumento da absorção de nutrientes e água pelas plantas (JACOBY et al., 2017), promoção do crescimento vegetal (ÇAKMAKÇI et al., 2006) e supressão de doenças (SCHLATTER et al., 2017).

Dada a importância da interação microbioma-solo-planta, é essencial entender a correlação entre os fatores bióticos e abióticos que o afetam e a montagem da comunidade ao longo do espaço que determina suas propriedades funcionais. Essas ligações são especialmente importantes para a análise de ecossistemas terrestres modificados pelo homem, pois os microrganismos desempenham papéis críticos

relacionados à resistência e resiliência das comunidades de plantas acima do solo ao estresse e à perturbação (PUTTEN et al., 2016; WARDLE et al., 2004) e conduzem a grande maioria dos ciclos biogeoquímicos nos solos (FALKOWSKI; FENCHEL; DELONG, 2008).

A agricultura é uma das modificações ecossistêmicas mais difundidas pela humanidade e necessita ser implantada de forma mais sustentável (CHAPARRO et al., 2012; TOJU et al., 2018), a determinação dos mecanismos de montagem das comunidades microbianas demonstra ser um excelente ponto de partida para o entendimento e sustentabilidade das paisagens agrícolas. Isso é especialmente exigido nas lavouras de café, pois o café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e é conhecido por seu sabor único (DANKOWSKA; DOMAGAŁA; KOWALEWSKI, 2017; MONAKHOVA et al., 2015). As principais espécies comerciais em todo o mundo são *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, comumente conhecidas como Arábica e Robusta, respectivamente (GUNNING et al., 2018). Atualmente, o Brasil é o maior produtor de café, respondendo por 36,8% da produção mundial, que ficou em torno de 170,9 milhões de sacas na safra 2018/19 (ICO, 2019). Dentre as espécies mais comercializadas, o estado do Espírito Santo se destaca na produção de café *Canephora*, sendo o maior produtor do Brasil, responsável por aproximadamente 75% da produção nacional, o que equivale a 20% da produção mundial (INCAPER, 2019).

Além das plantas, a distribuição da microbiota do solo também pode ser afetada por mudanças ambientais, por diferentes níveis de perturbação (YIN et al., 2010; ZHAN et al., 2014), por fatores ecológicos, como gradientes de altitude (VELOSO et al., 2020; WANG; SHAO; SHAO, 2010) e condições climáticas. Além do solo, a relação entre o microbioma do solo e a vegetação natural tem sido uma questão central em algumas linhas de pesquisa (BERNIER; GILLET, 2012; CAVARD et al., 2011; YANG et al., 2021).

O trabalho realizado por Veloso et al., (2020) aponta que o solo pode atuar como fonte de microrganismos para o grão de café. Os microrganismos presentes no fruto são responsáveis por metabolizar e excretar os constituintes químicos responsáveis pelas diferentes nuances e sabores do café, demonstrando a existência de correlação entre fatores climáticos e ambientais na microbiota e, em um segundo nível, refletindo diretamente na qualidade/sabor final do café. Uma forma de entender essa correlação seria por meio da diversidade alfa e beta, que são usadas para descrever e medir a diversidade de microrganismos, sendo uma ferramenta

importante para estimar a riqueza de espécies em várias escalas e para entender as mudanças na composição da comunidade (SIGNORINI et al., 2021; SUN et al., 2022).

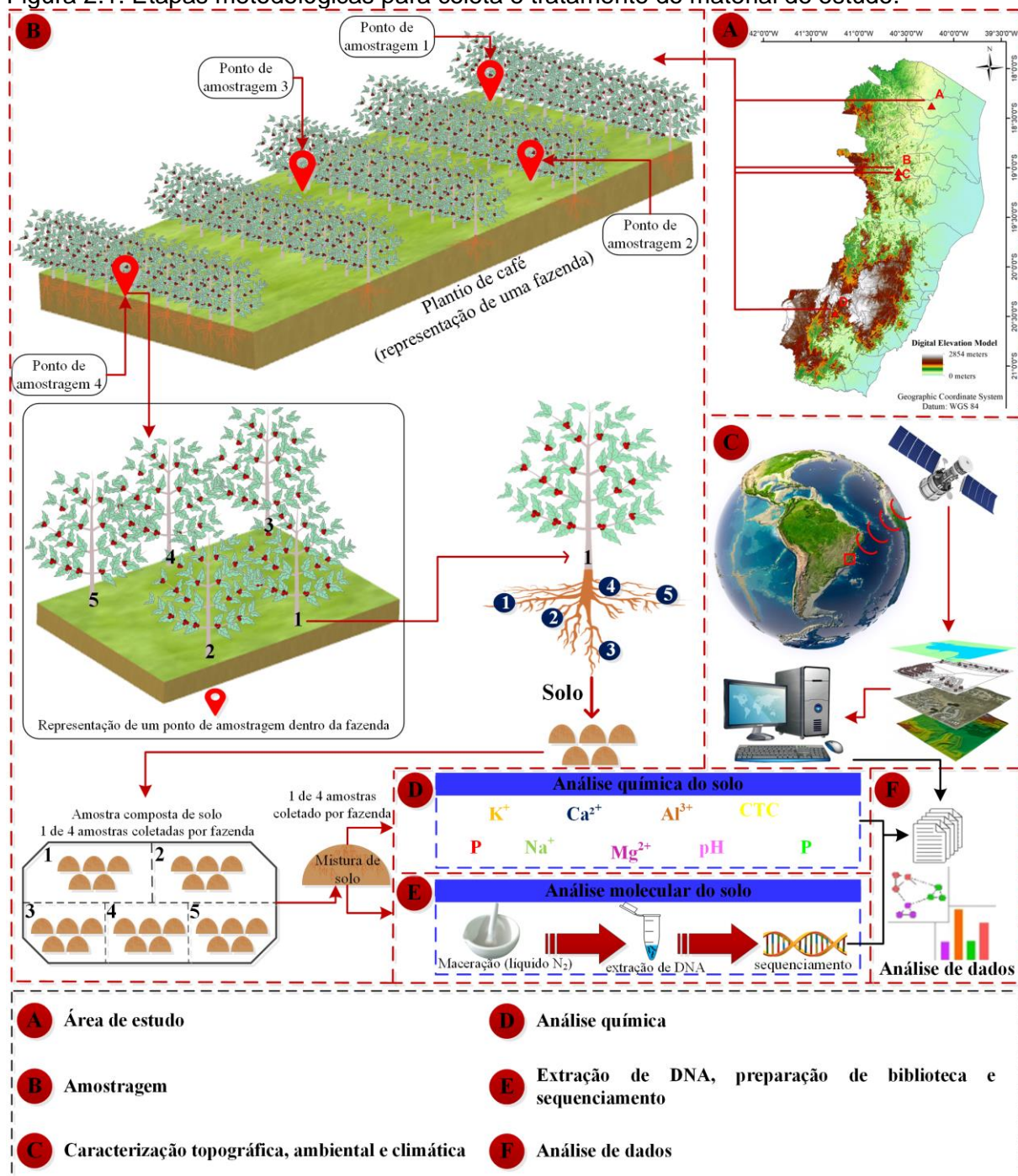
Nossa hipótese é que fatores topográficos, índices de vegetação, fatores climáticos e químicos podem influenciar a diversidade de espécies e composição microbiana de plantações de *Coffea canephora* e que a proximidade de fragmentos florestais nessas áreas aumenta a diversidade da comunidade de microrganismos, sendo o objetivo deste estudo correlacionar esses fatores com a comunidade de fungos e bactérias do solo, em áreas produtoras de *Coffea canephora* no estado do Espírito Santo. Com isso, espera-se entender quais dos fatores analisados são os mais relevantes nas métricas alfa e beta da diversidade, o desdobramento de tal relação, a taxonomia dos organismos presentes e a identificação das funções biológicas potenciais, como a fixação de nitrogênio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos em 4 fazendas produtoras de café *Canephora*, localizadas no estado do Espírito Santo, Sudeste do Brasil, localizadas entre os paralelos 17°53'29" e 21°18'03" de latitude sul e os meridianos 39°41'18" e 41°52'45" de longitude Oeste de Greenwich. As quatro fazendas utilizam o sistema de cultivo convencional, com altitudes de 138, 130, 225 e 409 metros para as fazendas A, B, C e D, respectivamente (Figura 2.1).

Figura 2.1. Etapas metodológicas para coleta e tratamento do material de estudo.



Fonte: a autora.

2.2 Amostragem

Dentro de cada fazenda, foram coletadas quatro amostras compostas de solo (cerca de 300 gramas/cada), cada amostra composta foi proveniente de vinte e cinco pontos aleatórios, colhidas a 10 cm de profundidade e sob a projeção da copa do cafeeiro (Figura 2.1). Durante a coleta de amostras, a borda dos cafeeiros foi excluída, evitando possíveis efeitos de bordadura. Em seguida, todas as amostras foram

armazenadas em sacos plásticos estéreis e transportadas ao laboratório sob refrigeração e mantidas a -20 °C.

2.3 Caracterização topográfica, ambiental e climática

Dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram utilizados (FARR et al., 2007) para obter as altitudes (V1) das fazendas em estudo. Foi realizada fotointerpretação em tela da feição dos fragmentos florestais em escala 1:3.000, em ambiente SIG, no ortofotomosaico do ano 2012-2015 (IEMA, 2015). Em seguida, calculou-se a distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2) às áreas de produção de café, com base nas coordenadas geográficas de cada fazenda, coletadas por meio do Garmin GPSMAP 64S (Figura 2.1).

O índice de vegetação de diferença normalizada – NDVI (V3) foi derivado do MOD13A2, produzido em intervalos de 16 dias, com resolução espacial de 1 km². Com base nas imagens do NDVI 2019, calculou-se a média para o estado do Espírito Santo no *Google Earth Engine* e, a seguir, extraiu-se o valor com base nas coordenadas geográficas das fazendas.

As variáveis climáticas utilizadas (V4 a V22), derivadas dos valores mensais de temperatura e precipitação descritos no Apêndice 2.1, foram obtidas da plataforma *WorldClim* que fornece dados climáticos mensais interpolados em uma resolução espacial de aproximadamente 1 km², agregados em um intervalo alvo temporal de 1970-2000 (FICK; HIJMANS, 2017).

2.4 Análise química

Um total de 100 mg das amostras compostas foram utilizadas para análise de solo (Laboratório de Análise de Solos de Viçosa, MG, Brasil) para descrever sua composição química (Figura 2.1 e Apêndice 2.2). O pH do solo (V23) foi medido em água (relação solo: água = 1: 2,5). A acidez potencial (V29) foi determinada com acetato de cálcio em pH 7,0. A solução do ácido Mehlich⁻¹ foi utilizada como extrator de P (V24) e K (V25). Cálcio (V26), Magnésio (V27) e Alumínio (V28) foram extraídos por solução de KCl (1 mol/L) e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados permitiram determinar a soma de bases (V30), saturação de bases (V33), saturação de alumínio (V34), capacidade efetiva de troca catiônica (V31) e capacidade de troca catiônica em pH 7 (V32) (DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, 1981).

2.5 Extração de DNA, preparação de biblioteca e sequenciamento

Um total de 250 mg de solo, de cada amostra, foi usado para extração de DNA, usando o kit *Nucleospin Soil (Macherey-Nagel)*. A lise celular foi realizada por 50 segundos a 4000 rpm usando o homogeneizador *Precellys 24*. As demais etapas foram realizadas de acordo com os protocolos do fabricante do kit de extração. Após as extrações, a quantidade e a qualidade do DNA foram avaliadas por eletroforese em gel de agarose 0,8% corado com brometo de etídio.

A região variável bacteriana quatro do gene 16S foi amplificada com o par de primers 515F (5' GTGYCAGCMGCCGCGGTAA-3') e 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3') e as regiões fúngicas ITS1 foram amplificadas usando o par ITS1F (5' - CTTGGTCATTTTAGAGGAAGTAA-3') e ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'). As bibliotecas para sequenciamento foram preparadas de acordo com Veloso et al. (2020) e sequenciados na plataforma *Illumina Miseq*, utilizando os protocolos 2x250 bp e 2x151 bp, para fungos e bactérias, respectivamente (Figura 2.1).

2.6 Análise de dados

Etapa 1 - Análise bioinformática

As sequências bacterianas brutas 16S foram desmultiplexadas e os adaptadores “*forward*” e “*reverse*” removidos. Todas as sequências com menos de 100 pares de bases foram removidas para análise posterior. As sequências foram processadas usando o algoritmo *Divisive Amplicon Denoising 2 (DADA2)* para remover leituras de baixa qualidade, corrigir erros de sequenciamento, remover quimeras e classificá-las em ASVs (*Amplicon Sequence Variants*). A anotação taxonômica das sequências bacterianas remanescentes foi realizada por meio de um algoritmo treinado *porclass-sklearn* presente no software Qiime2 (BOLYEN et al., 2019b) usando sequências do banco de dados SILVA 138 (QUAST et al., 2012).

Após a remoção dos adaptadores e sequências menores que 100 pb das leituras ITS1 fúngicas, o software ITSX foi usado para remover as regiões flaqueadoras 18S e 5.8S (BENGTSSON-PALME et al., 2013), mantendo apenas o espaçador transcrito interno (ITS1). Em seguida, o algoritmo DADA2 foi usado para remover quimeras, corrigir erros de sequenciamento, remover sequências de baixa qualidade e definir ASVs para análise posterior. Todos os procedimentos de bioinformática realizados até o momento foram realizados no Qiime2 versão 2021.4 (BOLYEN et al., 2019b).

Etapa 2 - Análise estatística

Inicialmente, foi feita uma comparação entre as variáveis químicas do solo pelo teste de Tukey. A comparação entre as métricas de diversidade alfa foi realizada pelo procedimento de *Kruskal-Wallis*. As relações entre as variáveis topográficas (V1), ambientais (V2 e V3), climáticas (V4 a V22) e microbiológicas foram avaliadas por meio da correlação de Pearson e o nível de significância de cada par foi medido pelo p-valor obtido por meio da função *cor.test* (R CORE TEAM, 2020). As variáveis topográficas (V1), ambientais (V2 e V3) e climáticas (V4 a V22) foram selecionadas com base naquelas que melhor explicam a variação da microbiota do solo pelo método proposto por Borcard; Gillet e Legendre (2011), e as variáveis químicas (V23 a V35) foram submetidas ao procedimento de “seleção direta” descrito por Borcard, Gillet e Legendre (2018) no software R (R CORE TEAM, 2020) para reduzir o número de variáveis, pois algumas possuem colinearidade. Onze das vinte e duas variáveis topográficas, ambientais e climáticas (V2, V3, V5, V6, V15, V16, V17, V18, V19, V20 e V22) e cinco das treze variáveis químicas (V23, V24, V25, V29 e V34) foram selecionados usando esses procedimentos. As análises subsequentes (ordenação, índices de diversidade alfa e beta) foram todas realizadas no software R (R CORE TEAM, 2020) usando os pacotes '*phyloseq*', '*vegan*', '*agricolae*' e '*ggplot2*' (MCMURDIE; HOLMES, 2013; OKSANEN et al., 2020; WICKHAM, 2009). Para as métricas alfa foram calculadas a riqueza observada, a equitabilidade de Pielou e o índice de entropia de Shannon (JOST, 2010), e para o cálculo da diversidade beta foi utilizada uma análise de coordenadas principais (PCoA – Análise de coordenadas principais) baseada na matriz de distância de Bray-Curtis.

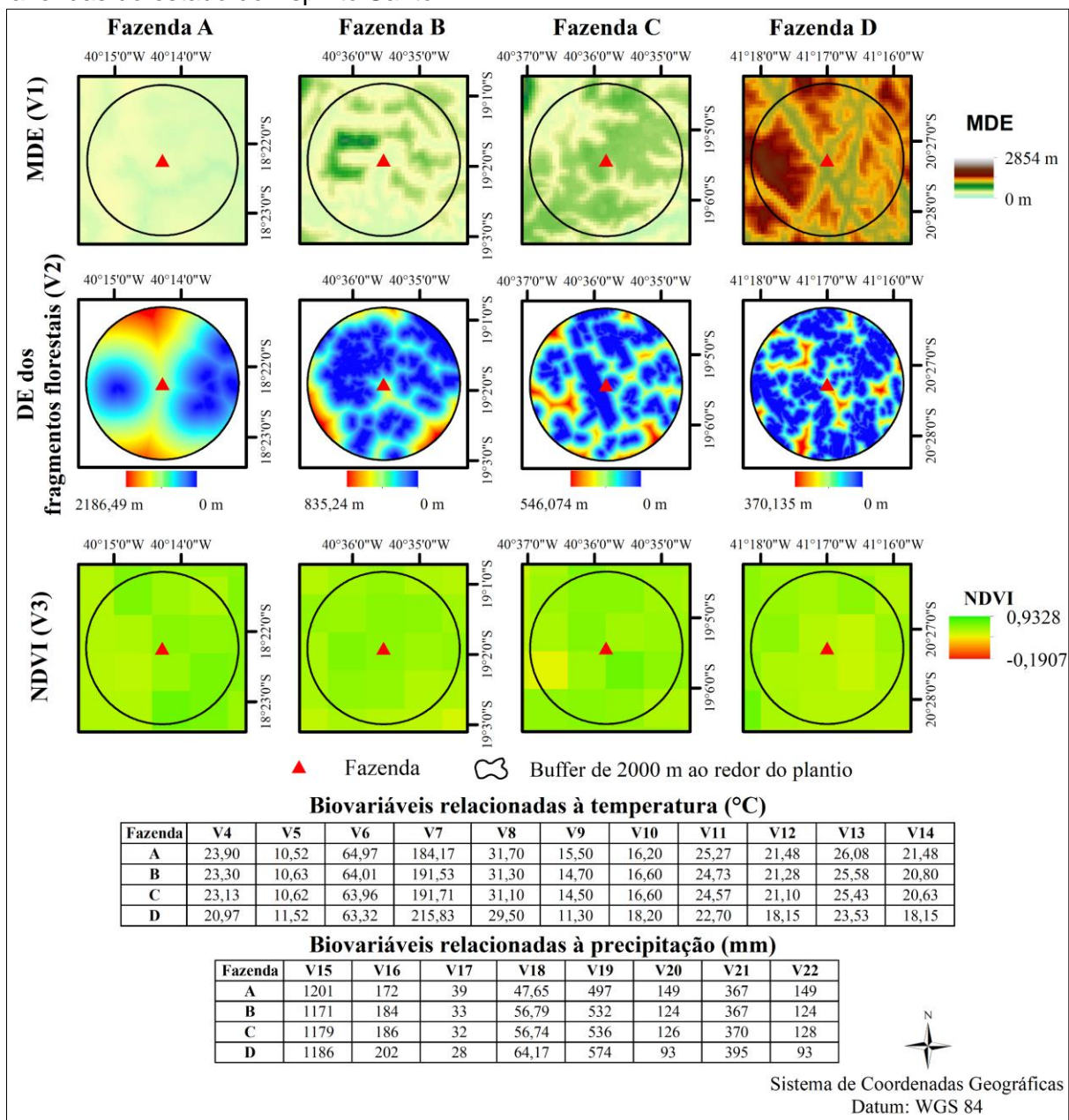
3 RESULTADOS

3.1 Caracterização topográfica, ambiental e climática

Ao analisar as variáveis referentes a topografia (V1), ambiente (V2 e V3) e clima (V4 a V22) nota-se que a fazenda D possui a maior altitude (409 metros), a fazenda A foi a que apresentou a maior distância euclidiana em relação aos fragmentos florestais (1.060,66 metros) e que o NDVI é muito semelhante entre fazendas (variando de 0,6 a 0,7) (Figura 2.2). Além disso, a fazenda D também apresentou a menor temperatura média (V4 = 20,97°C), máxima (V8 = 29,50°C) e mínima (V9 = 11,30°C) e, em termos de precipitação, a fazenda A tem a maior precipitação anual

(V15 = 1.201 mm) distribuídos de forma mais homogênea, o que pode ser percebido pelo baixo valor de sazonalidade (V18 = 47,64).

