



LAÍS DE OLIVEIRA SILVA

**GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA APLICADAS NO
ESTUDO DE EMBASAMENTO TÉCNICO PARA
INDICAÇÕES GEOGRÁFICAS EM CAFÉ.**

**LAVRAS – MG
2025**

LAÍS DE OLIVEIRA SILVA

**GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA APLICADAS NO ESTUDO DE
EMBASAMENTO TÉCNICO PARA INDICAÇÕES GEOGRÁFICAS EM CAFÉ.**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, área de concentração em
Processamento de Produtos Agrícolas, para
obtenção do título de Doutor.

Dr. Flávio Meira Borém
Orientador

Dra. Sylvana Naomi Matsumoto
Coorientador

**LAVRAS – MG
2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva , Laís de Oliveira.

Geostatística e espectroscopia aplicadas no estudo de embasamento técnico para
indicações geográficas em café. / Laís de Oliveira Silva . - 2024.
146 p. : il.

Orientador: Flávio Meira Borém

Coorientadora: Sylvana Naomi Matsumoto

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Coffea arabica L.. 2. Análise sensorial. 3. Indicação Geográfica . 4.
Espectroscopia de UV-vis. 5. Quimiometria. I. Borém , Flávio Meira. II.
Matsumoto , Sylvana Naomi. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

LAÍS DE OLIVEIRA SILVA

**GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA APLICADAS NO ESTUDO DE
EMBASAMENTO TÉCNICO PARA INDICAÇÕES GEOGRÁFICAS EM CAFÉ.**

**GEOSTATISTICS AND SPECTROSCOPY APPLIED IN THE STUDY OF
TECHNICAL BASIS FOR GEOGRAPHICAL INDICATIONS IN COFFEE.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Processamento de Produtos Agrícolas,
para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 19 de Dezembro de 2024.

Profa. Dra. Rosângela Alves Tristão Borém

UFLA

Prof. Dr. João Domingos Scalon

UFLA

Profa. Dra. Mariana Ramos de Almeida

UFMG

Profa. Dra. Sylvana Naomi Matsumoto

UESB

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO MEIRA BOREM**
Data: 11/08/2025 16:33:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Flávio Meira Borém Orientador

Dra. Sylvana Naomi Matsumoto Coorientador

LAVRAS – MG 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus esta oportunidade e ter colocado pessoas especiais que me ensinaram e engradeceram minha jornada.

À Universidade Federal de Lavras e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao meu orientador Flávio, por toda paciência, orientação e compartilhamento de sabedoria, um grande mestre, o qual admiro muito.

À professora Sylvana, coorientadora, e Associação Aliança dos Cafeicultores da Chapada Diamantina pela parceria e fornecimento da matéria-prima (café em grão cru).

Aos professores Dr. Luiz Fernando Cappa de Oliveira, Dra. Mariana Ramos de Almeida e suas equipes por disponibilizarem recursos físicos e intelectuais para a realização do trabalho.

À professora Rosângela por me acompanhar e me apoiar desde a graduação, sendo sempre muito gentil e amiga.

Ao professor João D. Scalon por toda gentileza e amizade, me auxiliar em um novo rumo à minha tese, transformando esse trabalho.

À Ana Paula, laboratorista no Centro de Pesquisa em Processamento de Produtos Agrícolas (CPPPA - UFLA) no Laboratórios de Análises Químicas e Processamento de Produtos Agrícolas, pela estimada amizade, apoio e auxílio em toda a condução do trabalho.

Aos colegas do CPPPA - UFLA pelo auxílio na condução do trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFLA. Aos meus pais e familiares por todo amor, carinho, apoio e incentivo.

À República Pira Saia, pela amizade, apoio e amor.

Ao Matheus pelo amor, carinho, compreensão e auxílio em algumas atividades. E à sua família, pelo carinho, auxílio e os momentos de descontração.

À minha família, pelo amor, carinho e apoio incondicional, sem eles nada seria possível.

À minha filha Elisa, por me dar forças em continuar minha caminhada, finalizando os ciclos e me tornando uma pessoa melhor por ela e pra ela.

RESUMO GERAL

As condições intrínsecas de clima, solo e relevo, aliadas às características agronômicas e genéticas das variedades de café, conferem uma identidade única à bebida, ligada ao seu local de produção. A crescente demanda global por cafés de alta qualidade, que exige rastreabilidade e certificação de origem, tem estimulado regiões produtoras, como o Brasil (maior produtor mundial), a buscarem o reconhecimento por meio de Indicações Geográficas (IGs) – incluindo a modalidade Denominação de Origem (DO) – visando proteger, valorizar e garantir a autenticidade e as características específicas de seus produtos. Neste contexto, diversas técnicas são empregadas para estabelecer o nexo causal entre as características do produto e o espaço geográfico, fundamental para a proposição de uma IG. Este estudo, focado na renomada região da Chapada Diamantina, Bahia (já reconhecida como IG na modalidade DO), utilizou uma abordagem multifacetada. Foram realizadas análises sensoriais e espectroscópicas de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) em cafés das safras de 2020/2021, abrangendo dois tipos de processamento: natural (via seca) e descascado (via úmida). A aplicação de métodos geoestatísticos aos dados sensoriais demonstrou que a distribuição da qualidade do café na Chapada Diamantina é espacialmente estruturada e fortemente influenciada por fatores geográficos. Cafés com perfil sensorial superior (maior intensidade de doçura, acidez, corpo, finalização e notas elevadas) são predominantes nas regiões Sul e Centro-Oeste, associadas a altitudes acima de 1100 metros. Em contraste, áreas mais ao norte, com altitudes menores, apresentaram maior adstringência e amargor, resultando em menor qualidade. A consistência desses padrões entre cafés descascados e naturais sublinha a preeminência do *terroir* (altitude e latitude, em particular) na determinação da qualidade intrínseca do café regional. Paralelamente, a espectroscopia de UV-Vis, associada à Análise de Componentes Principais (PCA), mostrou-se eficiente na discriminação de grãos de café da Chapada Diamantina em relação a amostras de outras regiões, validando a singularidade química do produto local. Contudo, dentro da própria área de estudo, a espectroscopia de UV-Vis não revelou tendências de agrupamento químico, indicando uma uniformidade química entre as amostras de café da região-alvo, independentemente do processamento. Em suma, este trabalho consolida a geoestatística como uma ferramenta robusta para compreender a distribuição espacial de características sensoriais e químicas, reforçando a ligação indissociável entre a qualidade do café e sua origem geográfica. Juntamente com a quimiometria, esta abordagem fornece subsídios científicos essenciais para a valorização e a proteção de produtos com Indicação Geográfica, fundamentando a singularidade do *terroir* da Chapada Diamantina.

Palavras chaves: *Coffea arabica* L; Análise sensorial; Indicação Geográfica; Espectroscopia de UV-vis; Quimiometria.

GENERAL ABSTRACT

The intrinsic conditions of climate, soil and relief, combined with the agronomic and genetic characteristics of coffee varieties, give a unique identity to the drink, linked to their place of production. The growing global demand for high quality coffees, which requires traceability and certification of origin, has stimulated producing regions, such as Brazil (largest worldwide producer), seeking recognition through geographical indications (Igs) - including the Modality Denomination of Origin (DO) - aiming to protect, value and ensure the authenticity and specific characteristics of their products. In this context, various techniques are employed to establish the causal link between the characteristics of the product and the geographical space, fundamental for the proposition of an IG. This study, focused on the renowned region of Chapada Diamantina, Bahia (already recognized as IG in the mode of), used a multifaceted approach. Sensory and spectroscopic analyzes of absorption were performed in the Ultraviolet-Visible (UV-VIS) region in cafes of the 2020/2021 crops, covering two types of processing: natural (dry via) and peeled (wet via). The application of geostatistic methods to sensory data has shown that the distribution of coffee quality in Chapada Diamantina is spatially structured and strongly influenced by geographical factors. Coffee with superior sensory profile (higher sweetness of sweetness, acidity, body, finishing and high notes) are predominant in the South and Midwest, associated with altitudes above 1100 meters. In contrast, northern areas, with lower altitudes, showed greater astringency and bitterness, resulting in lower quality. The consistency of these patterns between peeled and natural coffees underlines the preeminence of terroir (altitude and latitude, in particular) in determining the intrinsic quality of regional coffee. At the same time, UV-Vis spectroscopy, associated with the analysis of main components (PCA), was efficient in discrimination of Chapada Diamantina coffee beans compared to samples from other regions, validating the chemical uniqueness of the local product. However, within the area of study itself, UV-Vis spectroscopy did not reveal chemical grouping trends, indicating chemical uniformity between coffee samples in the target region, regardless of processing. In short, this work consolidates geostatistics as a robust tool for understanding the spatial distribution of sensory and chemical characteristics, reinforcing the inseparable connection between coffee quality and its geographical origin. Together with chemiometry, this approach provides essential scientific subsidies for the valorization and protection of products with geographical indication, based on the uniqueness of Chapada Diamantina terroir.

Keywords: *Coffea arabica* L; Sensory analysis; Geographic Indication; UV-vis spectroscopy. Chemometrics.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho teve como objetivo central caracterizar os grãos de café da região da Chapada Diamantina, Bahia, por meio de uma abordagem integrada que combinou análise sensorial, geoestatística e espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), visando o fortalecimento de sua Indicação Geográfica (IG) e a proposição de novas metodologias de certificação. Os resultados demonstram impactos significativos nas esferas social, tecnológica, econômica e ambiental, oferecendo subsídios para a valorização de produtos com origem controlada e promovendo a sustentabilidade da cadeia produtiva do café. Tecnicamente, a pesquisa validou a espectroscopia de UV-Vis como uma ferramenta eficiente para diferenciar os cafés da Chapada Diamantina de outras regiões produtoras, ao passo que a geoestatística se mostrou fundamental para a compreensão da distribuição espacial da qualidade sensorial, correlacionando-a com fatores geográficos como a altitude, latitude e longitude. Tais avanços tecnológicos têm potencial para serem incorporados em programas de certificação, aprimorando a rastreabilidade e a autenticação do café, e incentivando os produtores a adotarem práticas de produção mais sustentáveis para manter a qualidade e o reconhecimento. Os impactos econômicos e sociais manifestam-se diretamente na potencial valorização do café produzido, o que pode beneficiar um grupo de aproximadamente 400 produtores familiares e médios na região da Chapada Diamantina. A diferenciação e o reconhecimento de um produto de alta qualidade permitem o acesso a mercados mais exigentes, gerando maior renda e qualidade de vida para as comunidades rurais. A natureza da pesquisa se alinha com o caráter extensionista, estabelecendo uma conexão direta com a sociedade externa à UFLA, tendo como parceiros os produtores locais e a Associação Aliança dos Cafeicultores da Chapada Diamantina. O trabalho pode ser classificado nas áreas temáticas de extensão “Tecnologia e Produção” e “Trabalho”, uma vez que desenvolve metodologias inovadoras e contribui para a cadeia produtiva do café. Por fim, os impactos do estudo estão em alinhamento com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU para a Agenda 2030, em especial o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável) ao fortalecer uma produção agrícola sustentável; ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ao promover o aumento de renda e o desenvolvimento regional e o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao impulsionar o desenvolvimento de tecnologias e metodologias para a produção de café. Além disso, a tese contribui para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao fomentar a produção e o consumo de produtos de origem e qualidade certificadas, o que incentiva a adoção de práticas sustentáveis e a valorização de produtos que respeitam o meio ambiente e a sociedade.