Figura 2.2. Altitude (V1), distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2), índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI (V3) e variáveis climáticas (V4 a V22) das quatro fazendas do estado do Espírito Santo.



Fonte: a autora.

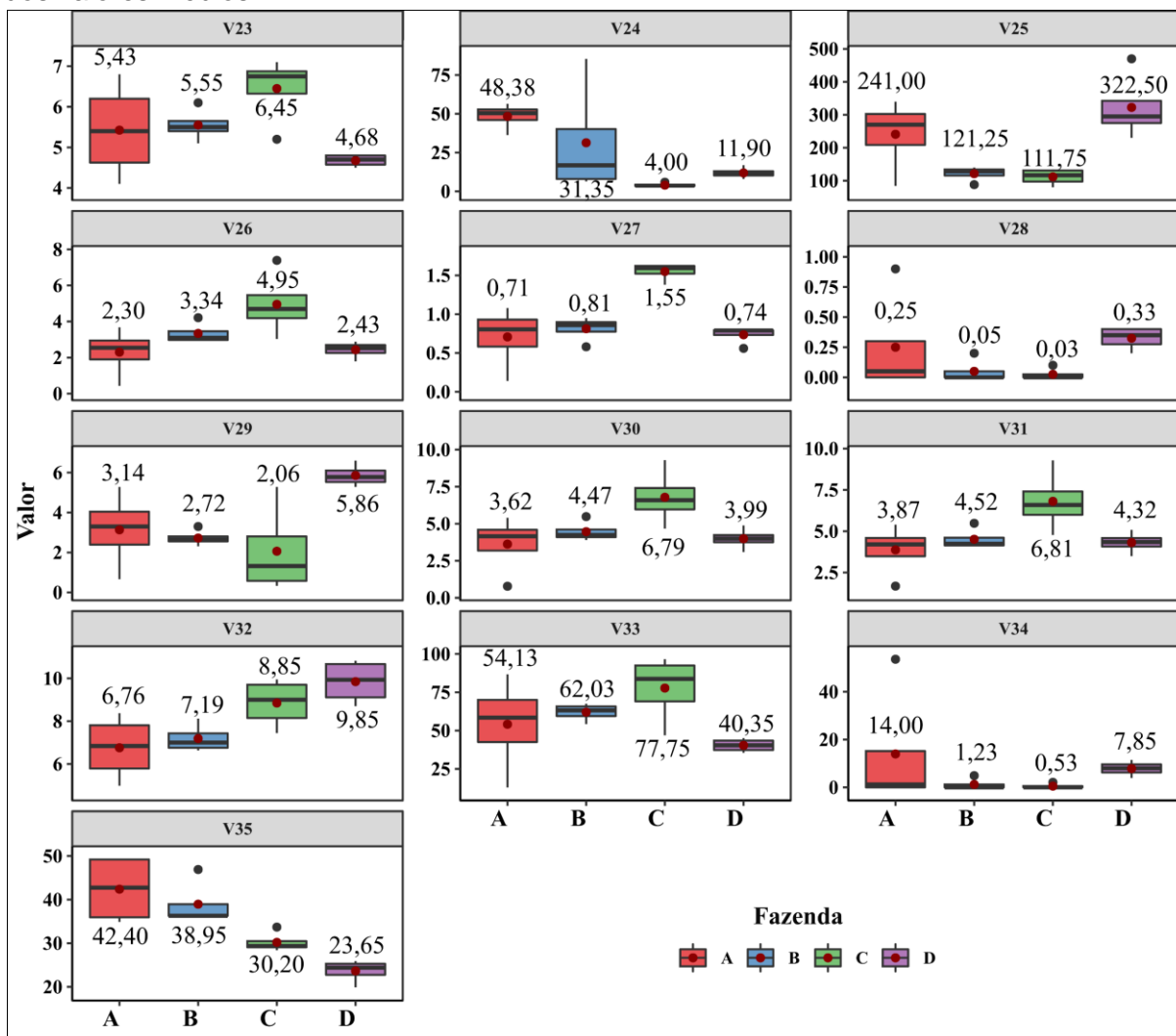
3.2 Painel da análise química

As propriedades químicas dos solos foram diferentes para algumas variáveis analisadas, a Fazenda D apresentou maior acidez (V29) que as fazendas A e B, que tiveram maior acidez que a fazenda C (Figura 2.3).

A fazenda C apresentou a maior soma de bases trocáveis (V30), enquanto a fazenda A apresentou o menor valor. As fazendas A e D apresentaram os maiores

valores médios de saturação de alumínio (V34), o que pode expressar a toxicidade do solo (Figura 2.3).

Figura 2.3. Propriedades químicas do solo das 4 fazendas analisadas, com representação dos valores médios.



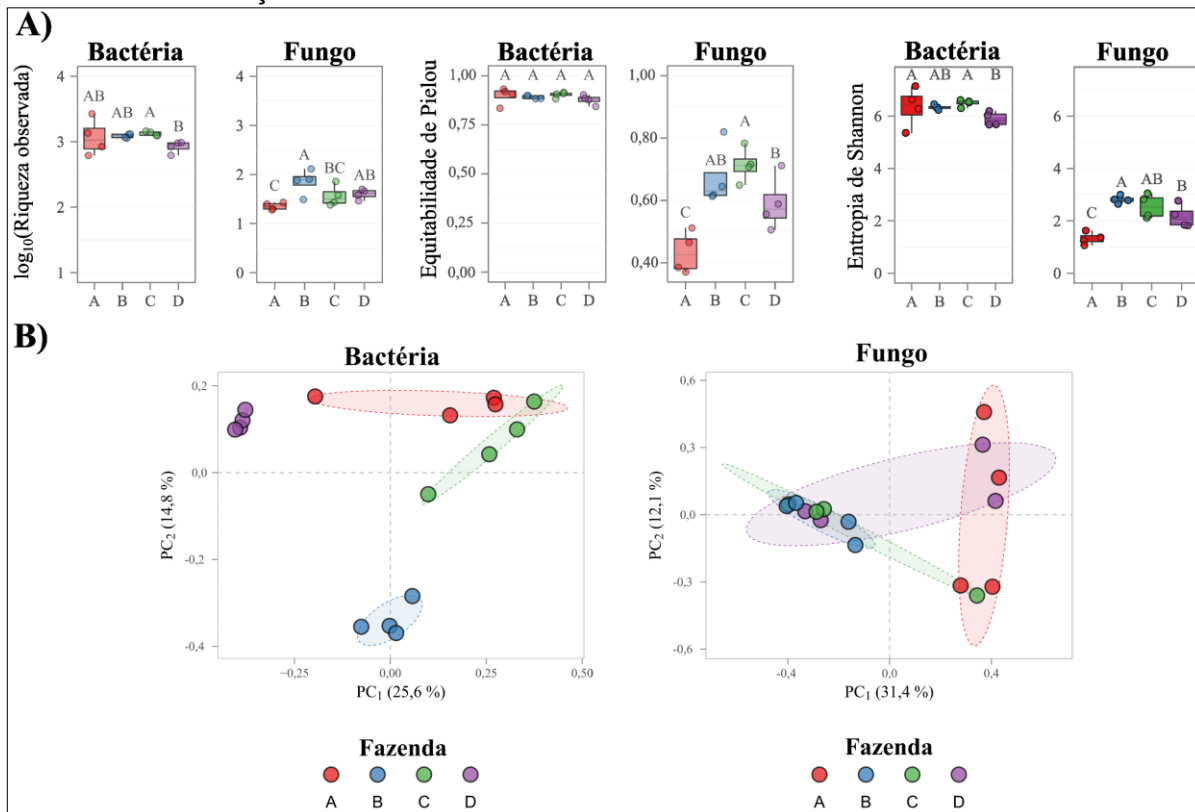
V23 – acidez ativa; V24 - fósforo; V25 - potássio; V26 - cálcio; V27 - magnésio; V28 - acidez trocável (Al3+); V29 - acidez potencial; V30 - somatório de bases permutáveis; V31 - capacidade efetiva de troca catiônica; V32 - capacidade de troca catiônica em pH 7; V33 - índice de saturação de base; V34 - índice de saturação de alumínio, e; V35 - fósforo restante.

Fonte: a autora.

3.3 Composição e diversidade da comunidade microbiana

A comunidade bacteriana apresentou maior número de espécies (riqueza observada), maior equitabilidade de Pielou e, conseqüentemente, maior entropia de Shannon do que a comunidade fúngica ao longo das fazendas analisadas (Figura 2.4A). Por outro lado, a composição da comunidade fúngica apresentou maior heterogeneidade do que a comunidade bacteriana ao longo das fazendas (Figura 2.4B).

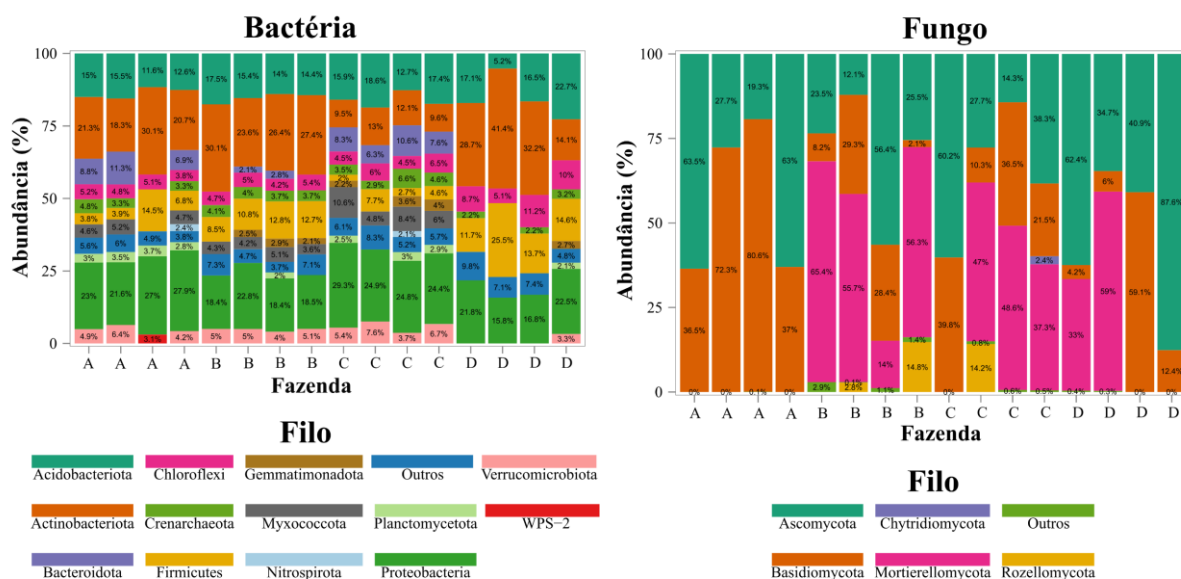
Figura 2.4. A) Métrica alfa de comunidades bacterianas e fúngicas. Boxplots seguidos das mesmas letras não apresentam diferenças pelo teste de Kruskal-Wallis a 0,05 de probabilidade e B) Diversidade beta - Análise de coordenadas principais (PCoA) de comunidades bacterianas e fúngicas em solo de cafeeiros de quatro fazendas do estado do Espírito Santo. A ordenação é baseada na distância Bray-Curtis. O número entre parênteses representa a variância explicada por cada eixo canônico e as reticências representam um intervalo de confiança de 99%.



Fonte: a autora.

No total, 10.625 ASVs bacterianos e 724 ASVs fúngicos foram detectados nos solos das quatro fazendas. Os ASVs bacterianos foram distribuídos em 41 filós, 116 classes, 290 ordens, 453 famílias e 846 gêneros. Os ASVs fúngicos, por outro lado, foram classificados em 8 filós, 16 classes, 63 ordens, 110 famílias e 170 gêneros. Quatro filós bacterianos: *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota*, *Proteobacteria* e *Firmicutes* foram responsáveis por 50% ou mais da abundância total de ASVs observados e três filós de fungos foram os mais abundantes: *Ascomycota*, *Basidiomycota* e *Mortierellomycota* (Figura 2.5).

Figura 2.5. Composição taxonômica da comunidade de bactérias e fungos em solo de quatro fazendas do estado do Espírito Santo. Cada cor representa um filo bacteriano ou fúngico. Apenas filoss com abundância superior a 2% são mostrados. Os filoss com menos de 2% estão agrupados na categoria “Outros”.



Fonte: a autora.

Ao correlacionar a diversidade alfa da comunidade bacteriana e fúngica com as variáveis topográfica (V1), ambientais (V2 e V3), bioclimáticas (V4 a V22) e químicas do solo (V23 a V35), nota-se maior correlação entre as variáveis bioclimáticas (V4 a V22) e a diversidade de bactérias do que a diversidade de fungos (Figura 2.6A).

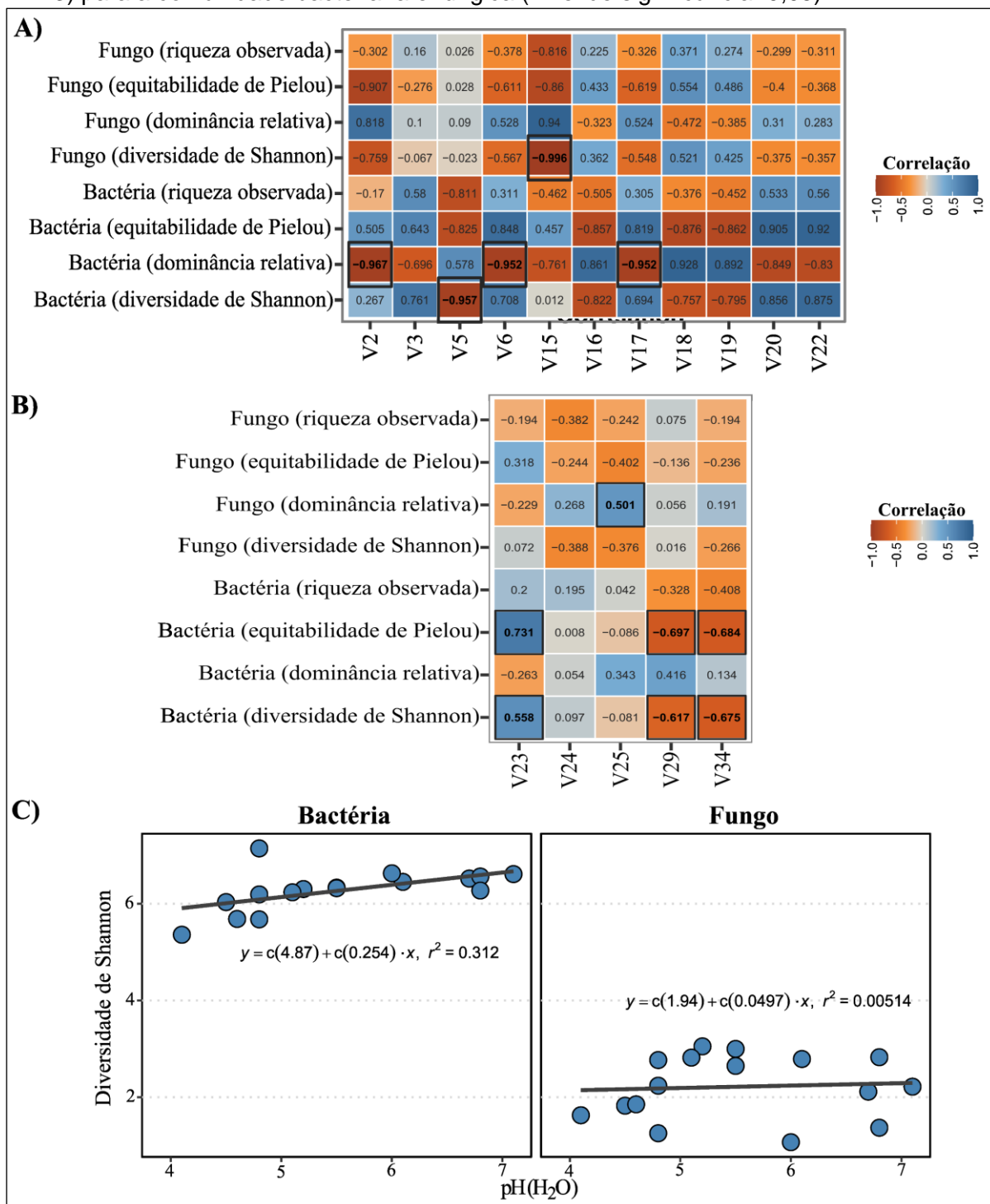
Entre as variáveis ambientais e bioclimáticas relacionadas aos índices de diversidade da comunidade fúngica, a distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2) e a precipitação anual (V15) apresentaram correlação negativa com a equitabilidade de Pielou e positiva com a dominância relativa; além disso, a precipitação anual (V15) apresentou uma correlação negativa com a riqueza observada e com a diversidade de Shannon (Figura 2.6A).