IMPACT INDICATORS

The present work aimed to characterize the coffee beans of the Chapada Diamantina region, Bahia, through an integrated approach that combined sensory, geostatistic analysis and absorption spectroscopy in the ultraviolet-visible region (UV-vis), aiming at strengthening their geographical indication (IG) and the proposition of new certification methodologies. The results show significant impacts on social, technological, economic and environmental spheres, offering subsidies for the valorization of products with controlled origin and promoting the sustainability of the coffee production chain. Technically, research validated UV-Vis spectroscopy as an efficient tool for differentiating Chapada Diamantina coffees from other producing regions, while geostatistics was fundamental to understanding the spatial distribution of sensory quality, correlating it with geographical factors such as altitude, latitude and longitude. Such technological advances have the potential to be incorporated into certification programs, improving scrap and coffee authentication, and encouraging producers to adopt more sustainable production practices to maintain quality and recognition. The economic and social impacts manifest themselves directly on the potential appreciation of coffee produced, which can benefit a group of approximately 400 family and medium producers in the Chapada Diamantina region. Differentiation and recognition of a high quality product allow access to more demanding markets, generating higher income and quality of life for rural communities. The nature of the research aligns with the extension character, establishing a direct connection with the external society to UFLA, having as partners the local producers and the Aliança Association of Chapada Diamantina Coffee Growers. The work can be classified in the extent areas of “technology and production” and “work”, as it develops innovative methodologies and contributes to the coffee production chain. Finally, the impacts of the study are in alignment with various Sustainable Development Goals (SDGs) from the 2030 Agenda, especially the ODS 2 (hunger zero and sustainable agriculture) by strengthening sustainable agricultural production; ODS 8 (decent work and economic growth), by promoting increased income and regional development and ODS 9 (industry, innovation and infrastructure) by boosting the development of technologies and methodologies for coffee production. In addition, the thesis contributes to the ODS 12 (responsible consumption and production), by fostering the production and consumption of certified origin and quality products, which encourages the adoption of sustainable practices and the appreciation of products that respect the environment and society.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

- Figura 1 Selo da Chapada Diamantina reconhecido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial..... 29
- Figura 2 Localização dos municípios produtores de café da Chapada Diamantina – BA integrantes da indicação geográfica. 30

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

- Figura 1 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial dos cafés provenientes das cidades da Chapada Diamantina, sendo Bonito (♦ B), Barra da Estiva (■ BE), Ibicoara (▲ IBI), Morro do Chapéu (▼ MC), Mugugê (* M), Piatã (● P), Rio de Contas (◆ RC) e Seabra (■ SB) 68
- Figura 2 Análise da componente PC1 do atributo nota final da análise sensorial de café provenientes das cidades da Chapada Diamantina, sendo Bonito (♦ B), Barra da Estiva (■ BE), Ibicoara (▲ IBI), Morro do Chapéu (▼ MC), Mugugê (* M), Piatã (● P), Rio de Contas (◆ RC) e Seabra (■ SB) 68
- Figura 3 Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: docura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina..... 69
- Figura 4 Modelo de semivariograma aleatórios das variáveis sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g) 71
- Figura 5 Mapa de distribuição dos atributos sensoriais do café descascado pelo território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), atributo sensorial Finalização (f) e atributo sensorial Nota Final (g) 72
- Figura 6 Variabilidade espacial de Altitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo atributos sensoriais:

	Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	74
Figura 7	Variabilidade espacial de Latitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	76
Figura 8	Variabilidade espacial de Longitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	78
Figura 9	Análise tridimensional da distribuição dos atributos sensoriais do café descascado de acordo com a variabilidade espacial do território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	80
Figura 10	Mapa altimétrico da Chapada Diamantina, Bahia	81
Figura 11	Correlação dos atributos sensoriais do café descascado da Chapada Diamantina, Bahia	83
Figura 12	Modelo de semivariogramas aleatórios das variáveis sensoriais do café natural sendo os atributos: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	84
Figura 13	Mapa de distribuição dos atributos sensoriais do café natural pelo território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	85
Figura 14	Variabilidade espacial de Altitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	87
Figura 15	Variabilidade espacial de Latitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais:	

Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	89
Figura 16 Variabilidade espacial de Longitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	91
Figura 17 Análise tridimensional da distribuição dos atributos sensoriais do café natural de acordo com a variabilidade espacial do território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g)	93
Figura 18 Correlação dos atributos do café natural da chapada da Diamantina, Bahia	94

ARTIGO 2

Figura 1 Localização dos municípios produtores de café da Chapada Diamantina – BA integrantes da indicação geográfica	110
Figura 2 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis dos cafés provenientes da Chapada Diamantina (▼) e cafés de outras regiões produtoras de café (+).	113
Figura 3 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ♦ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	114
Figura 4 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ♦ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635	114
Figura 5 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: ♦ <199266, Class 2: ■ 199266-259265, Class 3: ▲ >259266	115

Figura 6	Mapa altimétrico da Chapada Diamantina, Bahia	118
Figura 7	Loadings em PC1 para o modelo PCA construído	119
Figura 8	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	121
Figura 9	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635	122
Figura 10	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: ◆ <199266, Class 2: ■ 199266-259265, Class 3: ▲ >259266	122
Figura 11	Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina	124
Figura 12	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e e atributos sensoriais correlacionados com altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	127
Figura 13	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635	127
Figura 14	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: ◆ <199266, Class 2: ■ 199266-259265, Class 3: ▲ >259266	128

Figura 15	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em 3 alturas: ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	129
Figura 16	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635	129
Figura 17	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: ◆ <218010, Class 2: ■ 218010-258009, Class 3: ▲ >258010	130
Figura 18	<i>Loadings</i> em PC1 para o modelo PCA construído	131
Figura 19	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	132
Figura 20	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635	132
Figura 21	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: ◆ <218010, Class 2: ■ 218010-258009, Class 3: ▲ >258010	133
Figura 22	Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na degustação de cafés provenientes da Chapada Diamantina	135
Figura 23	Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionado com a altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200	137

Figura 24 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1:  < 8522635, Class 2:  8522635-8642635, Class 3:  >8642635 137

Figura 25 Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1:  <218010, Class 2:  218010-258009, Class 3:  >258010 138

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1	Estruturas químicas dos principais compostos presentes nos cafés	24
----------	--	----

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO2

Tabela 1	Score (média de pontuação final) a partir da estratificação da hipsometria, do score e da divisão regional dos cafés processados por via úmida (CD) produzidos no território da Chapada Diamantina – BA	117
Tabela 2	Score (média de pontuação final) a partir da estratificação da hipsometria, do score e da divisão regional dos cafés processados por via seca (natural) produzidos no território da Chapada Diamantina – BA	134

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	
1.	INTRODUÇÃO..... 17
2.	REFERENCIAL TEÓRICO 20
2.1	Cafeicultura na Bahia e região da Chapada Diamantina..... 20
2.2	Cafés Especiais..... 21
2.3	Composição Química do Café 22
2.3.1	Principais Componentes Químico do Café 22
2.4	Indicação Geográfica 26
2.4.1	Denominação de Origem da Chapada Diamantina 27
2.5	Análise Sensorial 30
2.6	Espectroscopia de absorção na região do ultravioleta visível (UV-Vis)..... 32
2.7	Quimiometria 33
2.8	Análise de Componentes Principais - PCA 36
2.9	Estatística Espacial e Geoestatística..... 37
	REFERÊNCIAS 40
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS..... 58
	ARTIGO 1 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DA QUALIDADE
	SENSORIAL DE CAFÉ CEREJA DESCASCADO E NATURAL NA CHAPADA
	DIAMANTINA-BA 58
	ARTIGO 2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E EFEITOS DAS VARIÁVEIS
	GEOGRÁFICAS NOS CAFÉS DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA UTILIZANDO
	ESPECTROSCOPIA UV-VIS..... 106

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte de um grande projeto de cooperação entre UFLA, UESB e ASSOCIAÇÃO ALIANÇA DOS CAFEICULTORES DA CHAPADA DIAMANTINA, pelo registro de Indicação Geográfica (IG) no território da Chapada Diamantina, Bahia, conferido a produtos ou serviços que são característicos do seu local de origem, através de uma importante política pública que visa proteger e valorizar a cultura do café nessa região com grande interesse e empenho dos cafeicultores na obtenção da concessão de IG, que foi reconhecido no dia 15 de outubro de 2024 através da publicação do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) na Revista da Propriedade Industrial (RPI), o reconhecimento da Indicação Geográfica (IG), na categoria Denominação de Origem (DO), para a região da Chapada Diamantina (BA), como produtora de café. Essa parceria surgiu da necessidade de conhecer sensorial e quimicamente os grãos de cafés da região e, ao mesmo tempo, observou-se a oportunidade de gerar uma nova metodologia através de técnicas geoestatísticas que contribua nos futuros processos e registros de IG, ampliando os estudos de IG já realizados.

Nesse contexto, há uma tendência global por produção e consumo de cafés de alta qualidade, que tem atraído a atenção de muitos consumidores na reconhecida “onda do café” caracterizada por rastrear a origem produtora, padronização e foco na qualidade da bebida do café, que dependem diretamente dos diferentes perfis sensoriais influenciados por características genéticas inerentes às diferentes variedades, localização geográfica agrícola do ambiente de cultivo, práticas agrícolas e técnicas realizadas após a colheita (Borém *et al.*, 2019; Borrella *et al.*, 2015), comprovando que o café é essencialmente um produto de *terroir* (Borém *et al.*, 2019). As características de solo e clima são responsáveis por atributos específicos das frutas do café e, para o reconhecimento da singularidade do produto, as IGs são uma das maneiras para garantir essa qualidade (Mutz *et al.*, 2023).

As IGs são ferramentas coletivas que certificam a qualidade e diferencial dos produtos ou serviços e são divididas em 2 modalidades, indicações de procedência (IP) e denominação de origem (DO). Hoje, são 18 indicações geográficas concedidas pelo INPI para o produto café em grão verde (arábica e robusta). Atualmente há 7 Denominações de Origem, sendo para café robusta Montanhas do Espírito Santo e Matas de Rondônia e, para café arábica há o Cerrado Mineiro, Mantiqueira de Minas, Caparaó, Canastra e Chapada Diamantina (INPI, 2024a) e 11 Indicações de Procedência (listar) (INPI, 2024b).

O mercado global de café está enfatizando cada vez mais a importância das características químicas e de qualidade do café, que exige desenvolvimento de metodologias que possam caracterizar, identificar, distinguir o produto café em cada região e garantir que a designação de qualidade acompanhe a certificação do café (Munyendo *et al.*, 2022).

Segundo Shah *et al.* (2018), entre os métodos analíticos, as técnicas espectroscópicas vêm sendo amplamente utilizadas em diversas áreas de pesquisas, principalmente, em alimentos por serem técnicas ágeis, de baixo custo e com mínimo ou nenhum preparo da amostra, que conforme a literatura são aplicados na classificação da qualidade dos cafés (gourmet vs. tradicional), distinguir a composição entre espécies (arábica e canéfora) e variedades de café, comparação do perfil químico de cafés torrados e armazenados usando as técnicas de espectroscopia de infravermelho próximo (Araújo *et al.*, 2021; Mutz *et al.*, 2023; Simedru e Becze, 2023) e espectrofotometria de ultravioleta-visível (UV-vis) (Simedru e Becze, 2023). Há diversas outras técnicas de espectroscopia relatados na literatura utilizados em café para distinguir genótipos de café verde em grãos, as diferentes regiões e/ou países de produção, confirmar sua qualidade e a autenticação de cafés utilizando espectroscopia de fluorescência e infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (Botelho *et al.*, 2017; Link *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2009), a cromatografia gasosa-espectrometria de massa de tempo de voo e espectroscopia Terahertz (Risticevic *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2021) e a espectroscopia de Raman (Figueiredo *et al.*, 2019). Além de avaliar mudanças químicas decorrentes ao armazenamento dos grãos de café verde e sua associação com depreciação na qualidade sensorial do café utilizando a espectroscopia de Raman e a espectroscopia de RMN H^1 (Abreu *et al.*, 2019; Borém *et al.*, 2023).

Assim, no geral, diferentes técnicas analíticas podem ser utilizadas para as análises de café e são alternativas viáveis quando se tem interesse em obter o perfil químico (fingerprint) das amostras, analisadas através de ferramentas quimiométricas em que constroem modelos de classificação para discriminar ou autenticar amostras de interesse.