Em relação à correlação com os índices de diversidade da comunidade bacteriana (Figura 2.6A), a faixa média de temperatura diurna (V5), precipitação do mês mais úmido (V16), sazonalidade da precipitação (V18) e precipitação do trimestre mais úmido (V19) apresentaram correlação negativa com equitabilidade de Pielou e com a diversidade de Shannon. A equitabilidade de Pielou da comunidade bacteriana apresentou correlação positiva com isothermalidade (V6), precipitação do mês mais seco (V17), precipitação do trimestre mais seco (V20) e precipitação do trimestre mais frio (V22). A dominância relativa apresentou correlação positiva com precipitação do mês mais úmido (V16), sazonalidade da precipitação (V18), precipitação do trimestre mais úmido (V19), e negativa com distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2),

isotermalidade (V6), precipitação do período mais seco mês (V17), precipitação do trimestre mais seco (V20) e precipitação do trimestre mais frio (V22).

Em relação as propriedades químicas do solo (Figura 2.6B), a dominância relativa dos fungos e a quantidade de potássio (V25) presente nos solos se correlacionaram positivamente. Além disso, também foi encontrada uma correlação positiva entre a equitabilidade de Pielou e a diversidade de Shannon das bactérias com a acidez ativa (V23). Os resultados também demonstram uma correlação negativa entre a equitabilidade de Pielou da comunidade bacteriana, acidez potencial (V29) e índice de saturação de alumínio (V34) e entre a diversidade de Shannon relacionada à comunidade bacteriana, acidez potencial (V29) e índice de saturação de alumínio (V34). As análises de regressão mostraram que enquanto a diversidade bacteriana aumenta com o aumento do pH, a diversidade fúngica não muda (Figura 2.6C).

Figura 2.6. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis de diversidade microbiológica e: A) Ambiental e climática; B) variáveis químicas do solo selecionadas com base na técnica de “seleção direta”; C) Gráfico da relação entre diversidade de Shannon e acidez ativa (pH H₂O – V23) para a comunidade bacteriana e fúngica (nível de significância=0,05).

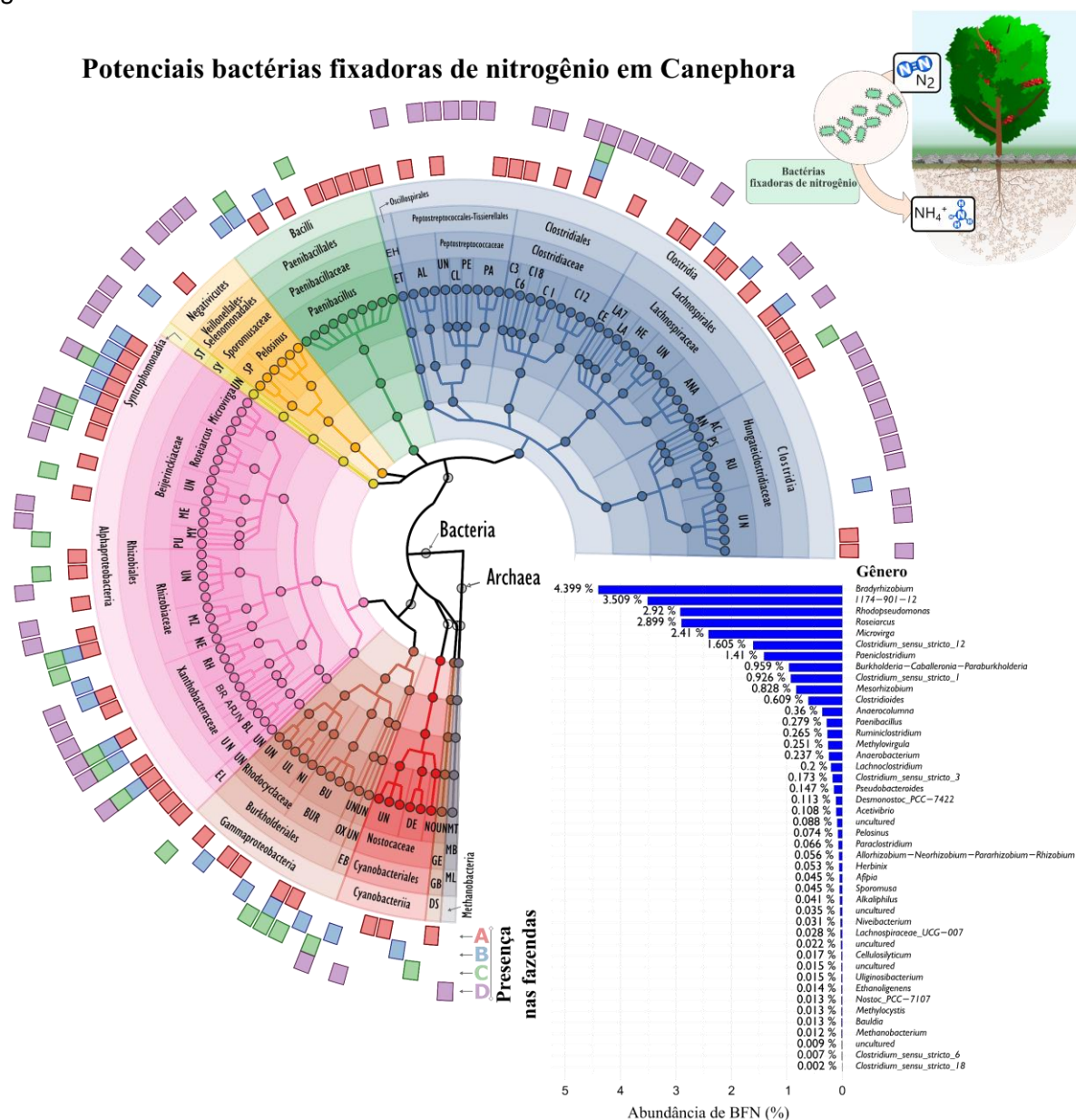


V2 - Distância euclidiana dos fragmentos florestais; V3 - índice de vegetação de diferença normalizada; V5 - amplitude térmica média diurna; V6 - isothermalidade; V15 - precipitação anual; V16 - precipitação do mês mais chuvoso; V17 - precipitação do mês mais seco; V18 - sazonalidade da precipitação; V19 - precipitação do trimestre mais chuvoso; V20 - precipitação do trimestre mais seco; V22 - precipitação do trimestre mais frio; V23 - Acidez ativa; V24 - Fósforo; V25 - Potássio; V29 - Acidez potencial; e, V34 - Índice de saturação de alumínio.

Fonte: a autora.

Com base no metagenoma executado no software *picrust2* (DOUGLAS et al., 2020) previmos o potencial de bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) presentes nos solos de *C. canephora*. Encontramos um total de 44 gêneros bacterianos potencialmente envolvidos na fixação de nitrogênio. A ordem Rhizobiales, conhecida por englobar bactérias fixadoras de nitrogênio, foi representada por onze gêneros: *Afipia*, *Allorhizobium*, *Neorhizobium*, *Pararhizobium*, *Rhizobium*, *Bauldia*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Methylocystis*, *Methylovirgula*, *Microvirga*, *Rhodopseudomonas*, *Roseiarcus* e 1174-901-12. Destes, o gênero *Rhizobiales* mais abundante foi *Bradyrhizobium*, com cerca de 4% de todas as sequências (Figura 2.7).

Figura 2.7. Cladograma com potenciais bactérias fixadoras de nitrogênio (NFB) no solo de *Coffea canephora*. A presença de quadrados coloridos nos anéis externos representa a presença do ASV na respectiva Fazenda (A, B, C ou D). Cada tip node representa um ASV previsto como potencial NFB pelo algoritmo *picrust2*. Para garantir a confiabilidade da previsão, apenas ASVs com Índice de Taxon de Sequência Mais Próxima abaixo de 0,15 foram considerados. No gráfico de barras, cada barra representa a abundância relativa de um gênero bacteriano.



Ruminiclostridium = RU; Pseudobacteroides = PS; Acetivibrio = AC; Anaerobacterium = AN; uncultured = UN; Cellulosilyticum = CE; Herbinix = HE; Lachnoclostridium = LA; Anaerocolumna = ANA; Lachnospiraceae_UCG-007 = LA7; Clostridium_sensu_stricto_1 = C1; Clostridium_sensu_stricto_3 = C3; Clostridium_sensu_stricto_6 = C6; Clostridium_sensu_stricto_12 = C12; Clostridium_sensu_stricto_18 = C18; Alkaliphilus = AL; Clostridioides = CL; Paraclostridium = PA; Paeniclostridium = PE; Sporomusa = SP; Syntrophomonadaceae = SY; Syntrophomonadales = ST; Methylovirgula = ME; Methylocystis = MY; 1174-901-12 = PU; Mesorhizobium = MZ; Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium = NE; Rhodospseudomonas = RH; Rhizobium = BR; Afipia = AP; Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia = BU; Niveibacterium = NI; Uliginosibacterium = UL; Desmonostoc_PCC-7422 = DE; Nostoc_PCC-7107 = NO; Methanobacterium = MT; Bauldia = BL; Ethanoligenens = ET; Ethanoligenenaceae = EH; Peptostreptococcales-Tissierellales = PT; Peptostreptococcales-Tissierellales = PT; Rhizobiales_Incertae_Sedis = UN; uncultured = UN; Oxalobacteraceae = OX; Burkholderiaceae = BUR; Enterobacterales = EB; Elsterales = EL; Geobacteraceae = GE; Methanobacteriaceae = MB; Desulfuromonadia = DS; Geobacterales = GB; Methanobacteriales = ML.

Fonte: a autora.

4 DISCUSSÃO

Nosso estudo fornece alguns insights sobre os padrões de diversidade de fungos e bactérias no solo, correlacionando com variáveis relacionadas à topografia, ambiente, clima e química do solo (Figura 2.6).

O trabalho realizado por Liu et al. (2020) na China conclui que há uma tendência em forma de curva entre a latitude e a diversidade bacteriana, enquanto a diversidade fúngica diminui com o aumento da latitude. O resultado mencionado está associado ao efeito da latitude sobre a temperatura (elemento climático). A altitude também influencia neste elemento, maiores altitudes possuem menor pressão atmosférica e menor temperatura (XIAO et al., 2015). Cada fazenda em estudo possui peculiaridades (Figura 2.2), como, por exemplo, diferentes altitudes e distâncias euclidianas em relação aos fragmentos florestais, refletindo em diferentes graus de preservação e diversidade de espécies nas áreas ao entorno dos cafezais. Ao analisar as variáveis climáticas (V4 a V22) nota-se que as fazendas B e C apresentam as maiores semelhanças quanto aos índices relacionados à temperatura e precipitação, a fazenda D possui os menores valores de temperatura devido à maior altitude, e a fazenda A possui o maior valor de precipitação média anual (Figura 2.2).

Em relação ao microbioma do solo, as métricas referentes à diversidade e riqueza alfa (Figura 2.4A) demonstram que a comunidade bacteriana possui uma riqueza de variantes de sequência amplicon cerca de uma ordem de grandeza maior do que a comunidade fúngica, resultado semelhante aos estudos realizados por Bach et al. (2018), Ko et al. (2017); Yang, Xuechen et al. (2021) em áreas de plantio direto com milho contínuo e gramíneas. Como esses estudos foram realizados em áreas agrícolas, com certo grau de antropização, espera-se que os fungos sejam mais abundantes nos ecossistemas florestais, onde os substratos recalcitrantes são mais abundantes e os fungos desempenham papéis importantes na decomposição da matéria, incluindo lignina e celulose (AISLABIE; DESLIPPE; DYMOND, 2013).

Especificamente, a fazenda A apresentou os menores níveis de riqueza, equitabilidade e entropia fúngica (Figura 2.4A) e a maior distância euclidiana dos fragmentos florestais e, portanto, o menor grau de preservação ao entorno. Por um lado, a magnitude do efeito da matriz agrícola e do efeito da preservação sobre o entorno, tanto no índice de entropia de Shannon quanto no perfil metabólico, é resultado de uma complexa cascata de relações causais envolvendo vegetação e constituintes químicos do solo, como Flores-Rentería et al. (2016) comentou. Por outro

lado, as fazendas B e C apresentaram os maiores valores de equitabilidade de Pielou e entropia de Shannon para a comunidade fúngica (Figura 2.4A), demonstrando que essas fazendas possuem maior uniformidade na divisão dos indivíduos entre os táxons presentes e maior diversidade. Ambas as fazendas tinham temperatura e precipitação semelhantes e estavam mais próximas geograficamente, reforçando o resultado encontrado por Liu et al., (2020) e Yang, Xuechen et al. (2021) que correlacionam a diversidade de microrganismos do solo com os índices de temperatura e precipitação, espera-se que fazendas com características semelhantes em relação à temperatura e precipitação tenham índices de diversidade fúngica semelhantes.

As métricas de diversidade beta mostraram que as comunidades bacterianas do solo são agrupadas por localização, sugerindo que as variações entre locais são maiores do que as variações intra-locais (Figura 2.4B). Além disso, há maior heterogeneidade na comunidade fúngica quando comparada à comunidade bacteriana por fazenda. Essa homogeneidade da comunidade bacteriana corrobora a hipótese, afirmando que fatores topográficos, diversidade da vegetação ao redor, fatores climáticos e condições químicas afetam a diversidade de espécies e a composição da comunidade (CURD et al., 2018).

Em estudos de superfície do solo, os locais que mais diferem em seus parâmetros ambientais também tendem a diferir mais na composição da comunidade bacteriana (GRIFFITHS et al., 2011; HORNER-DEVINE; CARNEY; BOHANNAN, 2004; RANJARD et al., 2013), sugerindo que os parâmetros do solo e o ambiente influenciam a diversidade da comunidade bacteriana. Dentro de um habitat, reduções na heterogeneidade ambiental e nas características do solo também reduzem a diversidade bacteriana (CURD et al., 2018; HOOPER et al., 2000; WARDLE et al., 2004). Na mesma linha, nosso estudo encontrou maior diversidade bacteriana entre as fazendas (Figura 2.4B), e maior similaridade da comunidade fúngica entre as fazendas B e C (Figura 2.4B), que possuem as maiores semelhanças climáticas e a maior proximidade geográfica.

Fatores topográficos, índices de vegetação, fatores climáticos e condições químicas foram correlacionados com a riqueza observada, uniformidade de Pielou, dominância relativa e diversidade de Shannon para fungos e bactérias (Figura 2.6). Existe correlação entre as variáveis climáticas (V4 a V22) e os índices referentes a equitabilidade de Pielou, dominância relativa e diversidade Shannon para a

comunidade bacteriana (Figura 2.6A), alguns estudos destacam a importância do clima como principal direcionador da diversidade bacteriana do solo.

De acordo com Wang, N. et al. (2014) temperatura e precipitação podem levar a mudanças na diversidade bacteriana. Como dois parâmetros climáticos principais, temperatura e precipitação estão fora de sincronia na variação de tendência. A temperatura e a precipitação apresentam diferentes padrões de distribuição ao longo do gradiente de altitude (Figura 2.2). Com diferentes condições de precipitação, a temperatura tem um efeito diferente nas estruturas da comunidade bacteriana e vice-versa. Os efeitos dos gradientes de temperatura e precipitação são fatores chave na regulação da biomassa microbiana do solo, em termos de efeito total, esses fatores climáticos têm um grande impacto na estrutura da comunidade bacteriana, mas uma parte considerável do impacto é exercida por efeitos indiretos (SUN et al., 2020). Nossos resultados mostraram que os fatores climáticos desempenham uma correlação significativa com a composição da comunidade bacteriana do solo; no entanto, vale ressaltar que o clima também é o principal direcionador da vegetação (MORENO et al., 2022), portanto, em ecossistemas naturais, as respostas da diversidade bacteriana às diversidades climáticas se devem ao efeito abrangente de vários fatores.

A equitabilidade de Pielou e a diversidade de Shannon da comunidade bacteriana também foram correlacionadas com variáveis químicas do solo, mas especificamente com acidez ativa (V23), acidez potencial (V29) e índice de saturação de alumínio (V34). A correlação foi positiva apenas para a acidez ativa (Figura 2.6B), o que significa que regiões com solos mais ácidos tendem a apresentar maiores valores de equitabilidade de Pielou e diversidade de Shannon. A diversidade bacteriana foi correlacionada com o pH do solo conforme visto na Figura 2.6C ($r^2 = 0,312$, $p < 0,05$). Embora, o padrão esperado seja, quanto maior o pH, maior a diversidade bacteriana (ROUSK et al., 2010; WANG et al., 2019), isso ainda não havia sido relatado em solos com produção de *Coffea canephora*. Além disso, mudanças em outros preditores, como precipitação e disponibilidade de substrato, covariam com o pH do solo e também são considerados preditores de diversidade bacteriana (LIU et al., 2020).

Uma hipótese para esta relação bactéria-pH é que as comunidades são diretamente influenciadas pelo pH do solo porque a maioria dos táxons bacterianos exibem tolerâncias de crescimento relativamente estreitas. O crescimento de espécies bacterianas individuais em cultura pura, geralmente varia entre 3-4 unidades de pH

entre o mínimo e o máximo, as áreas de nosso estudo possuem pH entre 4 e 6. Uma diminuição de crescimento de apenas 25% em comparação com o crescimento ideal levaria a uma população sendo rapidamente superada em número por outras bactérias que não forem impedidas (ROUSK et al., 2010).

Para a comunidade fúngica, a equitabilidade de Pielou e a diversidade de Shannon apresentaram correlação negativa com a distância euclidiana dos fragmentos florestais (V2) enquanto a dominância relativa apresentou correlação positiva (Figura 2.6A), ou seja, quanto menor a distância das plantações de *Coffea canephora* dos fragmentos florestais maior uniformidade e diversidade da comunidade fúngica e menor dominância relativa. Os fragmentos florestais podem controlar significativamente o sombreamento e interceptar a luz solar, reduzindo a luz que atinge o solo e, posteriormente, a temperatura da superfície, criando um microclima (TAJIK; AYOUBI; LORENZ, 2020). Além disso, em ecossistemas florestais, diferenças na qualidade da serapilheira de espécies arbóreas (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014) e exsudatos radiculares (EISENHAUER; REICH, 2012) podem levar à variabilidade dos organismos do solo. Índices de vegetação derivados de dados de sensoriamento remoto são indicadores úteis para discriminação de culturas, densidade de cobertura vegetal e cálculos que facilitam o planejamento e a otimização do uso. Tajik, Ayoubi e Lorenz (2020) relataram que os índices topográficos e de vegetação são fontes de informação úteis para prever as propriedades do solo. Portanto, as fortes relações entre microrganismos do solo e vegetação podem ser explicadas pela forte influência da cobertura vegetal nas propriedades do solo e, posteriormente, nas comunidades de microrganismos, que podem ser considerados parâmetros úteis na previsão de comunidades microbianas, especialmente para a comunidade fúngica.

Em relação à precipitação anual (V15) a riqueza observada, a equitabilidade de Pielou e a diversidade de Shannon dos fungos apresentaram correlação negativa. Enquanto a dominância relativa apresentou correlação positiva (Figura 2.6A). O aumento da precipitação pode reduzir os níveis de oxigênio (O₂) na fase gasosa do solo, afetando a produção de exsudato radicular, coexistência, diversidade e estrutura populacional e comunidades fúngicas (DESCAMPS-JULIEN; GONZALEZ, 2005; YANG et al., 2021a). Apesar desses resultados, a comunidade fúngica apresentou menor correlação com as demais variáveis relacionadas à precipitação analisadas no estudo. Existe então uma complexidade na relação entre fatores e elementos

climáticos, vegetação e diversidade na comunidade fúngica e bacteriana (NAYLOR et al., 2020).

Dentre as variáveis químicas analisadas, o potássio (V25) apresentou a maior correlação com a comunidade fúngica, tendo correlação positiva com a dominância relativa e negativa com os demais índices (Figura 2.6B). O potássio é um dos três principais elementos requeridos pelas plantas junto com o nitrogênio e o fósforo (HARO; BENITO, 2019) e é adicionado aos cafezais por meio da adubação de cobertura. Embora seja difícil mostrar uma relação causal entre a quantidade de potássio presente no solo e a diversidade de fungos, Zhang et al. (2019) constataram que o potássio tem um efeito positivo na diversidade fúngica presente na rizosfera de uma planta medicinal. Essa observação no café *canephora* abre oportunidades para investigar possíveis relações de causa e efeito entre esses dois componentes do solo.

Além disso, o pH é um fator ambiental que influencia a carga líquida de proteínas de membrana e afeta diretamente a absorção de nutrientes específicos. No entanto, solos com baixo pH (em nosso estudo a variação foi de 4,68 a 6,45) podem conter níveis tóxicos de oligoelementos como alumínio, manganês, cobre e molibdênio, impedindo o crescimento de espécies mais sensíveis, atuando como um filtro ambiental (QUEIROZ et al., 2021). Em nosso estudo não notamos uma alta correlação entre o pH e a diversidade de Shannon da comunidade fúngica, o que pode ser atribuído à faixa relativamente pequena de valores de pH das fazendas em estudo (Figura 2.6C).

Vale ressaltar também que a alta diversidade taxonômica observada para bactérias potencialmente fixadoras de nitrogênio em cafezais (Figura 2.7) indica que a nutrição mineral do cafeeiro pode estar sendo parcialmente suprida por essas bactérias, mesmo no caso de um sistema convencional onde a adubação ocorre em cobertura nitrogenada (DIN et al., 2021; OSPINA-BETANCOURTH et al., 2021). Dentre as fazendas analisadas, as que apresentaram maior diversidade de ASV's foram as fazendas A e D, respectivamente, e as de menor diversidade foram as fazendas B e C. O gênero *Bradyrhizobium* foi detectado em todas as amostras de solo, revelando-se um gênero que participa do núcleo da microbiota do solo da cultura do café. Este gênero também foi considerado o microrganismo central entre os diazotróficos de diferentes solos chineses e responsável pela interação com outros diazotróficos (HAN et al., 2019). *Bradyrhizobium* tem sido utilizado como inoculante em leguminosas (ULZEN et al., 2016), como a soja onde nos nódulos é capaz de fixar grande parte do N utilizado pela planta (ARAUJO et al., 2019). O gênero

Bradyrhizobium pode ser considerado um importante componente da microbiota nuclear do solo da cultura do café (SILVA et al., 2020).

5 CONCLUSÕES

A composição microbiana do solo das plantações de café *canephora* varia de acordo com os fatores de cada habitat. No geral, há uma correlação maior entre as variáveis bioclimáticas e a diversidade bacteriana do que a fúngica. No entanto, a diversidade fúngica está mais correlacionada com a distância euclidiana dos fragmentos florestais, precipitação anual e disponibilidade de potássio em áreas produtoras de *Coffea canephora*. Por outro lado, a diversidade bacteriana está mais correlacionada com índice de precipitação, acidez ativa, acidez potencial e índice de saturação de alumínio.

Este estudo fornece uma referência para a compreensão da comunidade de fungos e bactérias dos solos de áreas produtoras de café *canephora* e demonstra a necessidade de mais pesquisas voltadas para a correlação desses microrganismos com variáveis locais, ambientais, climáticas e topográficas, buscando entender os diversos fatores que atuam no ciclo de produção do café.

6 REFERÊNCIAS

- AISSLABIE, J.; DESLIPPE, J. R.; DYMOND, J. Soil microbes and their contribution to soil services. **Ecosystem services in New Zealand--conditions and trends**. **Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand**, v. 1, n. 12, p. 143–161, 2013.
- ARAUJO, K. E. C. et al. Natural abundance of ^{15}N of N derived from the atmosphere by different strains of Bradyrhizobium in symbiosis with soybean plants. **Ciência Rural**, v. 49, n. 12, 2019.
- BACH, E. M. et al. Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 118, p. 217–226, 1 mar. 2018.
- BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505–511, 26 nov. 2014.
- BENGTSSON-PALME, J. et al. Improved software detection and extraction of ITS1 and ITS2 from ribosomal ITS sequences of fungi and other eukaryotes for analysis of environmental sequencing data. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, p. 914 – 919, jul. 2013.
- BERNIER, N.; GILLET, F. Structural relationships among vegetation, soil fauna and humus form in a subalpine forest ecosystem: a Hierarchical Multiple Factor Analysis (HMFA). **Pedobiologia**, v. 55, n. 6, p. 321–334, nov. 2012.
- BOLYEN, E. et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. **Nature Biotechnology**, v. 37, n. 8, p. 852–857, 24 ago. 2019.
- BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecology with R**. New York, NY: Springer New York, 2011.
- BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecology with R**. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- ÇAKMAKÇI, R. et al. Growth promotion of plants by plant growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 6, p. 1482–1487, 1 jun. 2006.
- CAVARD, X. et al. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: Evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 142–161, dez. 2011.
- CHAPARRO, J. M. et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. **Biology and Fertility of Soils** **2012 48:5**, v. 48, n. 5, p. 489–499, 13 maio 2012.
- COSTA, O. Y. A.; RAAIJMAKERS, J. M.; KURAMAE, E. E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. JUL, p. 1636, 23 jul. 2018.
- CURD, E. E. et al. Bacterial diversity is positively correlated with soil heterogeneity. **Ecosphere**, v. 9, n. 1, p. e02079, 1 jan. 2018.

- DANKOWSKA, A.; DOMAGAŁA, A.; KOWALEWSKI, W. Quantification of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* var. *robusta* concentration in blends by means of synchronous fluorescence and UV-Vis spectroscopies. **Talanta**, v. 172, p. 215–220, 1 set. 2017.
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, MG (Brazil), 1981.
- DESCAMPS-JULIEN, B.; GONZALEZ, A. Stable coexistence in a fluctuating environment: an experimental demonstration. **Ecology**, v. 86, n. 10, p. 2815–2824, 2005.
- DIN, I. et al. Inoculation of nitrogen fixing bacteria in conjugation with integrated nitrogen sources induced changes in phenology, growth, nitrogen assimilation and productivity of wheat crop. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 20, n. 7, p. 459–466, out. 2021.
- DOUGLAS, G. M. et al. PICRUSt2 for prediction of metagenome functions. **Nature Biotechnology**, v. 38, n. 6, p. 685–688, 1 jun. 2020.
- EISENHAUER, N.; REICH, P. B. Above- and below-ground plant inputs both fuel soil food webs. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 45, p. 156–160, fev. 2012.
- FALKOWSKI, P. G.; FENCHEL, T.; DELONG, E. F. **The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles**. Science American Association for the Advancement of Science, , 23 maio 2008. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1153213>>
- FARR, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 2004, 1 jun. 2007.
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 1 out. 2017.
- FLORES-RENTERÍA, D. et al. Agricultural matrix affects differently the alpha and beta structural and functional diversity of soil microbial communities in a fragmented Mediterranean holm oak forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 92, p. 79–90, 1 jan. 2016.
- FUHRMAN, J. A. Microbial community structure and its functional implications. **Nature** 2009 459:7244, v. 459, n. 7244, p. 193–199, 13 maio 2009.
- GALAZKA, A. et al. Genetic and functional diversity of bacterial microbiome in soils with long term impacts of petroleum hydrocarbons. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. AUG, p. 1923, 22 ago. 2018.
- GRIFFITHS, R. I. et al. The bacterial biogeography of British soils. **Environmental Microbiology**, v. 13, n. 6, p. 1642–1654, 1 jun. 2011.
- GUNNING, Y. et al. 16-O-methylcafestol is present in ground roast Arabica coffees: Implications for authenticity testing. **Food Chemistry**, v. 248, p. 52–60, 15 maio 2018.

HAN, L. L. et al. Multiple factors drive the abundance and diversity of the diazotrophic community in typical farmland soils of China. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 95, n. 8, 1 ago. 2019.

HARO, R.; BENITO, B. The Role of Soil Fungi in K⁺ Plant Nutrition. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 13, p. 3169, 28 jun. 2019.

HELLEQUIN, E. et al. Shaping of soil microbial communities by plants does not translate into specific legacy effects on organic carbon mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 163, p. 108449, 1 dez. 2021.

HOOPER, D. U. et al. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks: We assess the evidence for correlation between aboveground and belowground diversity and conclude that a variety of mechanisms co. **BioScience**, v. 50, n. 12, p. 1049–1061, 2000.

HORNER-DEVINE, M. C.; CARNEY, K. M.; BOHANNAN, B. J. M. An ecological perspective on bacterial biodiversity. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 271, n. 1535, p. 113–122, 22 jan. 2004.

ICO. **Trade Statistics Tables**. Disponível em:
<http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics>.2019.

IEMA, Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Levantamento Aerofotogramétrico - Ortofotomosaico 2012/2015**. 2015. Disponível em:
<<https://geobases.es.gov.br/links-para-mapas1215>>.

INCAPER. **Cafeicultura - Café Conilon**. Disponível em:
<<https://incaper.es.gov.br/cafeicultura-conilon>>. Acesso em: 13 maio. 2021.

JACOBY, R. et al. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1617, 19 set. 2017.

JOST, L. The Relation between Evenness and Diversity. **Diversity**, v. 2, n. 2, p. 207–232, 11 fev. 2010.

KO, D. et al. Bacterial and fungal community composition across the soil depth profiles in a fallow field. **Journal of Ecology and Environment**, v. 41, n. 1, p. 1–10, 19 set. 2017.

LIU, S. et al. Decoupled diversity patterns in bacteria and fungi across continental forest ecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 144, p. 107763, maio 2020.

MCMURDIE, P. J.; HOLMES, S. phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. **PLoS ONE**, v. 8, n. 4, p. e61217, 22 abr. 2013.

MONAKHOVA, Y. B. et al. Rapid approach to identify the presence of Arabica and Robusta species in coffee using 1H NMR spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 182, p. 178–184, 1 set. 2015.

MORENO, J. L. et al. Response of soil chemical properties, enzyme activities and microbial communities to biochar application and climate change in a Mediterranean agroecosystem. **Geoderma**, v. 407, p. 115536, fev. 2022.

NAYLOR, D. et al. Soil Microbiomes Under Climate Change and Implications for Carbon Cycling. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, n. 1, p. 29–59, 17 out. 2020.

OKSANEN, J. et al. **Community Ecology Package**. , 2020.

OSPINA-BETANCOURTH, C. et al. Low inhibitory effect of ammonia on the nitrogen-fixing activity of a sludge enriched with nitrogen-fixing bacteria. **Bioresource Technology Reports**, v. 14, p. 100655, jun. 2021.

PUTTEN, W. H. et al. Where, when and how plant–soil feedback matters in a changing world. **Functional Ecology**, v. 30, n. 7, p. 1109–1121, 27 jul. 2016.

QUAST, C. et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. D1, p. D590–D596, 27 nov. 2012.

QUEIROZ, M. E. F. DE et al. Litter thickness and soil pH influence the diversity of saprotrophic fungi in primary forest fragments in the Amazon. **Pedobiologia**, v. 89, p. 150771, 1 nov. 2021.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. , 2020.

RANJARD, L. et al. Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. **Nature Communications 2013 4:1**, v. 4, n. 1, p. 1–10, 5 fev. 2013.

ROUSK, J. et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. **The ISME Journal**, v. 4, n. 10, p. 1340–1351, 6 out. 2010.

SCHLATTER, D. et al. Disease suppressive soils: New insights from the soil microbiome. **Phytopathology**, v. 107, n. 11, p. 1284–1297, 1 nov. 2017.

SCHLATTER, D. C. et al. Are microbial communities indicators of soil health in a dryland wheat cropping system? **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104302, 1 fev. 2022.

SIGNORINI, M. et al. Soil heterogeneity within a vineyard impacts the beta but not the alpha microbial agro-diversity. **Applied Soil Ecology**, v. 166, p. 104088, 1 out. 2021.

SILVA, M. DE C. S. et al. DIVERSITY OF NITROGEN-FIXING BACTERIA IN COFFEE CROPS (*Coffea arabica* L.). **Revista Ifes Ciência**, v. 6, n. 3, p. 12–21, 23 dez. 2020.

SUN, H. et al. Climate influences the alpine soil bacterial communities by regulating the vegetation and the soil properties along an altitudinal gradient in SW China. **CATENA**, v. 195, p. 104727, dez. 2020.

SUN, Z. et al. The use of manure shifts the response of α -diversity and network while not β -diversity of soil microbes to altered irrigation regimes. **Applied Soil Ecology**, v. 174, p. 104423, 1 jun. 2022.

TAJIK, S.; AYOUBI, S.; LORENZ, N. Soil microbial communities affected by vegetation, topography and soil properties in a forest ecosystem. **Applied Soil Ecology**, v. 149, p. 103514, maio 2020.

TOJU, H. et al. Core microbiomes for sustainable agroecosystems. **Nature Plants** 2018 4:5, v. 4, n. 5, p. 247–257, 30 abr. 2018.

ULZEN, J. et al. Bradyrhizobium inoculants enhance grain yields of soybean and cowpea in Northern Ghana. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. NOVEMBER2016, p. 1770, 29 nov. 2016.

VELOSO, T. G. R. et al. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 14692, 7 dez. 2020.

WANG, C. et al. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. **Annals of Microbiology**, v. 69, n. 13, p. 1461–1473, 19 dez. 2019.

WANG, N. et al. Effects of variation in precipitation on the distribution of soil bacterial diversity in the primitive Korean pine and broadleaved forests. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 11, p. 2975–2984, 29 nov. 2014.

WANG, Y.; SHAO, M.; SHAO, H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 381, n. 1–2, p. 9–17, fev. 2010.

WARDLE, D. A. et al. Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1629–1633, 11 jun. 2004.

WICKHAM, H. **ggplot2**. New York, NY: Springer New York, 2009.

XIAO, J. et al. How much does latitude modify temperature–mortality relationship in 13 eastern US cities? **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 3, p. 365–372, 1 mar. 2015.

XUE, P.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Land-use affects soil microbial co-occurrence networks and their putative functions. **Applied Soil Ecology**, v. 169, p. 104184, 1 jan. 2022.

YANG, X. et al. Differential responses of soil bacteria and fungi to altered precipitation in a meadow steppe. **Geoderma**, v. 384, p. 114812, 15 fev. 2021a.

YANG, X. et al. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau. **Ecological Indicators**, v. 122, p. 107236, mar. 2021b.

YIN, X. et al. A review on the eco-geography of soil fauna in China. **Journal of Geographical Sciences**, v. 20, n. 3, p. 333–346, 27 jun. 2010.

ZAK, D. R. et al. PLANT DIVERSITY, SOIL MICROBIAL COMMUNITIES, AND ECOSYSTEM FUNCTION: ARE THERE ANY LINKS? **Ecology**, v. 84, n. 8, p. 2042–2050, 1 ago. 2003.

ZHAN, L. et al. Soil fauna community in the black soil of Northeast China under different tillage systems. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 64, n. 5, p. 462–469, 4 jul. 2014.

ZHANG, T. et al. High-throughput sequencing reveals the diversity and community structure of rhizosphere fungi of *Ferula Sinkiangensis* at different soil depths. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 6558, 25 dez. 2019.

Apêndice

Apêndice 2.1. Descrição das biovariáveis.