A Chapada Diamantina ou também conhecida como Planalto de Diamantina está localizada no estado da Bahia, nordeste brasileiro, cuja produção tem se destacado no cenário nacional pela elevada qualidade e excelência do café arábica, devido às condições de solo e clima particulares da região (Santos *et al.*, 2020), montanhosa com altitude variando entre 400 e 1700 m e clima semiárido (CPRM, 1994), apresenta uma diversidade de vegetação, sendo os campos rupestres e o cerrado os mais característicos, além de fragmentos de Mata Atlântica e savana estépica do bioma Caatinga (Brasil, 2024). Essa macrorregião ainda carece de estudos mais aprofundados para compreender a singularidade do fenômeno da distribuição espacial dos atributos sensoriais envolvidos na qualidade da bebida do café e como esses atributos ocorrem e são dependentes do ambiente geográfico. Diante dessa questão, as técnicas de geoestatísticas podem contribuir ao identificar como a variabilidade espacial, por exemplo, latitude, longitude, altitude e o solo, influenciam na distribuição geográfica das características químicas e sensoriais de alimentos como já explorado na cultura vinífera (Yu *et al.*, 2020; Taylor e Bates, 2013), mas que ainda não há na literatura a aplicação dessas ferramentas nas características sensoriais do café.

As condições particulares de clima, solo e relevo presente em cada região brasileira, associadas às características genéticas das diversas variedades disponíveis, além dos diferentes métodos de cultivo, criam a identidade da bebida que está relacionada ao local de produção, implicando na necessidade de pesquisas inovadoras (Barros *et al.*, 2019), como o uso de modernas técnicas de modelagem geoestatística aplicadas aos resultados da análise sensorial e análises quimiométricas que ampliam a capacidade de entender e interpretar além de discriminar e/ou autenticar amostras de interesse. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar a caracterização química dos grãos de café da Chapada Diamantina, Bahia, utilizando espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível e, analisar as características sensoriais do café dessa região, compreendendo como as variáveis sensoriais se manifestam e se distribuem espacialmente por meio de técnicas de geoestatística. Por fim, o estudo objetiva

propor um método que contribua para um protocolo de implantação de outras Indicações Geográficas (IGs) futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cafeicultura na Bahia e região da Chapada Diamantina

Uma das bebidas mais consumidas em todo o mundo, o café tem grande relevância socioeconômica na agricultura brasileira, sendo cultivado principalmente pela agricultura familiar (Batista *et al.*, 2010; Aparecido *et al.*, 2015; Zelber-Sagi *et al.*, 2015 e Aparecido *et al.*, 2016). Por ser uma das safras mais importantes para a economia brasileira, um amplo conhecimento de todas as etapas de manejo desta cultura é de extrema importância para o sucesso de sua produção (Ferraz *et al.*, 2012).

A cultura cafeeira é bastante difundida no território brasileiro, iniciado na época colonial, se intensificou após a geada de 1974 (Bliska *et al.*, 2009), na busca por regiões menos frias já que essas condições climáticas prejudicam o cafeeiro, que tem sua origem nas florestas tropicais da Etiópia, Quênia e Sudão, em regiões de 1.500-2.800m altitude (Fernandes *et al.*, 2012). Diante desse movimento migratório da cafeicultura pelo Brasil, a partir da década de 1970, essa cultura agrícola se instalou na Bahia e, em alguns municípios influenciou substancialmente seu desenvolvimento econômico. Atualmente são três regiões produtoras consolidadas na Bahia: a do Planalto (dividida em três microrregiões: Chapada Diamantina, Vitória da Conquista e Brejões) produtora mais tradicional e de maior destaque de café arábica; a região Oeste ou Cerrado, região de cerrado produtora de café arábica irrigado, e a Litorânea ou Atlântico com produção predominante de café robusta (Alves *et al.*, 2011; CONAB, 2023).

A Bahia é o único estado do nordeste brasileiro com produção de café, segunda maior região produtora (atrás apenas da região sudeste) e quarto maior estado produtor dessa cultura tanto em área (em hectares) quanto em produção (mil sacas beneficiadas) (CONAB, 2023). A região da Chapada Diamantina é uma importante região agrícola e produtora de café do Estado da Bahia, situada nos contrafortes da Serra Geral, está inserida na zona de

transição, entre os biomas da Caatinga e Mata Atlântica, resultando em cafés de qualidade e excelência elevadas, cultivados nas terras altas baianas, com solo e clima adequados para a produção da espécie *Coffea arabica*, seguindo a tendência de produção de cafés especiais (Santos *et al.*, 2020), com destaque em concursos de qualidade, inclusive com notoriedade internacional.

Diante da grande importância do segmento cafeeiro no estado da Bahia, é essencial o estudo dos cafés especiais produzidos na Chapada Diamantina que está adquirindo visibilidade internacional e recentemente foi aprovada a indicação geográfica na modalidade Denominação de Origem dos cafés da Chapada Diamantina.

2.2 Cafés Especiais

Cafés especiais referem-se a grãos de café de alta qualidade, cultivados em condições específicas, como as regiões geográficas, altitudes elevadas e sob cuidados especiais durante o cultivo, colheita e processamento, que envolve a sustentabilidade, rastreabilidade e certificações, que proporcionam características únicas de sabor e aroma. A ApexBrasil (2023) define cafés especiais como grãos isentos de impurezas e defeitos com atributos sensoriais diferenciados (bebida limpa e doce, corpo e acidez equilibrados, qualificam sua bebida acima dos 80 pontos na análise sensorial), além disso, essa modalidade de café deve ter rastreabilidade certificada e respeitar critérios de sustentabilidade ambiental, econômica e social em todas as etapas de produção.

Os cafés especiais são apreciados por suas notas distintas, que podem variar de acordo com a origem, o tipo de grão e os métodos de processamento, resultando em uma qualidade superior. Logo, há um aumento na demanda por grãos de cafés especiais, que de acordo com a Consórcio Pesquisa Café (EMBRAPA Café, 2018), essa demanda cresce em torno de 15% ao ano, contra o crescimento do café *commodity* em torno de 2%. Do total de exportações brasileiras em café, aproximadamente 10% são cafés especiais, com tendência de crescimento contínuo (BSCA, 2021). Ainda segundo a BSCA (2021), o volume de cafés especiais exportados tem aumentado, com destaque para mercados como Estados Unidos, Europa (especialmente Alemanha e Itália), Ásia (Japão e Coreia do Sul) e Oriente Médio e, o

valor de venda desses cafés pode variar entre 30% e 40% a mais em relação ao café *commodity*, podendo ultrapassar o valor de 100%.

Fatores que impulsionam as exportações de cafés especiais além da alta qualidade dos grãos produzidos há também as certificações e as Indicações Geográficas (IG's), estratégia para agregar valor e acessar novos mercados, tornando possível um acréscimo no faturamento e melhor qualidade de vida (Pereira *et al.*, 2016). No Brasil, há diversas regiões conhecidas e reconhecidas através das IG's pela produção de cafés especiais, como Sul de Minas, Chapada Diamantina, Cerrado Mineiro, entre outras. Além disso, cafeterias e torrefações especializadas costumam oferecer cafés especiais provenientes de IG, com rastreabilidade e segurança de qualidade para os apreciadores da bebida.

2.3 Composição Química do Café

Os cafés possuem uma composição química complexa que incluem mais de 1000 substâncias, com diferentes propriedades químicas e físicas e, influenciam diretamente seus aromas, sabores e qualidade geral (Bagchi *et al.*, 2016). Essa composição é resultado de fatores como a variedade do grão, o *terroir* (conjunto de características ambientais), o processo de cultivo e manejo, colheita e pós-colheita, armazenamento, além do método de preparo (Abreu *et al.*, 2019; Figueiredo *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2019; Caporaso *et al.*, 2018; Tran *et al.*, 2017; Toledo *et al.*, 2017; Toledo *et al.*, 2016; Prete, 1992; Clifford, 1985). Os principais compostos (em ordem de abundância) são os polissacarídeos, lipídios, proteínas, ácidos clorogênicos, minerais e aminoácidos (Durán *et al.*, 2017; Kitzberger *et al.*, 2013; Borém, 2008).

2.3.1 Principais Componentes Químicos do Café

Os principais compostos bioativos encontrados no café incluem polifenóis, ácidos clorogênicos (CGAs), alcalóides, como cafeína e trigonelina e, diterpenos. A variabilidade

desses constituintes químicos determina a qualidade dos produtos de café afetando seu preço (Di Stefano *et al.*, 2023; Rubayiza e Meurens, 2005; Sunarharum *et al.*, 2014).

O café possui diferentes tipos de ácidos responsáveis por contribuir no sabor, aroma e acidez da bebida, com destaque aos ácidos clorogênicos, ácido quínico, ácido cítrico e ácido málico (Ribeiro, 2017). Os ácidos clorogênicos são uma classe de compostos provenientes da esterificação do ácido quínico com outros ácidos, como ácido caféico, ferúlico e p-cumárico. Os principais produtos obtidos dessa reação que são encontrados, majoritariamente, nos grãos de cafés são ácidos cafeoilquínicos e dicafeoilquínicos (Toci, 2006). O café é um dos alimentos com maiores níveis de AGCs, compostos antioxidantes que têm sido associados a diversos benefícios para a saúde, com concentrações variando de 5,5 a 8,0 g por 100 g⁻¹ (Rubayiza e Meurens, 2005; Sunarharum *et al.*, 2014).

Além dos ácidos clorogênicos, a cafeína e trigonelina são importantes compostos na qualidade da bebida do café. A trigonelina (1-metilpiridin-1-*io*-3-carboxilato), importante composto na formação do sabor e aroma da bebida de café, é encontrada principalmente em cafés da espécie arábica (Braga, 2019), sua concentração nos grãos crus varia de 0,96 a 1,19 g por 100 g⁻¹ (Durán *et al.*, 2017) e, dependendo do grau de torra aplicado nos grãos de café esse composto é quase totalmente degradado, produzindo uma série de compostos voláteis, juntamente com a niacina (vitamina B₃), tornando o café um dos poucos alimentos cujo valor nutricional pode aumentar após o processamento térmico (Moreira *et al.*, 2000).

A cafeína (3,7-di-hidro-1,3,7-trimetil-1H-purina-2,6-diona), entre os alcalóides presentes no café, merece destaque por ser o composto mais importante, que apresenta alta atividade antioxidante (Santos *et al.*, 2015) e sua concentração varia de 1,28 a 1,52 g por 100 g⁻¹ no café Arábica (Durán *et al.*, 2017), sendo encontrada em maiores teores nos cafés da espécie *Coffea canephora*. Por ser termicamente estável, a cafeína é um dos principais fatores responsáveis pelo amargor da bebida (Canzi *et al.*, 2023; Braga, 2019).