Código da variável	Descrição
V4	Temperatura média anual
V5	Faixa de temperatura média diurna (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))
V6	Isotérmica (V5/V10) (x100)
V7	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão x 100)
V8	Temperatura máxima do mês mais quente
V9	Temperatura mínima do mês mais frio
V10	Faixa Anual de Temperatura (V8-V9)
V11	Temperatura média do trimestre mais úmido
V12	Temperatura média do trimestre mais seco
V13	Temperatura média do trimestre mais quente
V14	Temperatura média do trimestre mais frio
V15	Precipitação anual
V16	Precipitação do mês mais chuvoso
V17	Precipitação do mês mais seco
V18	Sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação)
V19	Precipitação do trimestre mais úmido
V20	Precipitação do trimestre mais seco
V21	Precipitação do trimestre mais quente
V22	Precipitação do trimestre mais frio

Apêndice 2.2. Descrição das variáveis químicas do solo.

Código da variável	Descrição
V23	Acidez ativa (pH H ₂ O)
V24	Fósforo (P)
V25	Potássio (K)
V26	Cálcio (Ca)
V27	Magnésio (Mg)
V28	Acidez trocável (Al ³⁺)
V29	Acidez potencial (H+Al)
V30	Soma de bases trocáveis (SB)
V31	Capacidade efetiva de troca catiônica (t)
V32	Capacidade de troca catiônica em pH 7 (T)
V33	Índice de saturação de base (V)
V34	Índice de saturação de alumínio (m)
V35	Fósforo restante

CAPÍTULO III

3. Favorabilidade climática à ocorrência da *Hemileia vastatrix* em áreas aptas ao cultivo de *Coffea arabica* L. no Brasil

RESUMO

No Brasil, a ferrugem do cafeeiro, doença fúngica causada por *Hemileia vastatrix*, foi detectado pela primeira vez em *Coffea arabica* em janeiro de 1970, na região sul da Bahia. Atualmente, a doença está presente em praticamente todas as áreas de cultivo do Brasil, e continua ameaçando a produção de café com perdas que variam de 30 a 50%. A doença no café arábica acarreta uma redução da produção no ano seguinte à epidemia, devido à desfolha precoce e à secagem dos ramos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi identificar e quantificar as diferentes classes de ocorrência à ferrugem em áreas aptas e restritas ao cultivo de café arábica no Brasil para uma decisão mais embasada a respeito da cultivar a ser implantado. Como metodologia, foram definidas as áreas de aptidão climática para o café arábica e, em seguida, avaliou-se a favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem nessas áreas com base em dados climáticos do *TerraClimate* de 1992 a 2021. As áreas aptas, aptas com algum tipo de restrição, restritas e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica somam 16,34% do território brasileiro. Dentro desses 16,34% da área do território brasileiro, a classe de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem com maior representatividade é a favorável. Atualmente, a doença é controlada com o uso de fungicidas protetores e sistêmicos, incluindo cobre, triazóis e estrobilurinas, que devem ser aplicados seguindo regras de decisão que variam de acordo com o cenário de risco, e através da utilização de cultivares resistentes. Este estudo fornece uma base para a escolha das cultivares mais adequadas para cada região com base no grau de resistência à ferrugem.

Palavras-chave: arábica; ferrugem; cultivares resistentes.

Climatic favorability to the occurrence of *Hemileia vastatrix* in apt areas for the cultivation of *Coffea arabica* L. in Brazil

ABSTRACT

In Brazil, coffee rust, a fungal disease caused by *Hemileia vastatrix* Berk. et Br., was detected for the first time in *Coffea arabica* in January 1970, in the southern region of Bahia. Currently, the disease is present in virtually all areas of cultivation in Brazil and continues to threaten coffee production with losses ranging from 30 to 50%. The disease in arabica coffee causes a reduction in production in the following year of the epidemic due to early defoliation and drying of branches. In this context, the objective of this study was to identify and quantify the different classes of occurrence of rust in areas suitable and restricted to the cultivation of Arabica coffee in Brazil for a more informed decision regarding the cultivar to be implanted. As a methodology, the areas of climatic suitability for arabica coffee were defined and, then, the climatic favorability for the occurrence of rust in these areas was evaluated based on climatic data from TerraClimate from 1992 to 2021. The apt areas, apt with some type of irrigation, restricted and with some type of restriction for the cultivation of arabica coffee add up to 16.34% of the Brazilian territory. Within these 16.34% of the area of the Brazilian territory, the class of climatic favorability for the occurrence of rust with greater representation is the favorable one. Currently, the disease is controlled with the use of protective and systemic fungicides, including copper, triazoles and strobilurins, which must be applied following decision rules that vary according to the risk scenario, and according to the use of resistant cultivars. This study provides a basis for choosing the most suitable cultivars for each region based on the degree of rust resistance.

Keywords: arabica; rust; resistant cultivars.

1 INTRODUÇÃO

Dada a riqueza sensorial, o café (*Coffea* L.) é uma das principais bebidas do mundo e a segunda *commodity* mais comercializada, perdendo apenas para o petróleo (DAVIS et al., 2012). O cultivo deste grão se estende por 52 países, sendo o Brasil o principal produtor e exportador de café do mundo, e o responsável por um terço da produção mundial de café (BOTE et al., 2018; SILVA ARAGÃO et al., 2020). Duas espécies são responsáveis pela maior parte da produção mundial: *Coffea arabica* (também conhecido como arábica) e *Coffea canephora* (também conhecido como conilon). O *Coffea arabica* é preferida por seu sabor mais doce, enquanto *Coffea canephora* é caracterizada por seu alto teor de cafeína (PATAY; BENCSIK; PAPP, 2016).

Como o *Coffea arabica* requer um clima específico para desenvolvimento e produção, dentro de limites relativamente estreitos, as lavouras terão rendimento e qualidade abaixo do viável à medida que as condições climáticas não forem as ideais (BENTI et al., 2022; BUNN et al., 2015). O zoneamento climático do cafeeiro é de extrema importância, tanto na implantação quanto no planejamento de atividades agrícolas, porque a delimitação das regiões, climaticamente, significa, não só estabelecer os indicadores do potencial do meio físico e biológico de produção, mas também para o planejamento de áreas adequadas a produção e que respeitem os recursos naturais pré-existentes (MARQUES et al., 2022; SEDIYAMA et al., 2001).

A doença mais devastadora que ataca os plantios de café é a ferrugem, causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* (MCTAGGART et al., 2016). No Brasil, a ferrugem do café foi encontrada pela primeira vez no *Coffea arabica* em janeiro de 1970, no sul da Bahia, e quatro meses depois a doença foi encontrada em quase todos os cafezais do país (CHAVES et al., 1970). Atualmente, a doença pode ser encontrada em praticamente todas as regiões onde são cultivados os cafés arábica (*Coffea arabica*) e conilon (*Coffea canephora*).

Desde 2012, houve um surto de epidemias de ferrugem do café na América Central e do Sul, particularmente na Nicarágua, Equador, El Salvador, Panamá e Honduras, onde as perdas nas lavouras foram estimadas na faixa de 30 a 90% (AVELINO et al., 2015).

Em regiões produtoras de café do Brasil a ferrugem pode reduzir a produtividade em 30 a 50%, dependendo do nível de resistência do genótipo (ZAMBOLIM, 2016). Os principais meios de controle são a aplicação de fungicidas à

base de cobre, uso de cultivares resistentes e métodos culturais (JACKSON; SKILLMAN; VANDERMEER, 2012). No entanto, existem desvantagens na aplicação de fungicidas de cobre por aumentarem a abundância de insetos minadores e ácaros do café (ESKES; MENDES; ROBBS, 1991), e há preocupações de seus efeitos na saúde humana (JACKSON; SKILLMAN; VANDERMEER, 2012). O desenvolvimento de variedades com resistência genética durável diante da variabilidade na patogenicidade de *H. vastatrix* (ferrugem) ganha destaque para o controle da doença (SALCEDO-SARMIENTO et al., 2021).

Com o propósito de fornecer suporte de decisão para o diagnóstico, planejamento e gerenciamento, estudos de áreas favoráveis à ocorrência da ferrugem, correlacionadas a classes de aptidão ao cultivo tornam-se essenciais e justificáveis para o estabelecimento estratégico de mitigação e manejo da doença.

Diante do exposto, este trabalho, tem como hipótese verificar que, nas áreas aptas para o desenvolvimento da cultura do café, no Brasil, há diferentes classes de favorabilidade à ocorrência da ferrugem e por meio da identificação das classes, fornecer embasamento para escolha das melhores cultivares a serem implementados em cada região, visando mitigar possíveis perdas produtivas e econômicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

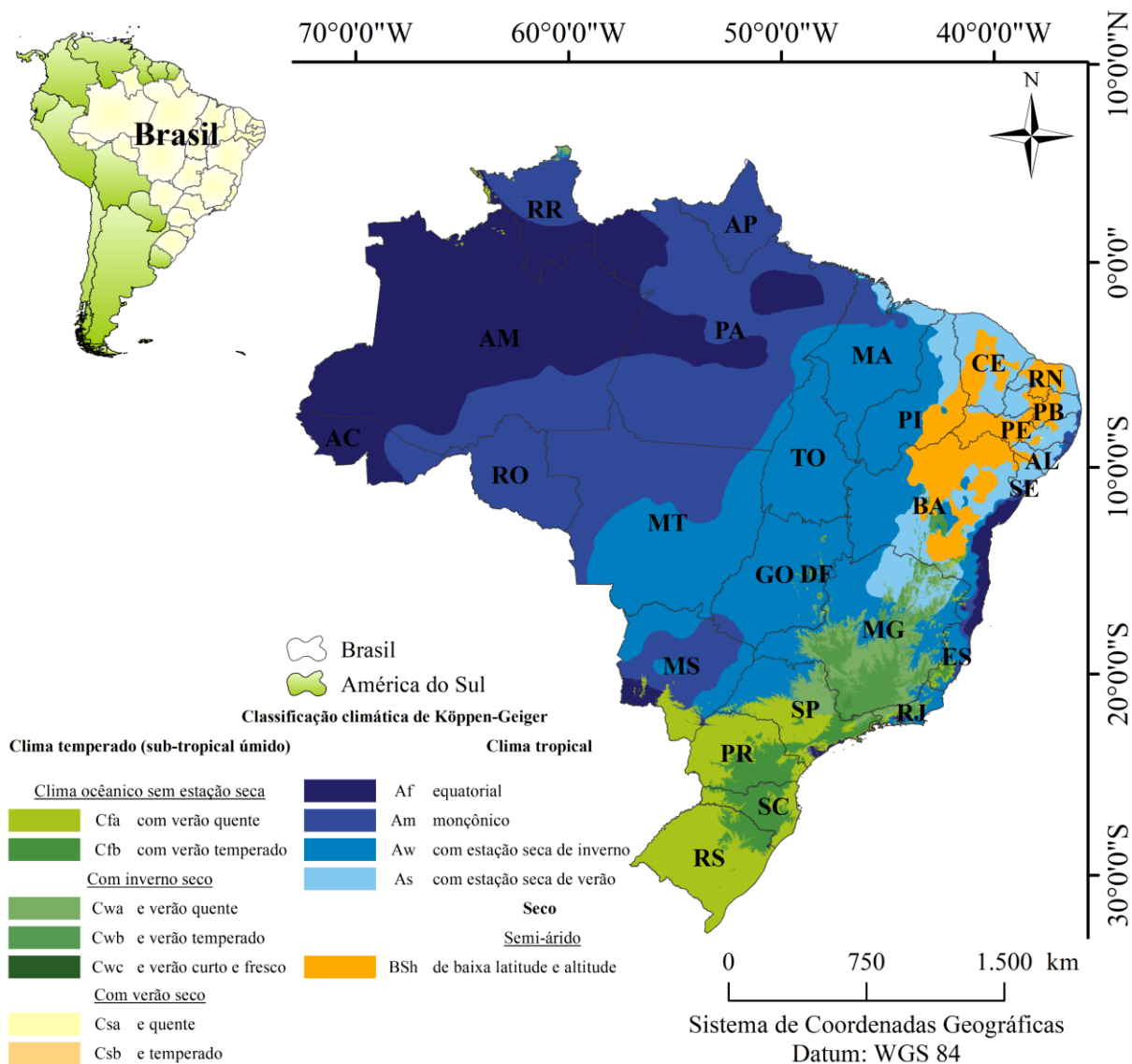
Este estudo foi desenvolvido no Brasil (Figura 3.1), que abrange uma área de aproximadamente 8.510.295 km² com uma população estimada de 215 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Além de ser um País com características físicas e recursos naturais importantes, o Brasil também é um dos maiores exportadores mundiais de produtos agropecuários, atividade econômica fortemente influenciada pelo clima e por extremos climáticos.

Devido à vasta extensão territorial, o regime de precipitação no Brasil é modulado por diversos sistemas atmosféricos (LUIZ-SILVA et al., 2021). Logo os climas do Brasil possuem diferenciações de acordo com sua localização, e grande parte do país pertence a Zona Climática Intertropical, área compreendida entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio.

O extremo Sul do Brasil, integra a Zona Climática Temperada do Sul, entre o Trópico de Capricórnio e o Círculo Polar Antártico (DE MEDEIROS et al., 2020; PEZZI

et al., 2022). Os climas do Brasil são classificados em: equatorial, tropical, tropical de altitude, semiárido, subtropical e tropical atlântico (ALVARES et al., 2013; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 3.1. Área de estudo.

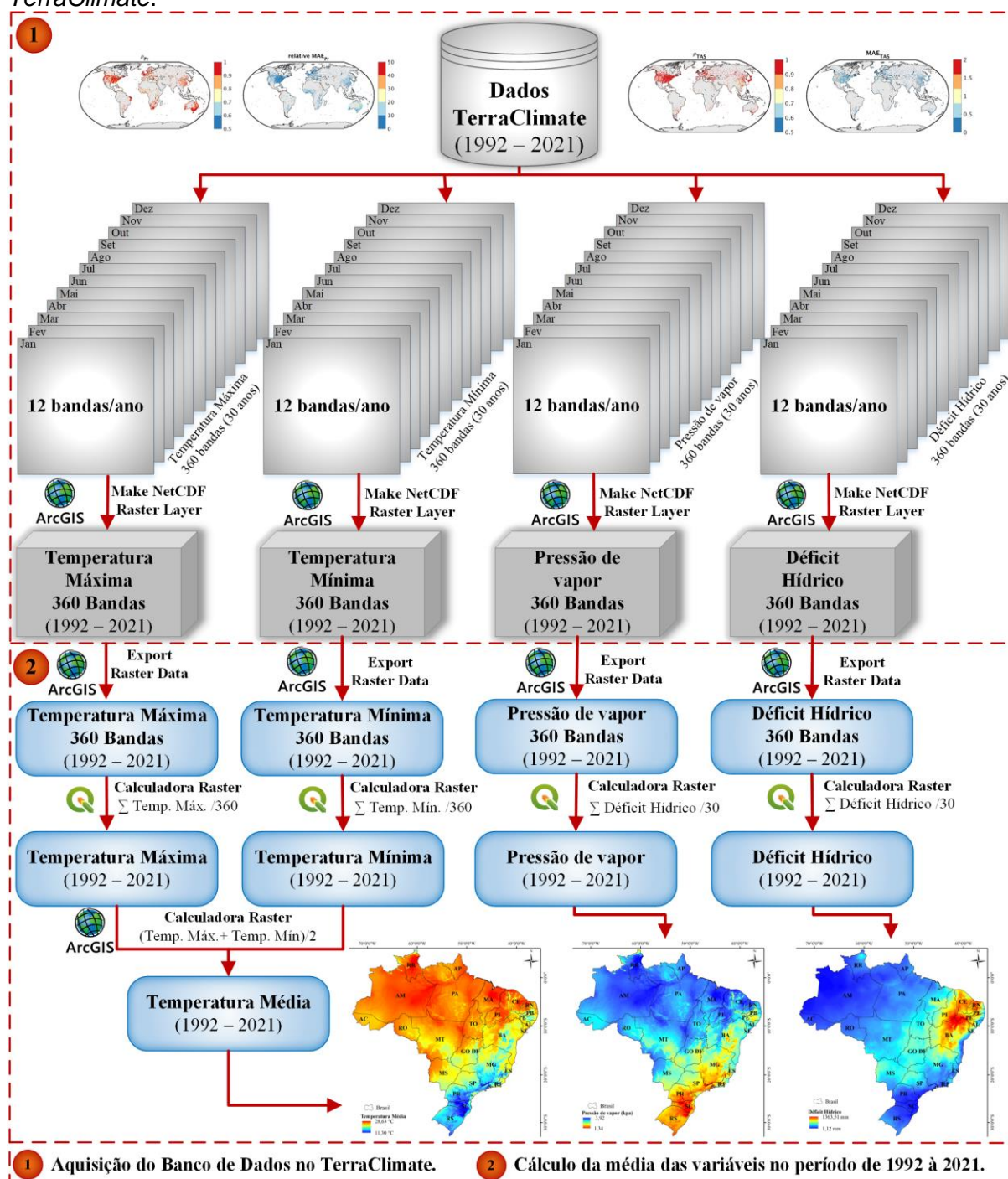


Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013).

2.2 Obtenção do banco de Dados

O fluxograma metodológico contendo as etapas necessárias para aquisição do banco de dados, descritas neste subtópico, é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2. Etapas metodológicas para a obtenção dos dados meteorológicos do TerraClimate.



Fonte: a autora.

Etapa 1: Aquisição do banco de Dados no TerraClimate

Os dados meteorológicos necessários para elaboração do zoneamento climático do café arábica e para a favorabilidade climática à ocorrência de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) foram adquiridos do laboratório de climatologia, TerraClimate.

O *TerraClimate* é constituído pelos dados de clima mensal e o balanço hídrico climático para superfície terrestre global. Esses dados fornecem insumos importantes para estudos ecológicos e hidrológicos em escala global que requerem alta resolução espacial e dados variáveis no tempo. Todos os dados têm resolução temporal mensal e resolução espacial de aproximadamente 4 km² (ABATZOGLOU et al., 2018).

O *TerraClimate* usa interpolação auxiliada pelo clima, combinando normais climatológicas de alta resolução espacial do conjunto de dados do *WorldClim* com resolução espacial mais grosseira, criando um conjunto de dados de alta resolução espacial que cobre um amplo registro temporal.