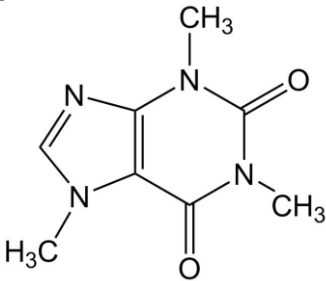
Os ácidos clorogênicos, aminoácidos, carboidratos e lipídeos atuam como precursores dos compostos voláteis formados após o processo de torra, originando características organolépticas distintas que determinam a qualidade final da bebida (Toledo *et al.*, 2017). Existem aproximadamente mil compostos voláteis relatados tanto para o café verde quanto para torrado (Buffo & Cardelli-Freire, 2004; Flament, 1989; Maria *et al.*, 1999;

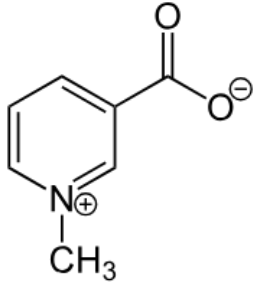
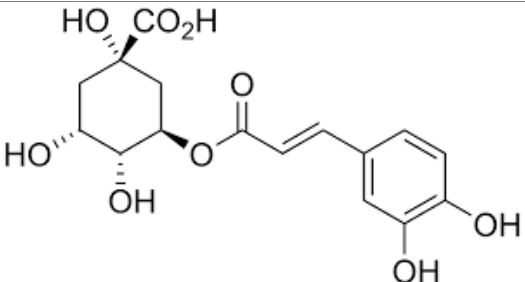
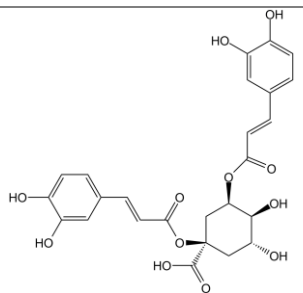
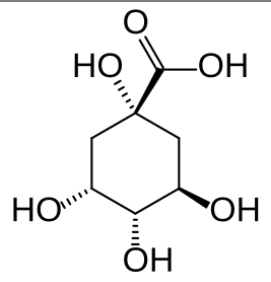
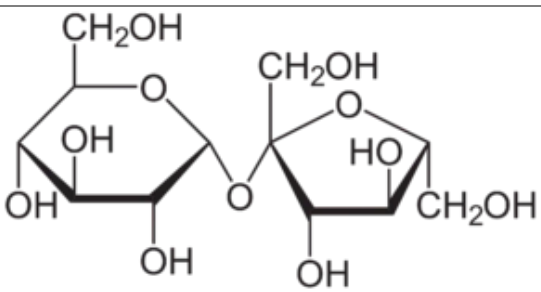
Moreira *et al.*, 2000), porém, pelo menos, 30 compostos voláteis são relatados como essenciais na percepção do aroma de café torrado (Czerny & Grosch, 2000; Czerny *et al.*, 1999). O aroma contribui para a qualidade do café, permite diferenciar cafés de diferentes origens geográficas e discriminar grãos de café Arábica de café robusta (Caporaso *et al.*, 2018), assim, é importante compreender que a intensidade do aroma e sua caracterização são atribuídas à diversidade e concentração dos compostos químicos, bem como à interação entre eles (Moreira *et al.*, 2000; Toledo *et al.*, 2016). Entre os compostos voláteis do café torrado a 2-metilpirazina e a piridina foram relatadas como os compostos mais eficazes para a discriminação das origens geográficas do café, explicando 97,3% da variância (Toledo *et al.*, 2017).

A composição química dos grãos de café arábica apresenta maior quantidade de açúcares, sendo a sacarose o açúcar encontrado em maiores teores, resultando em maior acidez após a torra e na formação de furanos responsáveis pelos atributos que remetem a doçura e caramelo na bebida, considerados importantes na caracterização química e qualidade sensorial dos cafés (Caporaso *et al.*, 2018; Borém *et al.* (2016). A identidade de um café não é somente descrita pela origem botânica, mas também se refere a origem geográfica e as condições ambientais, dessa forma são necessários métodos que auxiliem na obtenção de informações sobre o perfil químico para discriminar os cafés (Rubayiza e Meurens, 2005).

Na Tabela 1, estão apresentados os principais compostos encontrados no café e sua estrutura química.

Tabela 1 - Estruturas químicas dos principais compostos presentes nos cafés.

Composto	Fórmula Química	Estrutura
Cafeína	$C_8H_{10}N_4O_2$	

Trigonelina	$C_7H_7NO_2$	
Ácido 5-cafeoilquínico	$C_{16}H_{18}O_9$	
Ácido 1,5-dicafeoilquínico	$C_{25}H_{24}O_{12}$	
Ácido quínico	$C_7H_{12}O_6$	
Sacarose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	

Fonte: Próprio autor (2025).

2.4 Indicação Geográfica

Nas últimas duas décadas houve um drástico crescimento global por mercados agroalimentares "éticos", preocupados com a segurança alimentar e a procedência social, ambiental e geográfica (Bidwell *et al.*, 2015), surgindo as indicações geográficas (IG's), que são um instrumento de propriedade industrial que busca distinguir a origem geográfica de um determinado produto ou serviço" (INPI, 2021). Segundo a Organização Mundial do Comércio (OMC, 1994), Indicações Geográficas serão definidas como “aquelas que identificam que um produto é originário do território de um Membro ou de uma região ou localidade desse território, quando determinada qualidade, reputação, ou outra característica do produto é principalmente atribuível a sua origem geográfica”.

Observa diversas indicações geográficas para os mais variados produtos, incluindo: Scotch, Roquefort, Champagne, Parmigiano, Cognac, Queijo Feta, Kona, Vidalia, Porto e Bourbon. Entre os mais conhecidos estão: Chá do Ceilão, Bife dos Pampas, Tequila Mexicana, Arroz indiano Basmati, Chá preto Darjeeling da Índia, Café Blue Mountain (Jamaica), Pimenta preta – Tellicherry (Índia) e Café da Colômbia (Giovannucci, 2008).

O Brasil possui diversas Indicações Geográficas (IGs) relacionadas à produção de café, reconhecendo regiões específicas pela qualidade e características únicas de seus grãos. Essas IGs são concedidas pelo INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) conforme disposto na Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996 — Lei da Propriedade Industrial, a qual regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial, e são divididas em duas categorias, a Indicação de Procedência (IP) e a Denominação de Origem (DO) (BRASIL, 1996):

Art. 177. Considera-se indicação de procedência o nome geográfico de país, cidade, região ou localidade de seu território, que se tenha tornado conhecido como centro de extração, produção ou fabricação de determinado produto ou de prestação de determinado serviço.

Art. 178. Considera-se denominação de origem o nome geográfico de país, cidade, região ou localidade de seu território, que designe produto ou serviço cujas qualidades ou características se devam exclusiva ou essencialmente ao meio geográfico, incluídos fatores naturais e humanos.

Compreende-se assim, que a função da IP é proteger o nome geográfico que se tornou conhecido por causa de um produto ou serviço, no entanto a DO tem maior amplitude ao presumir que as qualidades ou características de um determinado local (área geográfica), acrescentando fatores naturais e humanos, influenciam diretamente no produto ou serviço, tornando-o “típico” dessa região (INPI, 2021).

Para o produto café em grão verde (arábica e robusta), o INPI já concedeu 18 indicações geográficas, sendo 7 Denominações de Origem: para café robusta há Montanhas do Espírito Santo e Matas de Rondônia, ambas reconhecidas em 2021. Para o café arábica há o Cerrado Mineiro (concedido em 2013), Mantiqueira de Minas (certificado em 2020), Caparaó (2021), Canastra (2023) e Chapada Diamantina reconhecida recentemente (2024). As Indicações de Procedência reconhecidas são Região do Cerrado Mineiro em 2005, Região da Alta Mogiana - 2013, Região do Norte Pioneiro do Paraná - 2012, Região de Pinhal desde 2016, Região Oeste da Bahia – 2019, Campo das Vertentes e Matas de Minas – 2020, Região de Garça – 2022, Região do Sudoeste de Minas em 2023 e Vale da Gramma - 2024 e, para café conilon há Cafés do Estado do Espírito Santo concedido em 2021. (INPI, 2024b).

A Indicação Geográfica, por reconhecer uma região ou localização geográfica, é uma propriedade intelectual coletiva que faz uma ligação direta entre as características e qualidade distintas de um produto e sua localização de origem geográfica (Neilson *et al.*, 2018), assim, é uma das estratégias de rastreabilidade de origem, além de proteger a singularidade do café e sua cultura (Vellema *et al.*, 2015; Schüßler, 2009). Como resultado, a IG gera credibilidade e diferenciação do produto, com isso, espera-se que os produtores possam obter melhor e fácil acesso a mercados especializados ou de nicho, tendo a oportunidade de fornecer e aumentar suas vendas a preços mais elevados, estimulando o desenvolvimento rural e redução da pobreza (Neilson *et al.*, 2018).

2.4.1 Denominação de Origem da Chapada Diamantina

A Denominação de Origem (DO) do café da Chapada Diamantina (Figura 1), reconhecida no dia 15 de outubro 2024, é um marco importante para a valorização da produção local. Essa certificação, concedida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(INPI), reconhece oficialmente os atributos únicos dos cafés produzidos na região, que incluem características sensoriais e ambientais exclusivas, como sua diversidade ambiental, que é explicada pela combinação de diversos fatores ambientais como altitude, formação geológica, clima, pluviosidade e seus tipos de solos (Rocha *et al.*, 2005).

O relevo é montanhoso, acidentado, com vales encaixados e elevações que ultrapassam 1800 m (Nascimento *et al.*, 2010). Constitui uma vasta área sobre um altiplano, de relevo suave com escarpas e vales, abrangendo as bacias dos rios Paraguaçu e das Contas, com drenagem voltada para o leste (Sarmiento *et al.*, 2023), sendo um local de diversidade florística elevada, associada à presença de variados tipos de vegetação que incluem cerrados, florestas ombrófilas e estacionais, caatingas e campos rupestres (Harley, 1995; Funch *et al.* 2009). Nos maciços e serras altas, os solos são em geral rasos, pedregosos e pobres, predominando os Neossolos Litólicos (rasos, pedregosos e de fertilidade baixa) e grandes afloramentos de rocha. Nos topos planos, os solos são em geral mais profundos e muito pobres, com predominância de Latossolos profundos, bem drenados, ácidos e de fertilidade baixa (Nolasco *et al.* 2008). As médias anuais são inferiores a 22°C, com temperaturas mais baixas no inverno (Nascimento *et al.*, 2010) e as chuvas têm um máximo no verão (novembro, dezembro e janeiro) e um pico secundário em março-abril; de agosto a novembro as chuvas diminuem, formando a estação seca (Harley, 1995).

Figura 1. Selo da Chapada Diamantina reconhecido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial.



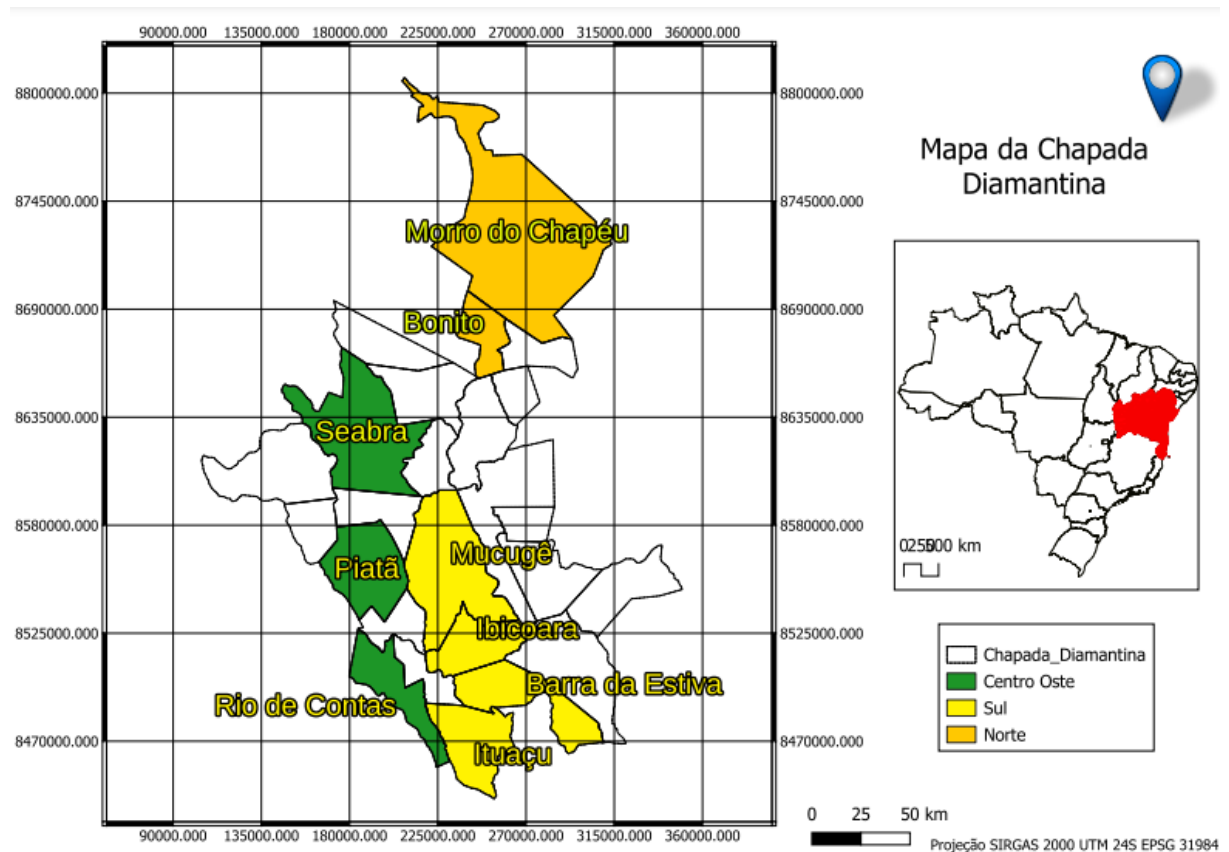
Fonte: Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2024a.