Para realização deste trabalho foram adquiridas as variáveis de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), pressão de vapor (kPa) e déficit hídrico (mm) de uma série de 30 anos (1992 a 2021). Os dados estão disponíveis em formato NetCDF compactado, com valores mensais, ao se realizar o download e inserção destes dados em ambiente SIG as bandas são referentes aos meses. Neste estudo, trabalhamos com 30 anos (12 meses X 30 anos), desta forma, temos 360 bandas para cada variável.

Após download dos dados de cada variável para o período desejado estes foram inseridos em ambiente SIG, no software ArcGIS®, por meio da função “*Make NetCDF Raster Layer*”, em seguida, utilizou-se a função “*Export Raster Data*” para conversão em formato raster.

Etapa 2: Cálculo da média das variáveis no período de 1992 a 2021

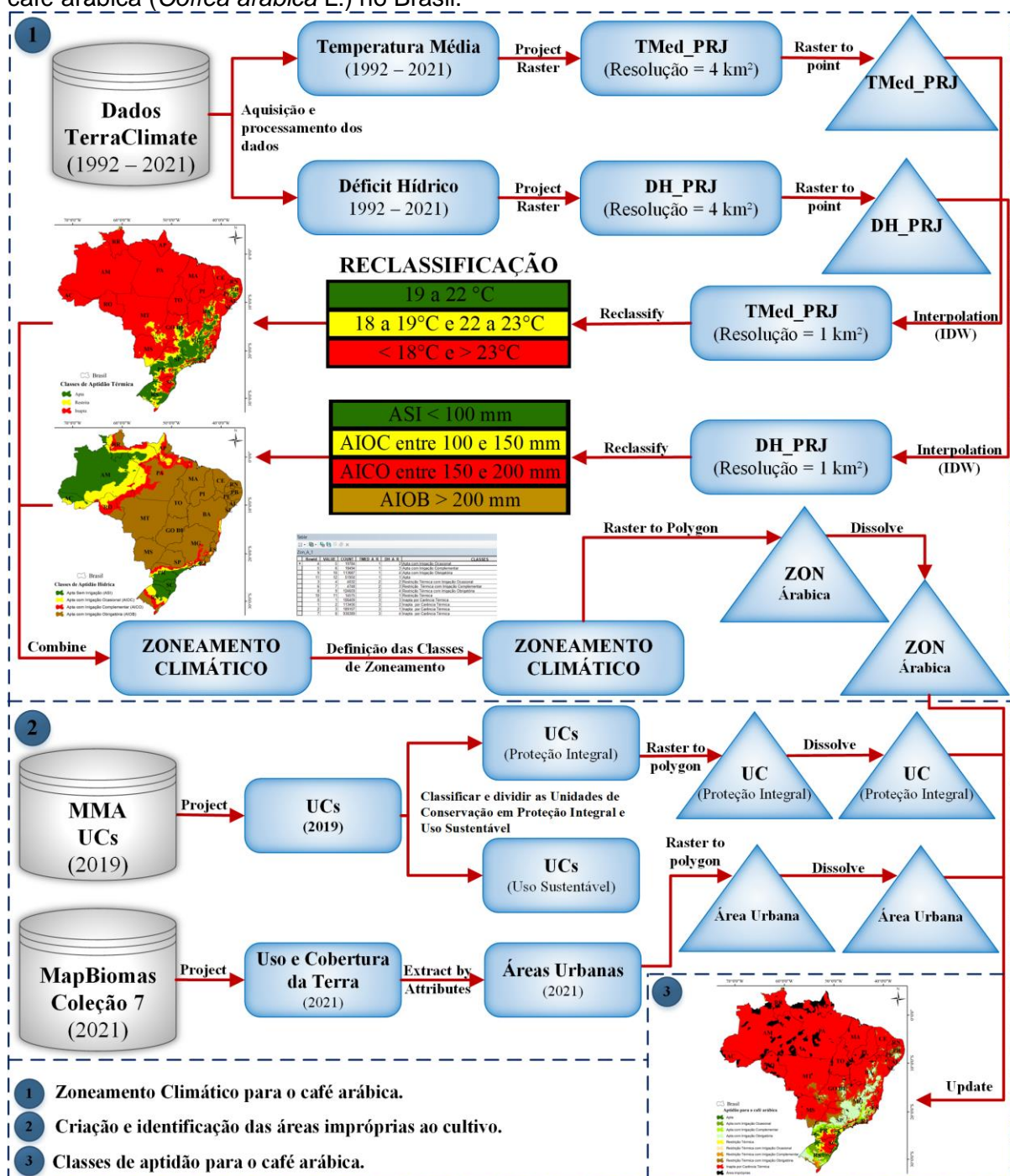
O arquivo raster foi inserido na função “*Calculadora raster*”, do software QGIS®, para obtenção de valor único para cada variável no período de 1992 a 2021.

A variável de temperatura máxima foi obtida por meio da média das temperaturas máximas mensais, a temperatura mínima foi obtida por meio da média das mínimas mensais e a temperatura média foi obtida pela média da temperatura máxima e da temperatura mínima. Por outro lado, a pressão de vapor e o déficit hídrico foram obtidos por meio da média acumulada anual.

2.3 Zoneamento Climático

O fluxograma metodológico contendo as etapas necessárias para o zoneamento climático para o café arábica é apresentado na Figura 3.3 e foram embasadas na metodologia proposta por SANTOS et al. (2015), utilizando o software ArcGIS®.

Figura 3.3. Etapas metodológicas utilizadas para a elaboração do zoneamento climático do café arábica (*Coffea arabica* L.) no Brasil.



Fonte: a autora.

Etapa 1: Zoneamento climático para o café arábica

De posse das imagens matriciais de temperatura média e deficiência hídrica anual iniciou-se o processamento dos dados no aplicativo computacional ArcGIS®. Inicialmente as imagens matriciais foram projetadas por meio da função “Project Raster”. Em seguida, utilizou-se a função “Raster to point” para converter o arquivo

matricial em vetorial e interpolá-lo, por meio da função “*Interpolation (IDW)*” gerando um arquivo matricial com células de 1 km².

De posse das imagens matriciais projetadas e com resolução de 1 km², aplicou-se a função de “*Reclassify*” com base nos valores de cada variável, gerando imagens matriciais reclassificadas com classes de aptidão, restrição e inaptidão para o café arábica no Brasil (Tabela 3.1 e Tabela 3.2).

Tabela 3.1. Faixas de aptidão térmica para as culturas do café arábica (*Coffea arabica* L.)

Classe de Aptidão	Temperatura (°C) <i>Coffea arabica</i>
Apta	19 a 22
Restrita	18 a 19 e 22 a 23
Inapta	< 18 e > 23

Fonte: Adaptada de SANTOS et al. (2015).

Tabela 3.2. Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café arábica (*Coffea arabica* L.)

Classe de Aptidão	Deficiência hídrica (mm) <i>Coffea arabica</i>
Apta sem irrigação (ASI)	< 100
Apta com irrigação ocasional (AIOC)	100 a 150
Apta com irrigação complementar (AICO)	150 a 200
Apta com irrigação obrigatória (AIOB)	> 200

Fonte: Adaptada de SANTOS et al. (2015).

Após gerar as matrizes de temperatura média e déficit hídrica reclassificadas, com base nas classes de aptidão, utilizou-se a função “*Combine*” com a finalidade de gerar o zoneamento climático para a cultura de café arábica no Brasil, considerando essas duas variáveis. Criou-se uma coluna denominada classe, onde foram inseridos os nomes referentes aos graus de aptidão, restrição e inaptidão de acordo com a interação entre as variáveis temperatura e déficit hídrico, respeitando a classificação mais restritiva.

A imagem matricial representativa do zoneamento climático para o café arábica foi convertida para o formato vetorial poligonal por meio da função “*Raster to polygon*”. Devido ao elevado número de polígonos obtidos após o processo de conversão vetorial foi aplicada a função “*Dissolve*”, tendo como saída um novo arquivo vetorial com tabela de atributos contendo as classes de aptidão.

Na tabela de atributo do arquivo vetorial poligonal dissolvido foram criados três novos campos, com tipos de dados reais, intitulados área, perímetro e porcentagem. Em estado de edição, utilizando a função “*Calculate geometry*”, foi calculada as áreas (km²) e perímetros (km) para as referidas classes de aptidão.

Finalmente, por meio da função “*Field calculator*” foi calculada a porcentagem das classes de aptidão, culminando nos mapas de zoneamento climático para a cultura do café arábica no Brasil.

Etapa 2: Criação e identificação das áreas impróprias ao cultivo

Algumas áreas do território brasileiro são impróprias para o cultivo agrícola, com destaque para as unidades de conservação de proteção integral e as áreas urbanas contidas no território brasileiro. Pensando nisso, foi realizado o download das unidades de conservação (UC) obtidas no Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2019) e do uso e cobertura da terra, para extração das áreas urbanas, obtido no MapBiomias referente ao ano de 2021 (SOUZA et al., 2020).

Após a aquisição da imagem matricial referente as unidades de conservação, estas foram projetadas e reclassificadas de acordo com sua categoria em unidades de conservação de proteção integral e unidades de conservação de uso sustentável. Conforme a Lei nº 9.985/2000, o objetivo básico das unidades de conservação de proteção integral é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais.

Por definição, unidades de conservação de proteção integral, refere-se à “proteção integral”, a manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana, admitido apenas o uso indireto dos seus atributos naturais. Já as unidades de uso sustentável é compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos seus recursos naturais. Entende-se como “uso sustentável” a exploração do ambiente de maneira a garantir a perenidade dos recursos ambientais renováveis e dos processos ecológicos, mantendo a biodiversidade e os demais atributos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável (CONAMA, 2000).

De acordo com a definição das categorias de UC, as unidades de conservação de proteção integral não permitem uso direto de seus recursos e por consequência o plantio agrícola. Senso assim, as UC de proteção integral foram exportadas, em seguida, convertidas em arquivo vetorial por meio da função “*Raster to polygon*” no ArcGIS® e projetadas. Devido ao elevado número de polígonos obtidos após o processo de conversão vetorial foi aplicada a função “*Dissolve*”, tendo como saída um novo arquivo vetorial, com tabela de atributos, onde foi inserida uma coluna e a classe de áreas impróprias.

De posse do arquivo matricial de uso e cobertura da terra do ano de 2021 utilizou-se a função “*Project*” para projetar a imagem. Em seguida, utilizou-se a função

“*Extract by Attributes*” para extrair as áreas urbanas da imagem matricial formando um novo arquivo matricial, as áreas urbanas foram convertidas de formato matricial para vetorial por meio da função “*Raster to polygon*”, projetadas e sobre o arquivo vetorial foi utilizado a função “*Dissolve*”, tendo como saída um novo arquivo vetorial com tabela de atributos onde foi inserida uma coluna, e nesta coluna inseriu-se a classe de áreas impróprias.

Etapa 3: Classes de aptidão para o café arábica

Nesta etapa, utilizou-se a função “*update*” para sobrepor as áreas impróprias, advindas das unidades de conservação de proteção integral e das áreas urbanas, no zoneamento climático do café arábica. De tal modo, foi gerado o mapa de aptidão climática para a cultura do café arábica.

Na tabela de atributo do arquivo vetorial poligonal foram criados três novos campos, com tipos de dados reais, intitulados área, perímetro e porcentagem. Em estado de edição, utilizando a função “*Calculate geometry*”, foi calculada as áreas (km²) e perímetros (km) para as referidas classes de aptidão e, por meio da função “*Field calculator*”, foi calculada a porcentagem das classes de aptidão, culminando nos mapas de zoneamento climático para a cultura do café arábica no Brasil.

2.4 Favorabilidade climática à ocorrência da *Hemileia vastatrix*

Neste tópico a metodologia se embasou na estruturação de um banco de dados climático das variáveis consideradas importantes para o estabelecimento e desenvolvimento da ferrugem do cafeeiro: temperatura média do ar e umidade relativa.

O dado climático de temperatura média do ar foi obtido conforme o item 2.2 desta metodologia, e a umidade média do ar foi calculada com base na temperatura média do ar e na pressão de vapor obtidas de acordo com o item 2.2.

Existe um limite para a quantidade de vapor que um dado volume de ar pode suportar e, quando este limite é alcançado, diz-se que o ar está saturado. O que determina o estado de saturação do vapor d'água na atmosfera é unicamente a temperatura. Portanto, a pressão máxima do vapor d'água é função da temperatura do ar, quanto maior a temperatura, maior será sua capacidade de suportar umidade e, conseqüentemente, maior será a pressão exercida pelo vapor d'água (SOARES; BATISTA; TETTO, 2015).

Quando o ar está saturado, a pressão exercida pelo vapor d'água é chamada de pressão máxima de vapor d'água (e_s) e como é função da temperatura, pode ser

calculada através da Equação 3.1 proposta por Tetens (TETENS, 1930). Para o cálculo da pressão máxima de vapor d'água utilizamos a função “*Raster calculator*” do *ArcGIS*® onde inserimos a Equação 3.1, utilizando a temperatura média do ar obtida no *TerraClimate* conforme Figura 3.2.

$$e_s = 0,611 * 10^{[(7,5 * T_{ar}) / (237,3 + T_{ar})]} \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

e_s é a pressão máxima de vapor d'água (kpa), e;

T_{ar} é a temperatura do ar (°C).

Como a umidade relativa do ar é a razão, em porcentagem, entre a quantidade de vapor d'água que o ar contém e a quantidade máxima que poderia conter à mesma temperatura, utilizamos a função “*Raster calculator*” do *ArcGIS*® onde inserimos a Equação 3.2 para obtenção da umidade relativa.

$$UR = \frac{e_a}{e_s} * 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que:

UR é a umidade relativa do ar (%);

e_a é a pressão atual de vapor d'água (kpa), e;

e_s é a pressão máxima de vapor d'água (kpa).

De posse das imagens matriciais de temperatura umidade relativa do ar no aplicativo computacional *ArcGIS*®, estas foram projetadas por meio da função “*Project Raster*”. Em seguida, utilizou-se a função “*Raster to point*” para converter o arquivo matricial em vetorial e interpolá-lo, por meio da função “*Interpolation (IDW)*”, gerando um arquivo matricial com células de 1 km². Em seguida, foram elaborados os mapas de favorabilidade climática ao desenvolvimento da ferrugem do cafeeiro adaptando-se a metodologia utilizada por Cecílio e colaboradores (2006), aplicou-se a função de “*Reclassify*” com base nas classes de (Tabela 3.3), com o objetivo de gerar a imagem matricial reclassificada de temperatura e umidade relativa para a ocorrência da ferrugem do cafeeiro, no Brasil. Estas classes foram definidas com base em dados epidemiológicos do efeito da temperatura média e umidade relativa do ar no desenvolvimento da ferrugem do cafeeiro. Os limites das classes de favorabilidade climática da doença foram definidos com base em relatos bibliográficos (BOLDINI, 2001; MIRANDA, 2004; MORAES et al., 2011).

Tabela 3.3. Classes de favorabilidade a ocorrência de ferrugem do cafeeiro em função dos intervalos de temperatura média e umidade relativa do ar

Classe	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Altamente favorável	21 a 24	>82
Favorável	18 a 21 ou 24 a 27	75 a 82
Relativamente favorável	15 a 18 ou 27 a 30	70 a 75
Desfavorável	<15 ou >30	<70

Fonte: Adaptada de MORAES et al. (2011).

Após gerar as matrizes de temperatura média e umidade relativa reclassificadas, com base nas classes de favorabilidade, utilizou-se a função “*Combine*” com a finalidade de gerar mapa da distribuição espacial da *H. vastatrix*. Criou-se uma coluna denominada classe onde foram inseridos os nomes referentes aos graus de favorabilidade e desfavorabilidade de acordo com a interação entre as variáveis temperatura e umidade relativa.

A imagem matricial da distribuição espacial da favorabilidade de ocorrência à *H. vastatrix* foi convertida para o formato vetorial poligonal por meio da função “*Raster to polygon*”. Devido ao elevado número de polígonos obtidos após o processo de conversão vetorial foi aplicada a função “*Dissolve*”, tendo como saída um novo arquivo vetorial com tabela de atributos contendo as classes de favorabilidade à ocorrência da ferrugem.

Na tabela de atributo do arquivo vetorial dissolvido foram criados três novos campos, com tipos de dados reais, intitulados área, perímetro e porcentagem. Em estado de edição, utilizando a função “*Calculate geometry*” para calcular a área (km²) e o perímetro (km) para as referidas classes de favorabilidade. Finalmente, por meio da função “*Field calculator*” foi calculada a porcentagem das classes de favorabilidade, culminando no mapa de favorabilidade climática à ocorrência da *H. vastatrix* no Brasil.