A Denominação de Origem contemplam 24 municípios inseridos na Mesorregião Centro Sul Baiano, sendo eles: Abaíra, Andaraí, Barra da Estiva, Boninal, Bonito, Ibicoara, Ibitiara, Iramaia, Iraquara, Itaeté, Jussiapé, Lençóis, Marcionílio Souza, Morro do Chapéu, Mucugê, Nova Redenção, Novo Horizonte, Palmeiras, Piatã, Rio de Contas, Seabra, Souto Soares, Utinga e Wagner (INPI, 2024a), nos quais a cafeicultura é cultivada em 9 desses municípios, desde Ituaçu, na divisão regional Sul, seguindo por Barra da Estiva, Ibicoara, Mucugê, Rio de Contas, Piatã, Seabra, Bonito, até o território de Morro do Chapéu, na divisão regional Norte, localizados entre as coordenadas geográficas em UTM 8825708 e 8426813 sul e 348931 e 89726 oeste, conforme figura 2.

De acordo com a Associação Brasileira de Cafés Especiais (BSCA, 2023), a região da Chapada Diamantina possui características ideais para o cultivo do arábica e, muitas propriedades realizam a colheita seletiva do café (colheita apenas dos grãos maduros), durante o inverno chuvoso, que exige maior atenção dos produtores na hora da secagem. Além disso, outro fator importante para a obtenção de qualidade e para o sucesso da agricultura familiar, predominante no estado, foi a organização dos agricultores com a criação de cooperativas e associações. Seguindo a classificação realizada pela BSCA (2023), o café dessa região é encorpado e aveludado, adocicado, com acidez cítrica, notas de nozes, chocolate e final

prolongado e, as cidades já premiadas em concurso de qualidade são Piatã, Mucugê e Ibicoara.

Figura 2. Localização dos municípios produtores de café da Chapada Diamantina – BA integrantes da indicação geográfica.



Fonte: Próprio autor (2025).

2.5 Análise Sensorial

O interesse crescente no sabor do café desempenha um papel importante na comercialização desse produto (Santanatoglia *et al.*, 2023), realizado através da análise sensorial, que é uma ciência científica usada para medir, analisar e interpretar as reações frente às características dos alimentos percebidas pelos cinco sentidos humanos: visão, olfato, audição, tato e paladar (De Sá, 2021), sendo o método mais utilizado para a caracterização da

qualidade de bebida do café, em vista da complexidade dos fatores que envolvem a manifestação de aromas e sabores na bebida (Figueiredo, 2013).

No café, a avaliação sensorial é realizada utilizando principalmente o paladar, o olfato e o tato (Figueiredo, 2013). Especialmente, o paladar e o olfato estão intimamente ligados à apreciação do alimento, que envolve características próprias (tais como aparência, sabor e textura) interagindo com as condições fisiológicas, psicológicas, sociológicas e culturais de cada indivíduo (De Sá, 2021). A metodologia difundida e utilizada na indústria do café especial, as propriedades sensoriais são avaliadas através do método da xícara proposto inicialmente em 1984 pela Specialty Coffee Association of America (SCAA) através de um protocolo detalhado e padrão, adaptável às necessidades de padronização dos produtores, para a definição da qualidade sensorial do café (SCA, 2024). O *Coffee Cupper's Handbook* proposto por Lingle (2011), dentre as metodologias disponíveis para análise sensorial do café, considera-se a mais adequada para cafés especiais onde há protocolos e procedimentos, em todas as etapas do preparo e análise do café, desde o preparo das amostras até a qualidade da água a ser utilizada na escaldadura, é adotada pela SCAA e em qualquer outro lugar do mundo que trabalhe com café especial e, considera cafés especiais aqueles com nota final igual ou acima de 80 pontos. Isso ajudou a transformar o trabalho de degustação, com base na experiência do provador, em uma ciência para maximizar o nível de padronização do método (Lingle e Menon, 2017).

Nesta análise, os participantes do painel são degustadores devidamente treinados e habilitados pela SCAA, denominados juízes certificados (SCAA certified cupping judges), os quais são submetidos a treinamentos específicos para a comprovação da percepção sensorial e, assim, usam o protocolo estabelecido pela Specialty Coffee Association (SCA) e suas sensibilidades gustativas para atribuir uma pontuação aos atributos sensoriais (fragrância/aroma, uniformidade, ausência de defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, retrogosto, equilíbrio, defeitos e Pontuação final ou global) (SCA, 2024; Lingle 2011). Esses juízes certificados são periodicamente calibrados para aferição e/ou aprimoramento das suas habilidades sensoriais, especialmente as olfativas e as gustativas, aumentando a representatividade da análise sensorial realizada por essa metodologia. Além da qualidade da xícara, essa análise permite a identificação de uma série de nuances de aroma/sabor, como

caramelo, chocolate, frutado, floral, cítrico e especiarias. Essas informações são de grande importância para os mercados de café que buscam explorar novos nichos e alcançar os consumidores com preferências por nuances específicas do café a ser consumido (Lingle 2011).

A avaliação do sabor e aroma do café é um passo fundamental em toda a cadeia de produção de café, desde a seleção da matéria-prima até a criação dos *blends* (Santanatoglia *et al.*, 2023). Nos últimos anos, juntamente com a análise sensorial, diferentes técnicas analíticas foram usadas para avaliar a qualidade e integridade dos alimentos, incluindo as bebidas de café e o grão do café (Hutachok *et al.*, 2021; Vezzulli *et al.*, 2022; Caldeira *et al.*, 2024). Isso para evitar adulterações e fraudes em alimentos com alto valor agregado, como o café e também evidenciar as regiões produtoras de café protegidas pela indicação geográfica (Caldeira *et al.*, 2024).

2.6 Espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis)

A análise espectroscópica explora a interação entre ondas eletromagnéticas e moléculas orgânicas. O uso de sensores baseados em espectroscopia molecular é amplamente reconhecido na comunidade analítica devido à capacidade de monitorar, em tempo real e simultaneamente, múltiplas variáveis químicas ou compostos durante análises de rotina e de processo, especialmente, em amostras de alimentos (Claben *et al.*, 2017).

Tanto a espectroscopia atômica quanto a molecular são técnicas predominantes na análise de alimentos, baseadas na interação entre luz e matéria, resultando na absorção, emissão ou espalhamento da radiação eletromagnética incidente. A espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis) emerge como uma alternativa às técnicas cromatográficas, fornecendo procedimentos de medição simplificados que são eficazes em termos de tempo e custo (Adnan *et al.*, 2020). Esta técnica apresenta diversas vantagens, como a capacidade de monitorar várias variáveis (ou compostos) simultaneamente, pré-processamento mínimo ou nenhum pré-processamento da amostra antes da análise, baixo custo, ausência de reagentes e potencial uso de fibra óptica para controle remoto do processo (Biechele *et al.*, 2015).

A espectroscopia UV-Vis permite monitorar e medir as interações da luz UV e visível com diferentes compostos químicos na faixa de comprimento de onda entre 200 e 780 nm. Esta técnica explora diferentes respostas físicas de luz e analitos dentro da amostra, como absorção, espalhamento, difração, refração e reflexão. O fenômeno de absorção de luz UV e visível é específico para cromóforos e diversas espécies químicas com grupos funcionais moleculares definidos, permitindo a obtenção de espectros de absorção característicos para moléculas individuais (Claben *et al.*, 2017). A análise quantitativa baseada na espectroscopia UV-Vis é descrita pela lei de Beer-Lambert, correlacionando a quantidade de luz incidente absorvida pela molécula com a concentração do composto absorvente na matriz (Power *et al.*, 2019).

Com o desenvolvimento contínuo da instrumentação, os espectrofotômetros UV-Vis modernos equipados com detectores portáteis de fibra óptica oferecem capacidades analíticas aprimoradas, sendo altamente sensíveis e, capazes de detectar baixas concentrações de analitos em matrizes complexas e eficientes na obtenção rápida de espectros completos de uma amostra (Claben *et al.*, 2017; Power *et al.*, 2019).

O uso da espectroscopia UV-Vis em combinação com fluorescência tem sido aplicado para quantificar concentrações de *Coffea arabica* e robusta torrada em diferentes blends de café, contribuindo para a redução da fraude alimentar e a proteção dos interesses dos consumidores (Dankowska *et al.*, 2017). Além disso, esta técnica tem sido empregada na identificação de adulterações em cafés especiais, demonstrando-se eficaz para tal propósito (Caldeira *et al.*, 2024).

Adnan *et al.* (2020) investigaram a determinação dos conteúdos de cafeína e ácido clorogênico por meio da espectroscopia UV-Vis, alcançando uma precisão de 97% em comparação com a precisão da espectroscopia NIR por comprimentos de onda selecionados de LDA (95%).

2.7 Quimiometria

O termo "quimiometria" fez sua primeira aparição na literatura na década de 1970, quando foi traduzido para o inglês a partir do termo sueco "kemometri" (Aleixandre-Tudó *et al.*, 2022). Uma das definições mais amplamente aceitas de quimiometria é:

“A quimiométrica é a disciplina química que utiliza métodos matemáticos, estatísticos e outros métodos que empregam lógica formal para projetar ou selecionar procedimentos e experimentos de medição ideais e para fornecer o máximo de informações químicas relevantes por meio da análise de dados químicos” (Massart *et al.*, 1988) 4.

Os métodos quimiométricos modernos são abordagens de análise multivariada que permitem o tratamento de conjuntos de dados multidimensionais e complexos, às vezes com diferenças sutis entre todos os conjuntos de dados, revelando propriedades que são importantes através de suas várias interferências e interações em toda a matriz alimentar. Métodos multivariados podem ser aplicados tanto em análises qualitativas quanto quantitativas, permitindo que informações relevantes sejam extraídas de dados complexos, permitindo a criação de modelos empíricos que possam ser utilizados para a realização de estudos exploratórios e descrevendo características importantes das amostras ou análises preditivas em novas amostras (Kemsley *et al.*, 2019).

As ferramentas utilizadas na quimiometria podem ser categorizadas em dois tipos distintos de métodos para reconhecimento de padrões: não supervisionados e supervisionados. Entre as ferramentas mais comumente empregadas para o reconhecimento de padrões não supervisionados, destacam-se a Análise de Cluster (AC), a Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA). Estas ferramentas revelam agrupamentos sem a necessidade de especificar previamente o número ou tipo de classes. Os resultados geralmente são apresentados por meio de representações gráficas que ilustram a distribuição das amostras em clusters (Callao; Ruisánchez, 2018).

Por outro lado, os modelos supervisionados, também conhecidos como modelos de classificação, têm como objetivo identificar padrões desconhecidos como pertencentes a classes predefinidas. Estes modelos buscam encontrar padrões matemáticos capazes de reconhecer amostras como membros de classes específicas, atribuindo-lhes rótulos correspondentes. Assim, novas amostras desconhecidas podem ser individualmente classificadas com base nessas classes conhecidas, dependendo dos resultados experimentais.

Exemplos desses métodos incluem a Análise Discriminante Linear (LDA), a Análise Discriminante de Fisher (FDA), a Análise Discriminante Quadrática (QDA), a Análise Discriminante Regularizada (RDA), o *k-Nearest Neighbor* (KNN), a *Support Vector Machine* (SVM) e a Análise Discriminante de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA). Além disso, diversos modelos prognósticos multivariados têm sido empregados, tais como a Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e as Redes Neurais Artificiais (RNA) (Márquez *et al.*, 2016).

Assim, a quimiometria assume uma relevância inegável na interpretação e na extração de informações relevantes de técnicas analíticas, principalmente em alimentos, incluindo o café, por terem uma matriz muito complexa com um alto número de componentes. As técnicas como a espectroscopia infravermelho, espectrometria de massa, espectroscopia UV-Vis e espectroscopia Raman, proporcionam vastos conjuntos de dados complexos, destacando-se a importância da quimiometria no processo de análise e extração de resultados significativos (Mendes; Duarte, 2021; Aleixandre-Tudó *et al.*, 2022).

Na espectroscopia infravermelho, por exemplo, a quimiometria é empregada para identificar padrões espectrais específicos associados a diferentes compostos ou características químicas de uma amostra. Por meio de técnicas como análise de componentes principais (PCA) ou análise discriminante linear (LDA), a quimiometria auxilia na diferenciação entre amostras com composições químicas distintas ou na identificação da presença de impurezas (Munyendo *et al.*, 2021). Estudos recentes, como o de Mendes e Duarte (2021), destacam a aplicação da espectroscopia MIR em conjunto com diferentes ferramentas quimiométricas para abordar questões de qualidade, autenticidade e adulteração de cafés.

Da mesma forma, na espectrometria de massa, a quimiometria desempenha um papel crucial na interpretação de padrões complexos de fragmentação molecular. Ela é utilizada para identificar biomarcadores específicos ou padrões moleculares associados a diferentes condições ou fenótipos biológicos. Além disso, a quimiometria é essencial na análise de grandes conjuntos de dados gerados pela espectrometria de massa de alta resolução, permitindo a identificação de padrões sutis e correlações entre diferentes variáveis (Munyendo *et al.*, 2022). Estudos como o de Tsai *et al.* (2023) têm utilizado métodos

quimiométricos para analisar diretamente grãos de café individuais através da espectrometria de massa (MS), buscando obter resultados mais eficientes e precisos.

Na espectroscopia UV-Vis, a quimiometria é frequentemente empregada para a análise quantitativa de compostos em solução, utilizando a lei de Beer-Lambert para correlacionar a absorção de luz com a concentração do analito. Métodos como regressão linear e calibração multivariada são comumente aplicados para construir modelos de calibração robustos e precisos (Munyendo *et al.*, 2022). Pesquisas, como a realizada por Quan *et al.* (2023), concentram-se na aplicação da espectroscopia UV-Vis combinada com modelos de mínimos quadrados parciais com análise discriminante (PLS-DA) para autenticar grãos de café verde vietnamita.

2.8 Análise de Componentes Principais - PCA

A Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) é uma das técnicas mais antigas e amplamente reconhecidas na análise de dados multivariados. Originalmente introduzida por Pearson (1901) e posteriormente desenvolvida de forma independente por Hotelling (1933), essa abordagem só ganhou popularidade com o avanço dos computadores eletrônicos. Atualmente, está consolidada em praticamente todos os softwares estatísticos (Mishra *et al.*, 2017).

A PCA é uma técnica matemática sofisticada que transforma um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um número menor de variáveis chamadas de componentes principais. Neste contexto da análise de dados multivariados, seu uso abrange diversas outras áreas. A PCA é considerada uma das técnicas de análise mais relevantes da álgebra linear aplicada, sendo frequentemente utilizada como etapa inicial na análise de grandes conjuntos de dados. Outras aplicações comuns incluem redução de ruído em sinais, separação de fontes independentes e compressão de dados (Shlens, 2005).

Por definição a Análise de Componentes Principais (PCA) tem como principal objetivo reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados composto por um grande número de variáveis inter-relacionadas, preservando ao máximo a variabilidade contida nesses dados. Isso é feito por meio da transformação das variáveis originais em um novo conjunto de

variáveis, as componentes principais (PCs), que são mutuamente não correlacionados (Shlens, 2005). Esses componentes são ordenados de maneira que os primeiros capturem a maior parte da variação presente nas variáveis originais (Nunes *et al.*, 2012).

De maneira geral, a PCA realiza uma transformação no espaço vetorial para reduzir a dimensionalidade de grandes conjuntos de dados. Por meio de projeções matemáticas, o conjunto original de variáveis, frequentemente composto por muitas dimensões, pode ser representado por um número reduzido de componentes principais.

O cálculo dos componentes principais envolve resolver um problema de autovalores e autovetores para uma matriz simétrica positiva semidefinida. Embora os fundamentos matemáticos e o cálculo sejam relativamente diretos, a PCA apresenta uma ampla gama de aplicações e pode ser derivada de várias maneiras, destacando sua versatilidade e relevância na análise de dados complexos (Mishra *et al.*, 2017).

2.9 Estatística Espacial e Geoestatística

A estatística espacial é um campo da estatística que se dedica ao estudo de dados que possuem uma estrutura espacial, ou seja, dados cujas observações estão localizadas em determinados pontos ou regiões no espaço R^2 e R^3 .

Ao contrário da estatística tradicional que parte da suposição que as variáveis aleatórias são independentes, na estatística espacial os dados, frequentemente, exibem dependência espacial, ou seja, as observações em localidades próximas tendem a ser mais semelhantes do que aquelas em locais distantes. Os métodos da estatística espacial consideram de forma explícita, na análise, a dependência dos dados.

Diferentes tipos de dados espaciais requerem diferentes métodos da estatística espacial para analisá-los. Cressie (1993) separa esses métodos estatísticos em três grandes grupos, dependendo da natureza estocástica das observações: São eles: dados de configurações pontuais, dados de áreas e dados de superfícies contínuas (geoestatística).

Dados pontuais surgem quando o interesse está nas próprias localizações dos eventos, como no estudo da distribuição de casos de doenças ou espécies nativas de árvores. Neste caso, a estatística espacial é usada para identificar, caracterizar e modelar padrões

espaciais dos eventos distribuídos no espaço. Existem três tipos principais de padrões: Padrão aleatório, onde os eventos estão distribuídos de maneira imprevisível, sem qualquer padrão aparente; Padrão agregado, onde os eventos se agrupam em áreas específicas, formando agrupamentos e o padrão regular onde os eventos são distribuídos de maneira uniforme no espaço. Métodos que utilizam as funções F, G e K de Ripley são comumente utilizados para detectar esses padrões (Scalon, 2024).

Dados de áreas são dados indexados a sub-regiões que constituem uma partição da região de estudo como, por exemplo, dados obtidos a partir da contagem de eventos (ex. casos de dengue) que ocorre em municípios de um estado. Um importante conceito na análise de dados de área é a autocorrelação espacial. Se os valores observados em áreas próximas tendem a ser semelhantes, diz-se que há uma autocorrelação espacial positiva. Caso contrário, se os valores em áreas próximas forem diferentes, há uma autocorrelação negativa. O índice de Moran é um dos métodos mais utilizados para medir a autocorrelação espacial. Modelos de regressão espacial são freqüentemente usados para analisar a relação entre variáveis em diferentes áreas, incorporando a dependência espacial nas equações de regressão. Entre os mais comuns, destacam-se os modelos autoregressivo simultâneo (SAR) e de erro espacial (CAR) conforme pode ser visto em Cressie (1993) e Scalon (2024).

Dados geoestatísticos (ou de superfície contínua) são obrigatoriamente obtidos a partir de uma amostra de elementos retirada dentro de uma região de estudo. Assume-se que é possível obter os dados em qualquer local da superfície contínua e que esses apresentam dependência espacial (ex. pH do solo). A geoestatística faz uso de métodos específicos para caracterizar e modelar essa dependência espacial, sendo o variograma (e/ou semivariograma) e a krigagem as mais importantes. O variograma descreve a variabilidade espacial das observações em função da distância e, portanto, é usado para entender como a variabilidade das variáveis diminui à medida que a distância entre os pontos aumenta. A krigagem é um método de interpolação espacial que permite estimar os valores de uma variável aleatória em locais não amostrados com base nos valores observados e na dependência espacial entre eles. Assim, a krigagem leva em conta a estrutura espacial dos dados, modelada pelo semivariogram, para produzir previsões ponderadas, não tendenciosas e de variância mínima

(Scalon, 2024). Outro interpolador muito utilizado é o inverso do quadrado da distância que não utiliza a estrutura espacial dos dados modelada pelo variograma (Yamamoto, 2020).

Métodos geoestatísticos tem sido utilizados como indicadores de qualidade da uva através do teor de antocianinas para implementar uma nova tecnologia no processo de colheita (Sethuramasamyraja *et al.*, 2010); colheita diferenciada dentro da vinha (Santos *et al.*, 2012); a efeitos em cascata na química da baga e consequentemente do vinho afetado pelo status da água da planta devido ao efeito da Condutividade Elétrica do solo nos sistemas de vinha (Yu *et al.*, 2020). Em outras frutíferas há estudos no mapeamento da produtividade das pereiras em função do estado nutricional do solo no pomar (Konopatzki *et al.*, 2012); mapeamento das características de qualidade dos frutos em pomares de damasco, kiwi e maçã (Panagopoulos *et al.*, 2006; Aggelopoulou *et al.*, 2009; Panagopoulos e Antunes, 2011); e também o desenvolvimento do CitrusYield, ferramenta de gestão visual de uma empresa para monitorizar a produção e a qualidade das laranjas e tangerinas, atribuindo, na colheita, categorias em termos de cor e tamanho em mapas georreferenciados (González-González *et al.*, 2020). Além disso, a geoestatística e o SIG também têm sido utilizados para determinar as áreas mais adequadas para o plantio de frutas cítricas (Wu *et al.*, 2011; Zabihi *et al.*, 2015), para determinar a distribuição espacial de pragas e o controle de doenças em diversas cultivares de citrus (Farias *et al.*, 2004; Cohen *et al.*, 2008) e mapear sua sensibilidade ao estresse por congelamento (Zabihi *et al.*, 2016). A geoestatística também foi utilizada no gerenciamento de pomares específicos com o objetivo de otimizar a data ideal de colheita de “Citrinos de Algarve” (frutas cítricas geográficas protegidas - IGP), onde avaliou-se a variabilidade de amadurecimento através de atributos de qualidade interna (conteúdo de suco, teor de sólidos solúveis e índice de maturação) em diferentes condições edafoclimáticas (Cavaco *et al.*, 2021).

Os estudos acima mostram que a geoestatística tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o tratamento de dados espaciais, oferecendo métodos robustos e eficientes para avaliar de forma eficaz as condições edafoclimáticas para garantir a qualidade final do produto.

Estudos focados na caracterização da distribuição espacial e temporal da qualidade de produtos agrícolas, que se baseiam na descrição das propriedades sensoriais e sua

variabilidade espacial, requerem a adoção de métodos mais específicos e complementares como é o caso dos métodos geoestatísticos (Borém *et al.*, 2019).

Teoricamente, o café pode ser plantado em qualquer lugar e, portanto, os dados de caracterização sensorial e química dos frutos também podem ser obtidos em qualquer lugar. Entretanto, todo o conhecimento dessas características é obtido a partir de algumas amostras retiradas dentro da região de estudo. Como o objetivo é prever os valores dessas características em locais não amostrados com base nos valores observados e na dependência espacial entre eles e, assim, obter um mapa de predição dessas características para toda a região de estudo (Chapada Diamantina), esta tese defende o uso dos métodos geoestatísticos para análise de dados de propriedades sensoriais e químicas de café.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. F.; BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, L. F. C.; ALMEIDA, M. R.; ALVES, A. P. C. (2019) Raman spectroscopy: A new strategy for monitoring the quality of green coffee beans during storage. Food Chemistry, 287, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.019>.
- ADNAN, A. et al. Reliable discrimination of green coffee beans species: A comparison of UV-Vis-based determination of caffeine and chlorogenic acid with non-targeted near-infrared spectroscopy. Foods, v. 9, n. 6, p. 788, 2020.