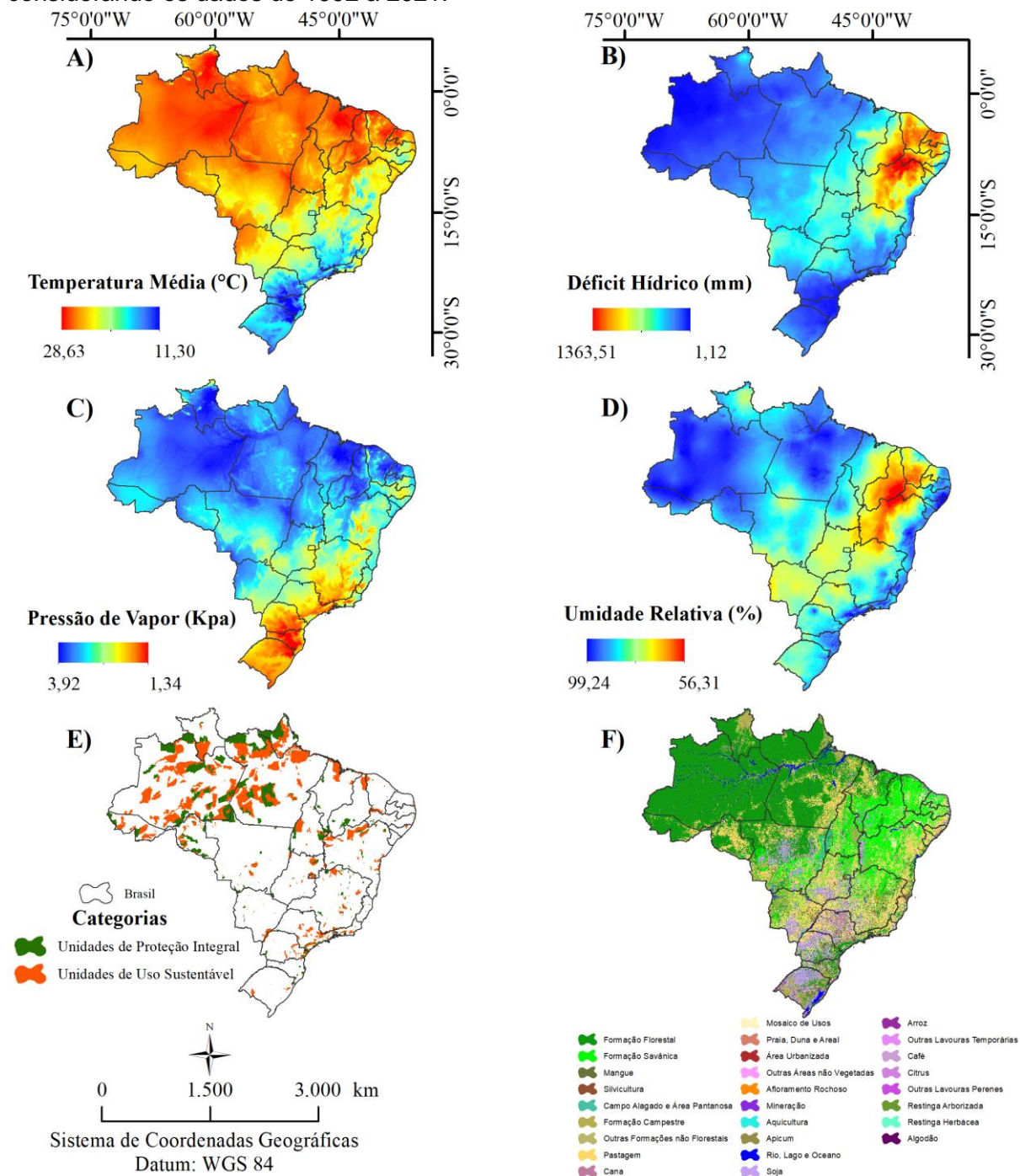
2.5 Favorabilidade climática à ocorrência de *Hemileia vastatrix* em áreas aptas ao cultivo de café arábica

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a favorabilidade à ocorrência de *Hemileia vastatrix* em áreas de aptidão climática ao cultivo do café arábica no Brasil, um corte sobre a favorabilidade de ocorrência da ferrugem em relação as áreas aptas e restritas ao cultivo de café arábica foi realizado por meio da função “*Clip*” do ArcGIS®.

3 RESULTADOS

Os mapas preliminares necessários para a elaboração do zoneamento climático para o café arábica e para a favorabilidade climática à ocorrência da ferrugem são apresentados na Figura 3.4.

Figura 3.4. Variáveis utilizadas para elaboração do zoneamento climático para o café arábica e favorabilidade à ocorrência da ferrugem do cafeeiro. Onde: A) temperatura média; B) déficit hídrico; C) pressão de vapor; D) umidade relativa; E) unidades de conservação, e; F) uso e cobertura da terra para a área de estudo, sendo as variáveis climáticas calculadas considerando os dados de 1992 a 2021.



Fonte: a autora.

O Zoneamento climático para o café arábica no Brasil é apresentado na Figura 3.5A. De acordo com os resultados, observa-se que as áreas aptas e aptas com algum tipo de irrigação, para o cultivo de café arábica, somam 9,30% do território brasileiro (Figura 3.5A). Enquanto, as áreas restritas e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica somam 7,04%, as áreas inaptas correspondem a 77,01% do território brasileiro e as áreas impróprias somam 6,65% do território brasileiro. Estão inclusas na categoria de áreas impróprias as áreas pertencentes a unidades de conservação de proteção integral e as áreas urbanas.

Excluindo as áreas inaptas por carência térmica e as áreas impróprias ao cultivo de café arábica temos uma área de 1.390.729,56 km², o que equivale a 16,34% do território brasileiro, vale ressaltar que estão inclusas áreas com algum tipo de restrição neste somatório (Figura 3.5A).

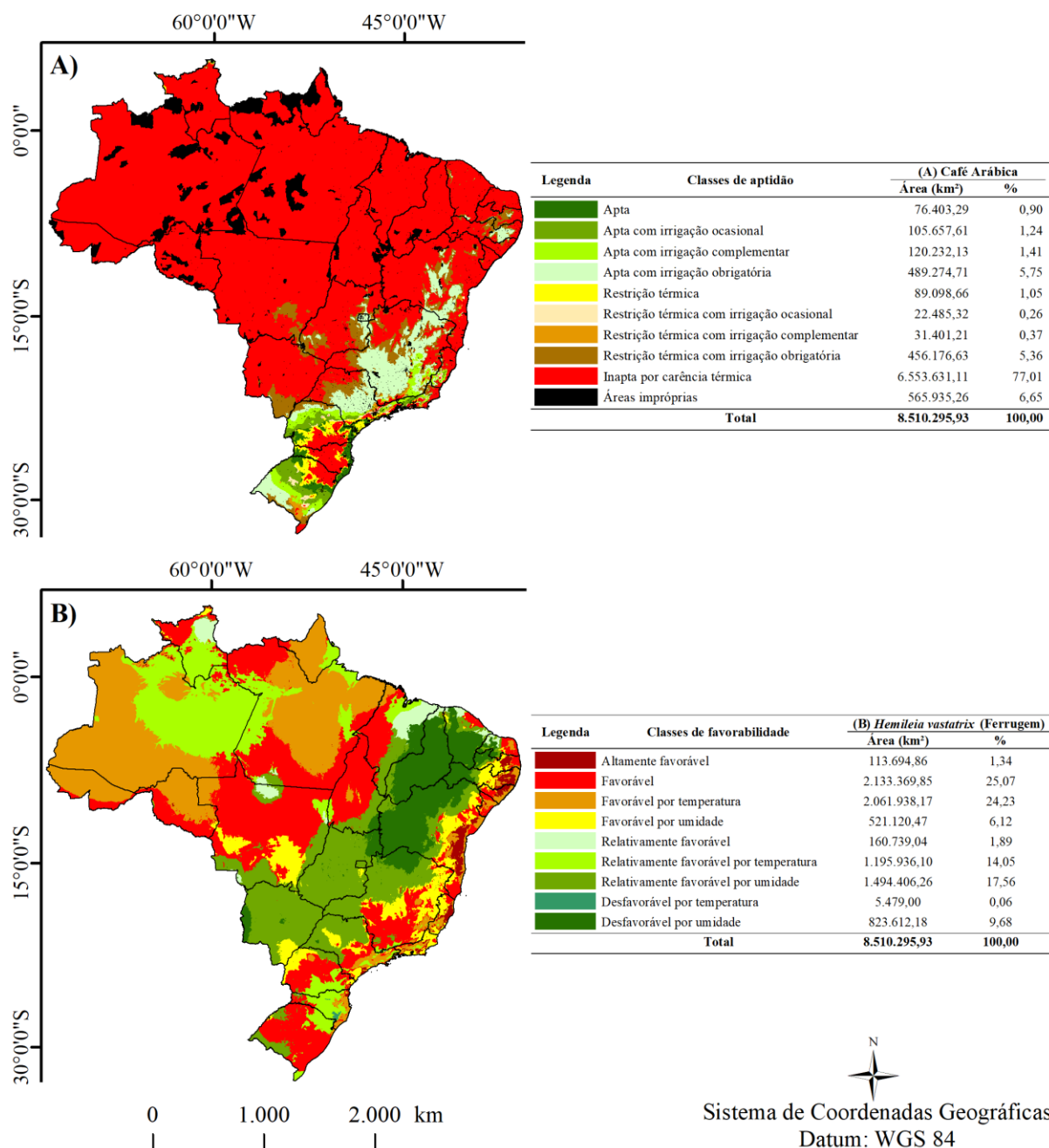
A porcentagem do território brasileiro ocupado pela classe de favorabilidade climática “altamente favorável” e “favorável” à ferrugem, considerando o período de 1992 a 2021, é de 1,34 % e 25,07%, respectivamente (Figura 3.5B).

Considerando apenas as áreas aptas, aptas com irrigação, restritas e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica temos: 54.088,66 km² de área altamente favorável, 502.160,58 km² de área favorável, 89.759,17 km² de área favorável por temperatura, 290.145,52 km² de área favorável por umidade, 423.427,28 km² de área relativamente favorável por umidade e 31.148,35 km² de área desfavorável por umidade ao desenvolvimento da ferrugem do cafeeiro (Figura 3.6A e Figura 3.6B).

Após a remoção das áreas inaptas e impróprias para o cultivo do café arábica observa-se que a área com maior porcentagem de ocupação para a favorabilidade da ferrugem do cafeeiro é a classe favorável à ocorrência da ferrugem (Figura 3.6B) e que dentro desta classe de favorabilidade (favorável) a classe com maior área é a apta com irrigação obrigatória, 35,42% ou 177.842,53 km² de área, seguida pela classe apta com irrigação ocasional que representa 16,72% da área o que equivale a 83.977,44 km² (Figura 3.6C).

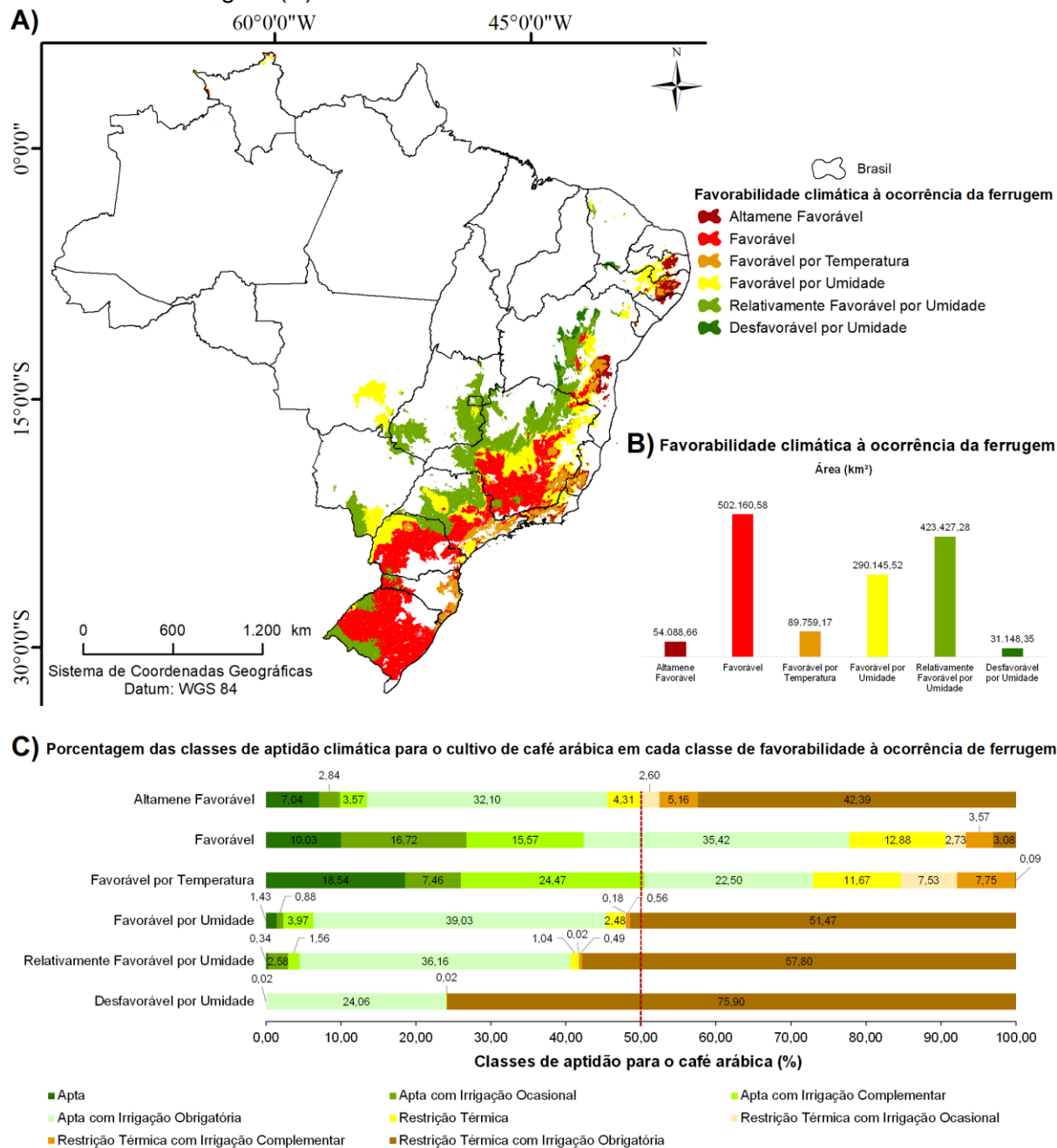
Podemos observar na Figura 3.6C que a classe de favorável e favorável por temperatura em relação à ocorrência da ferrugem são as que possuem mais de 50 % de sua área aptas ou aptas com algum tipo de irrigação para o cultivo de café arábica.

Figura 3.5. Zoneamento climático para o café arábica (A) e favorabilidade à ocorrência da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) (B).



Fonte: a autora.

Figura 3.6. Favorabilidade à ocorrência de ferrugem em áreas aptas e restritas ao cultivo de café arábica (A), áreas das classes de favorabilidade à ocorrência da ferrugem (B) e porcentagem das classes de aptidão do café arábica em cada classe de favorabilidade à ocorrência da ferrugem (C).



Fonte: a autora.

Ao analisar a porcentagem de área ocupada por cada classe de favorabilidade à ocorrência de *Hemileia vastatrix*, dentro das classes de aptidão ao cultivo de café arábica, nota-se que a classe que ocupa maior área é a favorável tendo como exceção apenas a classe de restrição térmica com irrigação obrigatória. Nesta classe de aptidão se destaca a classe de relativamente favorável por umidade, que ocupa 53,65% da área o que equivale a 244.756,48 km² (Figura 3.7).

Figura 3.7. Classes de favorabilidade à ocorrência de *Hemileia vastatrix* por classe de aptidão (%).



Fonte: a autora.

Na Tabela 3.4 pode ser observada as áreas relativas as classes de favorabilidade à ocorrência de ferrugem para os estados brasileiros com áreas aptas, aptas com algum tipo de irrigação, restritas e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica. Observa-se que os estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo são os com maior área favorável à ocorrência da ferrugem, com 391.919,32 km², 237.735,89 km² e 163.972,69 km² de área, respectivamente.

Tabela 3.4. Áreas favoráveis à ocorrência de ferrugem (km²), nos estados aptos, aptos com irrigação, restritos e com algum tipo de restrição para o cultivo de café arábica.

ESTADOS	Altamente Favorável	Favorável	Favorável por Temperatura	Favorável por Umidade	Relativamente Favorável por Umidade	Desfavorável por Umidade	Total Geral
Alagoas	2.367,13	-	17,56	213,24	-	-	2.597,93
Amazonas	19,39	0,05	0,72	8,33	-	-	28,48
Bahia	14.704,09	11.531,87	10.028,28	28.135,92	38.107,19	21.632,06	124.139,42
Ceará	60,57	-	-	1.474,83	1.848,32	2.083,33	5.467,06
Distrito Federal	-	-	-	56,02	4.468,05	-	4.524,06
Espírito Santo	3.669,33	658,05	8.008,22	4.607,05	2,53	-	16.945,18
Goiás	-	1,00	-	3.396,91	86.793,97	1.162,45	91.354,32
Mato Grosso	-	-	-	32.269,93	3.264,31	-	35.534,24
Mato Grosso do Sul	-	-	-	19.452,29	30.839,18	-	50.291,47
Minas Gerais	2.181,20	144.040,96	16.386,30	95.046,88	129.383,37	4.880,62	391.919,32
Paraíba	7.392,91	99,30	29,49	11.070,60	200,48	-	18.792,79
Paraná	895,94	93.983,09	3.355,89	31.427,33	17.411,14	8,00	147.081,38
Pernambuco	12.222,21	614,32	4.017,48	15.039,85	509,49	1.367,73	33.771,08
Piauí	-	-	-	-	-	9,16	9,16
Rio de Janeiro	4.975,37	2.910,88	8.730,11	6.965,91	7,55	-	23.589,81
Rio Grande do Norte	2,00	-	-	333,79	1,00	-	336,79
Rio Grande do Sul	-	192.536,31	1.621,55	1.781,04	41.796,99	-	237.735,89

Continua ...

... continuação

ESTADOS	Altamente Favorável	Favorável	Favorável por Temperatura	Favorável por Umidade	Relativamente Favorável por Umidade	Desfavorável por Umidade	Total Geral
Roraima	1.562,38	16,34	10,34	3.172,13	-	-	4.761,20
Santa Catarina	1.620,60	13.138,41	18.349,12	331,94	3.897,63	4,00	37.341,71
São Paulo	2.050,53	42.629,99	19.204,12	35.305,36	64.781,68	1,00	163.972,69
Sergipe	365,02	-	-	56,16	-	-	421,17
Tocantins	-	-	-	-	114,38	-	114,38
Total Geral	54.088,66	502.160,58	89.759,17	290.145,52	423.427,28	31.148,35	1.390.729,56

4 DISCUSSÃO

Os cafeeiros são sensíveis ao clima, às condições do solo e às práticas agrícolas, descritas na literatura pelas variáveis altitude, temperatura, precipitação, umidade do ar, pH em H₂O, capacidade de troca catiônica, teor de carbono orgânico do solo, densidade e textura do solo (DESCROIX; SNOECK, 2009; ESTRADA; RASCHE; SCHNEIDER, 2017; SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013). Desta lista, excluímos a altitude para o nosso modelo, que normalmente está associada a condições climáticas, como, temperatura e pressão atmosférica, devido a essa alta correlação optamos pela exclusão da altitude e utilização da temperatura (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; SOARES; BATISTA; TETTO, 2015), outra variável utilizada neste estudo foi o déficit hídrico que está diretamente ligada a precipitação, as demais variáveis relativas a condições químicas do solo podem ser alteradas por meio de práticas agrícolas e não foram utilizadas para o zoneamento.