AGGELOPOULOU, K. D. et al. Spatial variation in yield and quality in a small apple orchard. *Precision Agric.* 11, 538–556, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9146-9>.

ALEIXANDRE-TUDÓ, J. L. et al. Chemometrics in food science and technology: A bibliometric study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 222, p. 104514, 2022.

ALVES, H. M. R.; VOLPATO, M. M. L.; VIEIRA, T. G. C.; BORÉM, F. M.; BARBOSA, J. N. Características ambientais e qualidade da bebida dos cafés do estado de Minas Gerais. *Produção de café: opção pela qualidade. Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p.1 - 12, mar./abr. 2011.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; LAMPARELLI, R. A. C.; SOUZA, P. S.; SANTOS, E. R. Agrometeorological models for forecasting coffee yield. *Agronomy Journal*, Madison, v. 109, p.249-258, 2016. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2016.03.0166>

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; SOUZA, P. S. Sensitivity of newly transplanted coffee plants to climatic conditions at altitudes of Minas Gerais, Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, v. 9, n. 2, p. 160-167, 2015.

APEX BRASIL - Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos. Brazil. The Coffee Nation. Disponível em: < <https://apexbrasil.com.br/br/pt/solucoes/todas-as-solucoes/projeto-setorial/brazil--the-coffee-nation.html>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2023.

ARAÚJO, T. K. L.; NÓBREGA, R. O.; FERNANDES, D. D. DE S.; ARAÚJO, M. C. U.; DINIZ, P. H. G. D.; SILVA, E. C. (2021). Non-destructive authentication of gourmet ground roasted coffees using NIR spectroscopy and digital images. *Food Chemistry*, v. 364, n. 1. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130452>.

BAGCHI, D.; MORIYAMA, H.; SWAROOP, A. (Ed.). Green coffee bean extract in human health. CRC Press, 2016.

BARROS, A. C.; TAGLIARINI, S. R. N.; GARCIA, Y. M.; MINHONI, R. T. A.; BARROS, Z. X.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento da aptidão agrícola das terras por meio de análise multicritério. *Rev. de Ciências Agrárias*, vol.42, n. 2, Lisboa, 2019. <http://dx.doi.org/10.19084/rca.17293>.

BATISTA, L. A.; GUIMARÃES, R. J.; PEREIRA, F. J.; CARVALHO, G. R.; CASTRO, E. M. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.

BIDWELL, S., MURRAY, W. E. & OVERTON, J. The rise of ethical value chains in a globalising world: An overview of fair trade, organics and geographical indications with an emphasis on Latin America. Marsden Working Paper Series No. 1. Victoria University of Wellington, 2015.

BIECHELE, P. et al. Sensor systems for bioprocess monitoring. *Engineering in Life sciences*, v. 15, n. 5, p. 469-488, 2015.

BLISKA, F. M. M.; MOURÃO, E. A. B.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; VEGRO, C. L. R.; PEREIRA, S. P.; GIOMO, G. S. (2009). Dinâmica fitotécnica e socioeconômica da cafeicultura brasileira. *Informações Econômicas*, SP, v.39, n.1, jan. 2009.

BORÉM, F. M.; ABREU, G. F.; FERREIRA, A. G.; SANTOS, M. S.; ALVES, T. C.; ALVES, A. P. C. (2023). ¹H NMR spectroscopy applied to identify chemical aging markers in green coffee (*Coffea arabica* L.). *Food Chemistry*, 405, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134667>.

BORÉM, M. F et al. Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*, e12552, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1111/joss.12552>

BORÉM, F. M. Pós-colheita do café. Lavras: UFLA, 2008. v. 1, 631 p.

BORRELLA, I.; MATAIX, C.; CARRASCO-GALLEGU, R. (2015) Smallholder farmers in the speciality coffee industry: Opportunities, constraints and the businesses that are making it possible. *IDS Bulletin*, v.46, n.3, p. 29–44. <https://doi.org/10.1111/1759-5436.12142>.

BOTELHO, B. G., OLIVEIRA, L. S., & FRANCA, A. S. (2017). Fluorescence spectroscopy as tool for the geographical discrimination of coffees produced in different regions of Minas Gerais state in Brazil. *Food Control*, 77, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.01.020>

BRAGA, L. M. Comparativo de métodos sensoriais descritivos na avaliação de café torrado e moído, Dissertação de mestrado, Campo Mourão, PR, 2019.

BRASIL. AGÊNCIA GOV. Bioma exclusivamente brasileiro, Caatinga oferece vários destinos de ecoturismo. Empresa Brasil de Comunicação, Brasília, DF, 2024. Disponível em: < <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202404/bioma-exclusivamente-brasileiro-oferece-varios-destinos-de-ecoturismo#:~:text=O%20Parque%20Nacional%20da%20Chapada,a%20427%20km%20de%20Salvador.>>. Acesso em: 09 de maio de 2025.

BRASIL. LEI Nº 9.279, DE 14 DE MAIO DE 1996. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. *Diário Oficial da República do Brasil*. Brasília, DF, 1996. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9279.htm>. Acesso em: 04 de jan. de 2020.

BSCA - BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. BSCA e Apex-Brasil renovam projeto de promoção internacional dos cafés especiais. 2021. Disponível em: <

<https://bsca.com.br/news/BSCA-Apex-Brasil-renovam-projeto-promocao-internacional-cafes-especiais>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

BSCA - BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. Chapada Diamantina. Disponível em: <<https://brazilcoffeenation.com.br/region/show/id/9>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

BUFFO, R. A., & CARDELLI-FREIRE, C. Coffee flavour: An overview. *Flavour and Fragrance Journal*, v. 19, p. 99–104, 2004. <https://doi.org/10.1002/ffj.1325>

CALLAO, M. P.; RUISÁNCHEZ, I. An overview of multivariate qualitative methods for food fraud detection. *Food Control*, v. 86, p. 283-293, 2018.

CALDEIRA, G. R. F. et al. Authentication of Specialty Coffees from the Fluminense Northwest and Caparaó Regions (Brazil) Using UV-Vis Spectroscopy and Synthetic Samples Partial Least Square Discriminant Analysis (SS-PLS-DA). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 35, p. e-20230144, 2024. <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20230144>

CANZI, F. A. et al. Effect of pollination on the composition of raw arabica coffee (*Coffea arabica* L.): antioxidant capacity, bioactive compounds, and volatiles precursors. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 103, n. 11, p. 5578-5587, 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12635>

CAPORASO, N.; WHITWORTH, M. B.; CUI, C.; FISK, I. D. Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS. *Food Research International*, v. 108, p. 628 - 640, 2018.

CAVACO, A. M. et al. Spatiotemporal modelling of the quality and ripening of two cultivars of “Algarve Citrus” orchards at different edaphoclimatic conditions. *Postharvest Biology and Technology*, v. 172, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111386>

CLABEN, J. et al. Spectroscopic sensors for in-line bioprocess monitoring in research and pharmaceutical industrial application. *Analytical and bioanalytical chemistry*, v. 409, p. 651-666, 2017.

CLIFFORD, M. N. Chemical and physical aspects of green coffee and coffee products. In: CLIFFORD, M. N.; WILLSON, K. C. *Coffee, botany, biochemistry and production of beans and beverage*. London: CROOMBELM, 1985. p. 305-359.

COHEN, Y. et al. Spatial decision support system for Medfly control in citrus. *Comput. Electron. Agric.*, v. 62, n. 2, p. 107–117, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.005>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira - Café. v. 10– Safra 2023, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília, p. 1-44, maio 2023.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Chapada Diamantina - BA: Informações básicas para a gestão territorial: Diagnóstico do meio físico e da vegetação. IBAMA, 1994.

CRESSIE, N. A. C. *Statistics for spatial data*. New York: Wiley, 1993.

CZERNY, M.; GROSCH, W. Potent odorants of raw Arabica coffee. Their changes during roasting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 48, p. 868–872. 2000. <https://doi.org/10.1021/jf990609n>

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, 2017.

DE SÁ, D. G. C. F. Sensorial. Tecnologia de Alimentos. Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021. Disponível em: <

DI STEFANO, V. *et al.* Chemical composition and anti-radical properties of coffee cherry cultivated in Mediterranean climate. Food Bioscience, v. 56, 103349, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103349>.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. Rev Virtual Quim 9: 107-134 (2017).

FARIAS, P. R. S.; ROBERTO, S. R.; LOPES, J. R. S.; PERECIN, D. Geostatistical characterization of the spatial distribution of *Xylella fastidiosa* sharpshooter vectors on citrus. Neotrop. Entomol., v. 33 n.1, 13–20, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2004000100004>

FERNANDES, A. L. T., PARTELLI, F. L., BONOMO, R., GOLYNSKI, A. (2012) A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 42, n.2, p. 231-240.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; COSTA, P. A. N.; SILVA, A. C.; CARVALHO, F. M. Precision agriculture to study soil chemical properties and the yield of a coffee field. Coffee Science, v.7, p.59-67, 2012.

FIGUEIREDO, L. P.; BORÉM, F. M.; ALMEIDA, M. R.; OLIVEIRA, L. F. C.; ALVES, A. P. C.; SANTOS, C. M.; RIOS, P. A. (2019) Raman spectroscopy for the differentiation of

Arabic coffee genotypes. Food Chemistry, v. 288, 262-267.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.093>.

FIGUEIREDO, L. P., BORÉM, F. M., CIRILLO, M. A., RIBEIRO, F. C., GIOMO, G. S., & SALVA, T. J. G. (2013). The potential for high quality bourbon coffees from different environments. The Journal of Agricultural Science, 5(10), 87–98.

FIGUEIREDO, L. P. Abordagem sensorial e química da expressão de genótipos de Bourbon em diferentes ambientes. Tese (doutorado) – UFLA, Lavras, MG, 127 p., 2013.

FLAMENT, I. Coffee, cocoa, and tea. Food Reviews International, v. 5, p. 317–414, 1989.
<https://doi.org/10.1080/87559128909540857>

FUNCH, R. R.; HARLEY, R. M.; FUNCH, L. S. 2009. Mapping and evaluation of the state of conservation of the vegetation in and surrounding the Chapada Diamantina National Park, NE Brazil. Biota Neotropica 9: 11-12.

GIOVANNUCCI, D. Trends toward differentiation and sustainability. In B. Bagley, ed. El futuro del café en Colombia: essays on the political economy of coffee. Federación Nacional de Cafeteros and Planeta. Bogotá. 2008.

GONÇALVES, A. N. S. Café da Chapada Diamantina, Bahia: Qualidade da Bebida e Relações com o Ambiente. (Dissertação: Mestrado em Agronomia). Vitória da Conquista – BA: UESB, 71p., 2022.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, M. G.; GOMEZ-SANCHIS, J.; BLASCO, J.; SORIA-OLIVAS, E.; CHUECA, P. CitrusYield: a dashboard for mapping yield and fruit quality of Citrus in precision agriculture. Agronomy v. 10, n.1, p. 128, 2020.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10010128> agronomy10010128.

HARLEY, R. M. Introduction. Pp. 1-40. In: Stannard, B.L. (ed.). Flora of the Pico das Almas, Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. Kew, Royal Botanic Gardens. 1995.

HUTACHOK, N.; KOONYOSYING, P.; PANKASEMSUK, T.; ANGKASITH, P.; CHUMPUN, C.; FUCHAROEN, S.; SRICHAIRATANAKOOL, S. Chemical analysis, toxicity study, and free-radical scavenging and iron-binding assays involving coffee (*Coffea arabica*) extracts. *Molecules*, v. 26, p. 4169, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Biomas do Brasil. Ministério do Meio Ambiente/Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Diretoria de Geociências, Brasília, DF, 2004.

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Indicações Geográficas: Denominações de Origem Reconhecidas. Ministério da Agricultura e Pecuária. Brasília – DF. 2024a. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/indicacoes-geograficas/arquivos/status-pedidos/LISTACOMASDENOMINAESDEORIGEMRECONHECIDAS.At15Out2024.pdf>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2024.