Para os fatores selecionados, compilamos seus níveis ótimos (aptos), subótimos (restritos) e inadequados (inaptos) para a produção de café (Tabela 3.1). As temperaturas médias anuais de 19 a 22 °C são consideradas ideais para a produção de café (ALÈGRE, 1959; SANTOS et al., 2015). Temperaturas acima dessa faixa aceleram o amadurecimento da polpa do café antes de atingir a maturação completa do grão e, conseqüentemente, a qualidade do café diminui (ESTRADA; RASCHE; SCHNEIDER, 2017; VAAST et al., 2006). Além disso, o crescimento da planta é reduzido e as anormalidades vegetativas começam a ocorrer em temperaturas muito baixas ou muito altas (DAMATTA et al., 2006).

Para o déficit hídrico, Santos et al. (2015) estimou que as necessidades de água não poderiam ultrapassar 100 mm.ano⁻¹ para o cultivo de café arábica sem necessidade de irrigação. No entanto, altos índices de água podem levar a

encharcamento, aumento de doenças fúngicas, queda prematura de bagas e aplicação ineficaz de fertilizantes, entre outros (EUROPEA, 2020).

Os resultados referentes às zonas de aptidão climática para a cultura do café arábica demonstram que 1.390.729,56 km² da área total do território brasileiro, o que equivale a 16,34% do território, são áreas aptas e restritas ao cultivo de café arábica. Tal valor é superior a área estimada de cultivo atual (2022) que é de 1,81 milhão de hectares o que corresponde a 18.100 km² (FERREIRA; CAVATON, 2022). Tais valores demonstram a potencialidade de produção e expansão das áreas produtoras de café arábica no Brasil.

Segundo Graesser et al. (2015), a América Latina, e em especial o Brasil, é a região no planeta com o melhor potencial remanescente para a expansão agrícola, devido a abundância de terras, águas e a biodiversidade. Mas vale ressaltar que apesar de o crescimento agrícola gerar ganhos inegáveis do ponto de vista econômico para a balança comercial brasileira, os impactos ambientais também podem ser substantivos, se o crescimento não for baseado em planejamento e forte uso de tecnologias, que busquem produção sustentável, os danos ao meio ambiente também podem gerar perdas econômicas e sociais que muitas vezes são subestimadas.

De acordo com Branco et al. (2021), não somente a área de cobertura da Mata Atlântica, um dos principais biomas onde o cultivo de café ocorre, mas também a biodiversidade vem reduzindo em ritmo acelerado nas últimas décadas, cenário preocupante para um dos *hotspots*¹ mundiais de biodiversidade.

Os estados produtores de café arábica são: Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás, Amazonas Ceará, Pernambuco, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal (CONAB, 2022). Todos estes estados possuem área classificadas como apta, apta com irrigação, restrita ou com algum tipo de restrição, por este estudo. No entanto, estados como Alagoas, Mato Grosso, Paraíba, Rio Grande do Sul, Roraima, Santa Catarina, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e Tocantins (Figura 3.5) possuem áreas classificadas neste estudo como possíveis ao cultivo do café, o que vai de encontro com os dados da CONAB referentes aos estados produtores. Dentre os estados citados Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e

¹*hotspots* representam as áreas naturais do planeta Terra que possuem uma grande diversidade ecológica.

Tocantins possuem área com algum tipo de restrição ao cultivo de café arábica de dimensão ínfima e não possuem a classe apta ao cultivo de café arábica.

Cada uma das áreas identificadas como apta, apta com irrigação, restrita ou com algum tipo de restrição deve ser analisada mais de perto para um planejamento e implementação adequada do café arábica, algumas dessas regiões podem ter especificidades que impossibilitem o cultivo, como, ocorrência frequente de geada, terreno rochoso, área de preservação ou reserva legal, sendo que estes empecilhos ambientais e físicos devem ser levados em consideração. Por outro lado, as regiões com restrição térmica podem ter seu potencial de produção aumentado por meio da redução da temperatura com implementação de um sistema consorciado que proporcione sombreamento e modificação do microclima (COLTRI et al., 2019), neste caso deve-se optar por variedades de café arábica mais adaptadas ao desenvolvimento em sombra.

O estudo desenvolvido por Ferrão et al. (2021) demonstrou que o cultivo sombreado das variedades Catuaí Amarelo IAC 86, Tupi IAC 1669-33 e Obatã IAC 1669-20 obteve produtividade média superior (Catuaí Amarelo) ou estatisticamente igual (Tupi e Obatã) comparado ao cultivo das mesmas variedades a pleno sol. Temos assim, um banco de dados que pode ser levantado e cruzado para a escolha da melhor variedade de acordo com as características locais e anseios do produtor.

Em relação aos resultados de favorabilidade de ocorrência da ferrugem do cafeeiro nota-se que as classes de favorável e favorável por temperatura são as com maior extensão, 2.133.369,85 km² e 2.061.938,17 km², respectivamente (Figura 3.5). Tal cenário sofre uma leve mudança ao ser removidas as áreas inaptas e impróprias para o cultivo de café arábica, passa-se a destacar a nível de área as classes de favorável (502.160,58 km²) e relativamente favorável por umidade (423.427,28 km²), como observado na Figura 3.6B. Isso ocorre porque as áreas inaptas por temperatura ao cultivo de café arábica (temperatura menor que 18°C e maior que 24°C) apresentam similaridade com parte das áreas favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem (temperatura entre 18°C e 21°C e entre 24°C e 27°C), áreas com temperatura entre 24°C e 27°C são inaptas termicamente ao cultivo de café arábica e favorável ao desenvolvimento da ferrugem.

Dentro das áreas aptas, aptas com algum tipo de irrigação e restrita, teremos apenas as classes de favorabilidade altamente favorável e favorável a ocorrência da ferrugem em relação a temperatura (Figura 3.6C).

A ferrugem do cafeeiro é a doença mais devastadora que ataca os plantios de café, causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* (MCTAGGART et al., 2016). Em alta incidência, a ferrugem pode causar desfolha de até 50% e perdas de rendimento entre 30 e 50% (ZAMBOLIM, 2016). A distribuição da favorabilidade à ocorrência da ferrugem pelos estados aptos e restritos ao cultivo de café arábica, visualizado na Figura 3.6A e Tabela 3.4, evidencia que as maiores áreas são referentes a classe de favorável e que os estados que possuem maior área em relação a esta classe são o Rio Grande do Sul (192.536,31km²) e Minas Gerais (144.040,96 km²). Plantações de café não são tão comuns em terras gaúchas, mas pesquisas apontam que as mudanças climáticas dos últimos anos podem provocar uma nova geografia da produção, dando lugar a culturas antes restritas a outras áreas do Brasil (ZILLI et al., 2020).

Plantações de cana-de-açúcar e de café, por exemplo, têm potencial para competir com culturas tradicionais na paisagem do estado do Rio Grande do Sul frente as mudanças climáticas. No entanto, atualmente, fenômenos climáticos adversos são empecilhos para a produção de café na região Sul do Brasil. A ocorrência do fenômeno de geadas no Brasil é observado preferencialmente em latitudes maiores de 20° S, abrangendo os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sendo este último o mais afetado (BUSSONI; MOREIRA; MACHADO, 2022).

Nas classes de áreas aptas, aptas com irrigação ocasional e aptas com irrigação complementar mais de 50% das áreas são altamente favoráveis e favoráveis à ocorrência de ferrugem, enquanto as áreas aptas com irrigação obrigatória possuem 3,55% e 36,35% da área altamente favorável e favorável ao desenvolvimento da ferrugem, respectivamente (Figura 3.7). Tal informação quando correlacionada a espacialização dos dados fornece embasamento para a escolha da melhor variedade de café a ser implantada em cada região (Figura 3.6A e Tabela 3.4).

Das variedades atualmente disponíveis, as mais plantadas são a Mundo Novo e a Catuaí, ambas susceptíveis à ferrugem, ocorrendo a introdução gradativa de novos materiais, principalmente aqueles com resistência à ferrugem, em que se destacam as cultivares Catuaí, IBC-Palma, Acauã e os Sarchimores (Tupi, Obatã e IAPAR 59) e as lançadas mais recentemente, como Oeiras, Catiguá, Araponga, Paraíso, Pau-Brasil e Arara (CARVALHO, 2007; COSTA, 2020)

Nas áreas identificadas como altamente favorável e favorável à ocorrência da ferrugem e que tenham necessidade de irrigação, recomenda-se à adoção de

variedades resistentes à ferrugem e tolerantes a seca, como o Acauã. A cultivar Acauã é oriunda do cruzamento entre Mundo Novo IAC 388-17 e Sarchimor (IAC 1668), apresenta boa tolerância a seca, bebida de boa qualidade, ciclo tardio e é altamente resistente a ferrugem (CARVALHO, 2007). Além do Acauã, o Arara tem ganhado posição de destaque sendo plantada na maioria das regiões cafeeiras, é proveniente de uma hibridação natural entre Obatã e Catuaí Amarelo e é altamente resistente a ferrugem com alta produtividade e potencial para bebida de boa qualidade (PROCAFÉ, 2020).

Em áreas com restrição térmica, devido à temperaturas mais altas, deve-se optar por cultivares como o Catuaí (adaptado aos extremos de temperaturas – altas e baixas), IBC-Palma e Acauã que possuem boa adaptação em regiões quentes (CARVALHO, 2007). Se estas áreas forem: altamente favorável, favorável, favorável por temperatura ou favorável por umidade, recomenda-se o plantio de cultivares resistentes à ferrugem, dentre as citadas a mais recomendada seria a cultivar Acauã. Caso a região seja relativamente favorável por umidade ou desfavorável por umidade, recomenda-se o plantio de variedades resistentes a altas temperaturas, mas não, necessariamente, resistentes a ferrugem, poderia ser utilizada cultivares como o IBC-Palma 1 ou IBC-Palma 2 que são moderadamente resistentes ou/e o Catuaí que é susceptível à ocorrência da ferrugem.

Também é importante a correlação dos resultados deste estudo com o manejo a ser adotado. Cultivos, orgânico ou consorciado, possibilitam a criação de microclima e por consequência redução de temperatura (COLTRI et al., 2019), sendo especialmente recomendados para áreas com restrição térmica e que possam ser afetadas por geadas. Cultivares como o Araponga MG1, Catiguá MG1, Catiguá MG2, Catiguá MG3, Paraíso MG H 419-1, Pau-Brasil MG1 e SACRAMENTO MG 1 são recomendados para o cultivo em sistema orgânico e/ou consorciado e são altamente resistente a ferrugem (CARVALHO, 2007; PROCAFÉ, 2020).

5 CONCLUSÕES

Apesar dos avanços nas pesquisas a ferrugem do café ainda representa uma ameaça significativa e aumenta os custos de produção na cafeicultura do país. Esse cenário se deve à combinação de condições ambientais favoráveis na maioria das regiões cafeeiras e ao amplo uso de variedades susceptíveis.

Os resultados deste estudo indicam à existência de variabilidade na distribuição espacial das áreas de favorabilidade climática à ocorrência da ferrugem do cafeeiro no Brasil. A associação entre as classes de aptidão e de favorabilidade nos fornece embasamento para escolha das cultivares mais adequadas para cada região, além disso, o manejo a ser adotado deve ser levado em consideração.

O estado de Minas Gerais, maior produtor de café arábica, é o que possui maior área referente as classes de altamente favorável e favorável à ocorrência da ferrugem requerendo cuidado especial na escolha das cultivares a serem implantadas.

6 REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data** **2018**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 9 jan. 2018.
- ALÈGRE, C. Climates et caféiers d'Arabie. **Agronomie Tropicale**, v. 14, n. 1, p. 23–58, 1959.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AVELINO, J. et al. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. **Food Security**, v. 7, n. 2, p. 303–321, 1 abr. 2015.
- BENTI, F. et al. Modeling coffee (*Coffea arabica* L.) climate suitability under current and future scenario in Jimma zone, Ethiopia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 1–14, 1 abr. 2022.
- BOLDINI, J. M. **Epidemiologia de ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. [s.l.] Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- BOTE, A. D. et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. **European Journal of Agronomy**, v. 92, p. 115–122, 1 jan. 2018.
- BRANCO, A. F. V. C. et al. Avaliação da perda da biodiversidade na Mata Atlântica. **Ciencia Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1885–1909, 2021.
- BUNN, C. et al. Multiclass Classification of Agro-Ecological Zones for Arabica Coffee: An Improved Understanding of the Impacts of Climate Change. **PLOS ONE**, v. 10, n. 10, p. e0140490, 27 out. 2015.
- BUSSONI, C. V. A.; MOREIRA, D. S.; MACHADO, J. P. Avaliação do Modelo WRF para Aplicação de um Índice de Previsão de Geada na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 3, p. 279–287, 2022.
- CARVALHO, C. H. S. DE. **Cultivares de café**. Brasília: EMBRAPA, 2007.
- CECÍLIO, R. A. et al. Zoneamento agroclimático para a heveicultura na parte leste do Estado da Bahia. **Bahia Agrícola**, v. 7, p. 14–17, 2006.
- CHAVES, M. G. et al. **Ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br).** **Revisão de literatura com observações e comentários sobre a enfermidade no Brasil**. [s.l.] Seiva, 1970.
- COLTRI, P. P. et al. Low levels of shade and climate change adaptation of Arabica coffee in southeastern Brazil. **Heliyon**, v. 5, n. 2, p. e01263, fev. 2019.
- CONAB, C. N. DE A. **Acompanhamento da safra brasileira**. 9. ed. Brasília, 2022.

CONAMA. **Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências**. Brasil, 2000. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm>

COSTA, B. D. R. Brazilian specialty coffee scenario. **Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil: A Volume in the Consumer Science and Strategic Marketing Series**, p. 51–64, 1 jan. 2020.

DAMATTA, F. M. et al. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 55–81, 2006.

DAVIS, A. P. et al. The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. **PLoS ONE**, v. 7, n. 11, p. e47981, 7 nov. 2012.

DE MEDEIROS, F. J. et al. Numerical simulation of the circulation and tropical teleconnection mechanisms of a severe drought event (2012–2016) in Northeastern Brazil. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 9–10, p. 4043–4057, 1 maio 2020.

DESCROIX, F.; SNOECK, J. Environmental factors suitable for coffee cultivation. **Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders and researchers**, p. 168–181, 2009.

ESKES, A.; MENDES, M.; ROBBS, C. Laboratory and field studies on parasitism of *Hemileia vastatrix* with *Verticillium lecanii* and *V. leptobactrum*. **Cafe Cacao The**, v. 1, p. 275–282, 1991.

ESTRADA, L. L.; RASCHE, L.; SCHNEIDER, U. A. Modeling land suitability for *Coffea arabica* L. in Central America. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 196–209, 1 set. 2017.

EUROPEA, C. S. C. AND U. **Guía práctica de caficultura**. 2020.

FERRÃO, M. A. G. et al. **Indicação de cultivares de café arábica para o estado do Espírito Santo e avaliação comparativa com o conilon em altitude elevada**. 6. ed. Brasília: Embrapa, 2021.

FERREIRA, L. T.; CAVATON, T. **Produção de café arábica e café conilon da safra total dos Cafés do Brasil em 2022**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/73940564/producao-de-cafe-arabica-corresponde-a-64-e-cafe-conilon-a-36-da-safra-total-dos-cafes-do-brasil-em-2022#:~:text=pela Embrapa Café.,Complementando esta análise da safra dos Cafés do Brasil de,to>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

GRAESSER, J. et al. Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, p. 034017, 1 mar. 2015.

IBGE. **Censo Brasileiro**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. 2022

JACKSON, D.; SKILLMAN, J.; VANDERMEER, J. Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii*

in a complex coffee agroecosystem. **Biological Control**, v. 61, n. 1, p. 89–97, 1 abr. 2012.

LUIZ-SILVA, W. et al. An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 2, p. 289–308, 25 jan. 2021.

MARQUES, C. S. et al. Diagnosis of Rural Environmental Registration and agricultural zoning in Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e24011528137–e24011528137, 5 abr. 2022.

MCTAGGART, A. R. et al. Host jumps shaped the diversity of extant rust fungi (Pucciniales). **New Phytologist**, v. 209, n. 3, p. 1149–1158, 1 fev. 2016.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MIRANDA, J. C. **Intensidade de doenças foliares na cafeicultura fertirrigada**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. 2019.

MORAES, W. B. et al. Zoneamento das áreas de favorabilidade climática de ocorrência da ferrugem do cafeeiro no Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1–10, 2011.

PATAY, É. B.; BENCSIK, T.; PAPP, N. Phytochemical overview and medicinal importance of *Coffea* species from the past until now. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, v. 9, n. 12, p. 1127–1135, 1 dez. 2016.

PEZZI, L. P. et al. The effect of Oceanic South Atlantic Convergence Zone episodes on regional SST anomalies: the roles of heat fluxes and upper-ocean dynamics. **Climate Dynamics**, v. 59, n. 7–8, p. 2041–2065, 1 out. 2022.

PROCAFÉ. **Manual e características das principais cultivares de café**. Varginha - MG: Plataforma Procafé, 2020.

SALCEDO-SARMIENTO, S. et al. Elucidating the interactions between the rust *Hemileia vastatrix* and a *Calonectria* mycoparasite and the coffee plant. **iScience**, v. 24, n. 4, p. 102352, 23 abr. 2021.

SANTOS, A. R. et al. **Zoneamento Agroclimático no ArcGIS 10.3.1 Passo a Passo**. Alegre: CAUFES, 2015.

SEDIYAMA, G. C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 501–509, 2001.

SILVA ARAGÃO, O. O. DA et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 1 jun. 2020.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; BOTTEGA, E. L. Yield mapping of arabic coffee and their relationship with plant nutritional status. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 3, p. 556–564, 2013.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2735**, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020.

TETENS, O. Uber einige meteorologische Begriffe. **Z. geophys**, v. 6, p. 297–309, 1930.

VAAST, P. et al. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 2, p. 197–204, 30 jan. 2006.

ZAMBOLIM, L. Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 41, n. 1, p. 1–8, 1 fev. 2016.

ZILLI, M. et al. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 740, p. 139384, 20 out. 2020.