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Indicações Geográficas: Indicações de Procedência Reconhecidas. Ministério da Agricultura e Pecuária. Brasília – DF. 2024b. Disponível em: < <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/indicacoes-geograficas/arquivos/status-pedidos/LISTACOMASINDICAESDEPROCEDNCIARECONHECIDAS.At03Dez2024.pdf> >. Acesso em: 04 de dezembro de 2024.

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Manual de Indicações Geográficas. Cap. 2 Indicação Geográfica e espécies de registro. 1 Edição, fev. 2021. Disponível em: < https://manualdeig.inpi.gov.br/projects/manual-de-indicacoes-geograficas/wiki/Manual_de_Indica%C3%A7%C3%B5es_Geogr%C3%A1ficas >. Acesso em: 04 de jan. de 2021.

KEMSLEY, E. K.; DEFERNEZ, M.; MARINI, F. Multivariate statistics: Considerations and confidences in food authenticity problems. *Food Control*, v. 105, p. 102-112, 2019.

KITZBERGER, C. S. G.; SCHOLZ, M. B. S.; PEREIRA, L. F. P.; BENASSI, M. T. Composição química de cultivares tradicionais e modernas de café arábica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 48 : 1498-1506 (2013) .

KONOPATZKI, M. R. S.; SOUZA, E. G.; NOBREGA, L. H. P.; URIBE-OPAZO, M. A.; SUSZEKS, G. Spatial variability of yield and other parameters associated with pear trees. *Eng. Agríc., Jaboticabal* v. 32, n.2, p. 381–392, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000200018>.

LINGLE, T. R.; MENON, S. N. Cupping and grading—Discovering character and quality. In *The Craft and Science of Coffee*; Academic Press: Cambridge, MA, USA; p. 181–203, 2017.

LINGLE, T. R. *The coffee cupper's handbook: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor*. 4. ed. Long Beach: Specialty Coffee Association of America, 66 p, 2011.

LINK, J. V., LEMES, A. L. G.; MARQUETTI, I.; SCHOLZ, M. B. S.; BONA, E. (2014). Geographical and genotypic classification of arabica coffee using fourier transform infrared spectroscopy and radial-basis function networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 135, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.04.008>

MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A.; TRUGO, L. C. Componentes voláteis do café torrado. Parte I: compostos heterociclicos. *Química Nova*. (1999). <https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000200013>

MÁRQUEZ, C. *et al.* FT-Raman and NIR spectroscopy data fusion strategy for multivariate qualitative analysis of food fraud. *Talanta*, v. 161, p. 80-86, 2016.

MASSART, D. L. *et al.* Chemometrics: a textbook. In: DEMING, S. N. *et al.* Data handling in science and technology, v. 2, p. 53, Elsevier, 1988.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MENDES, E; DUARTE, N. Mid-infrared spectroscopy as a valuable tool to tackle food analysis: A literature review on coffee, dairies, honey, olive oil and wine. *Foods*, v. 10, n. 2, p. 477, 2021.

MISHRA, S. *et al.* (2017). Multivariate Statistical Data Analysis- Principal Component Analysis (PCA). *International Journal of Livestock Research*, 7(5), 60-78. <http://dx.doi.org/10.5455/ijlr.20170415115235>

MOREIRA, R. F. A.; TRUGO, L. C.; MARIA, C. A. B. Compostos voláteis do café torrado: parte II, compostos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. *Química Nova*, v. 23, p. 195-203, 2000.

MUNYENDO, L.; NJOROGI, D.; HITZMANN, B. The Potential of Spectroscopic Techniques in Coffee Analysis - A Review. *Processes*, v. 10, n. 1, p. 71, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10010071>

MUTZ, Y. S.; ROSARIO, D.; GALVAN, D.; SCHWAN, R. F.; BERNARDES, P. C.; CONTE-JUNIOR, C. A. Feasibility of NIR spectroscopy coupled with chemometrics for classification of Brazilian specialty coffee. *Food Control*, 2023, 149. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109696>

NASCIMENTO, F. H. F.; GIULIETTI, A. M.; QUEIROZ, L. P. Diversidade arbórea das florestas Alto Montanas no Sul da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 24(3): 674-685. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000300011>

NEILSON, J.; WRIGHT, J.; AKLIMAWATI, L. Geographical indications and value capture in the Indonesia coffee sector. *Journal of Rural Studies*, v. 59, p. 35–48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.01.003>

NHANCOLOLO, A. M.; OLIVEIRA, W. A.; PEREIRA, F. A. C.; SILVA, B. M.; SCALON, J. D. Comparação entre o método laboratorial e o penetrômetro de Stolf na análise da densidade do solo: um estudo utilizando abordagens geoestatísticas. *Sigmae*, Alfenas, v.13, n.1, p.63-78. 2024.

NOLASCO, C. M.; LIMA, C. C. U.; FRANCA-ROCHA, W.; RÊGO, M. J. M. 2008. Aspectos físicos da Serra do Sincorá, Chapada Diamantina (Bahia). Pp. 17-33. In: Funch, L.S.; Funch, R.R. & Queiroz, L.P. (eds.). Serra do Sincorá, Parque Nacional da Chapada Diamantina Feira de Santana, Radami Editora Gráfica.

NUNES, C. A. et al. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. São Paulo, v.23, n.11, p.2003-2010, 2012.

OMC - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DO COMÉRCIO. Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio (TRIPS). 1994. Disponível em: <https://www.wto.org/spanish/docs_s/legal_s/27-trips.pdf>. Acesso em: 04 de jan. de 2021.

PANAGOPOULOS, T.; ANTUNES, M. D. C. Spatial distribution of quality characteristics and production factors of kiwifruit at Beira Litoral, Portugal. *Acta Hort.* v. 913, p. 609–614, 2011. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.913.83>.

PANAGOPOULOS, T.; BALTAZAR, O.; ANTUNES, M. D. C. Mapping orchard fruit quality characteristics of apricot (*Prunus armeniaca* L.) cvs. ‘Beliana’ and ‘Lindo’. *Acta Hort.* v. 717, p. 377–380, 2006. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.149>.

PEBESMA, E. J.; WESSELING, C. G. Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, v. 24, p.17 – 31, 1998.

PEREIRA, M. E. B. G.; LOURENZANI, A. E. B. S.; BANKUTI, S. M. S.; PIGATTO, G. A. S. Coordenação na agricultura familiar e o desenvolvimento territorial: o caso das indicações geográficas para o café. *Política & Sociedade*, Florianópolis - Edição Especial, v. 15, p. 131-178, 2016.

PEREIRA, G. V. M. et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – a review. *Food Chemistry*, v. 272, p. 441–452, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>

POWER, A. C. et al. Ultraviolet-visible spectroscopy for food quality analysis. cap. 6, p. 91-104. In: Zhong, J.; Wang, X. *Evaluation Technologies for Food Quality*, USA: Woodhead Publishing, 2019.

PRETE, C. E. C. Condutividade elétrica do exsudato de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e sua relação com a qualidade da bebida. 1992. 125 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1992.

QUAN, N. M. et al. Species and geographical origin authenticity of green coffee beans using UV–VIS spectroscopy and PLS–DA prediction model. *Food Chemistry Advances*, v. 2, p. 100281, 2023.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>, 2024.

RIBEIRO, D. E. Descritores químicos e sensoriais para discriminação da qualidade da bebida de café arábica de diferentes genótipos e métodos de processamento, Tese de doutorado, Lavras, MG, 2017.

RISTICEVIC, S.; CARASEK, E.; PAWLISZYN, J. (2008). Headspace solid-phase microextraction-gas chromatographic-time-of-flight mass spectrometric methodology for geographical origin verification of coffee. *Analytica Chimica Acta*, 617(1–2), p. 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.04.009>

ROCHA, W. J. S. F.; CHAVES, J. M.; ROCHA, C. C.; FUNCH, L.; JUNCÁ, F. A. Avaliação Ecológica Rápida da Chapada Diamantina. In: Juncá, F. A.; Funch, L.; Rocha, W. (Orgs). *Biodiversidade e Conservação da Chapada Diamantina*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. P. 29-45.

RSTUDIO TEAM. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>, 2024.

RUBAYIZA, A. B.; MEURENS, M. Chemical discrimination of arabica and robusta coffees by Fourier transform Raman spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 53, n. 12, p. 4654-4659, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf0478657>

SANTANATOGLIA, A.; ALESSANDRONI, L.; FIORETTI, L.; SAGRATINI, G.; VITTORI, S.; MAGGI, F.; CAPRIOLI, G. Discrimination of Filter Coffee Extraction Methods of a Medium Roasted Specialty Coffee Based on Volatile Profiles and Sensorial Traits. *Foods*, v. 12, n.17:3199, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12173199>

SANTOS, H. D.; ALVARENGA, Y. A.; BOFFO, E. F. (2020) ¹H NMR metabolic fingerprinting of Chapada Diamantina/Bahia (Brazil) coffees as a tool to assessing their qualities. *Microchemical Journal*, v. 152, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104293>.

SANTOS, C. A. F.; LEITÃO, A. E.; PAIS, I. P.; LIDON, F. C.; RAMALHO, J. C. Perspectivas sobre os potenciais impactos das mudanças climáticas nas plantas e na qualidade dos grãos de café. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 27, p. 152 – 163, 2015.

SANTOS, A. O.; WAMPLE, R. L.; SACHIDHANANTHAM, S.; KAYE, O. Grape quality mapping for vineyard differential harvesting. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 55 (2), 193–204, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132012000200003>.

SARMENTO, C. S. A. G.; CASTRO, I. T. P.; INÁCIO, I. A.; LEMOS, O. L.; MORAIS, J. L. C.; BRITO, A. J. S.; FIGUEIREDO, R. M.; ARAÚJO, L. R. Aplicação da álgebra de mapas para identificação de áreas potenciais de produção de cafés especiais na Chapada Diamantina-BA. *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Florianópolis, SC, Brasil, abril de 2023.

SCA - SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION OF AMERICA. Protocols & Best Practices. Available online: <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices?page=resources&d=coffee-protocols> (acessado em 04 Junho 2024).

SCALON, J. D. *Análise com dados espaciais com aplicações em R*. Lavras: Editora UFLA, 2024.

SCHLENS, J. (2005) A Tutorial on Principal Component Analysis. Institute for Nonlinear Science, University of California, San Diego La Jolla, CA 92093-0402.

SCHÜBLER, L. Protecting ‘Single-Origin Coffee’ within the Global Coffee Market: The Role of Geographical Indications and Trademarks. *Estey Cent. J. Int. Law Trade Policy*, v. 10, p. 149–185, 2009.

SETHURAMASAMYRAJA, B.; SACHIDHANANTHAM, S.; WAMPLE, R. Geospatial Modeling of Wine Grape Quality Indicators (Anthocyanin) for Development of Differential Wine Grape Harvesting Technology. *International Journal Of Geomatics And Geosciences*, v. 1, n. 3, 2010.

SHAH, D, et al. A spectroscopic chemometric modeling approach based on statistics pattern analysis, IFAC – Papers online, v.51 (18), p. 369-374, 2018.

SIMEDRU, D.; BECZE, A. (2023). Complex Profiling of Roasted Coffee Based on Origin and Production Scale. Agriculture, v. 13, p. 1146. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061146>

SUNARHARUM, W. B.; WILLIAMS, D. J.; SMYTH, H. E. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. Food Research International, v. 62, p. 315-325, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030>

TAYLOR, J.A.; BATES, T.R. Temporal and spatial relationships of vine pruning mass in Concord grapes. Australian Journal of Grape and Wine Research 19, 401–408, 2013. doi: 10.1111/ajgw.12035

TOCI, A. et al. Efeito do processo de descafeinação com diclorometano sobre a composição química dos cafés arábica e robusta antes e após a torração, Química Nova, v. 29, n.5, p. 965-971, 2006.

TOLEDO, P. R. A. B.; MELO, M. M. R.; PEZZA, H. R.; TOCI, A. T.; PEZZA, L.; SILVA, C. M. Análise discriminante para revelar a origem de amostras de café torrado: uma ferramenta para controle de qualidade de produtos relacionados ao café. Controle Alimentar, v. 73, p. 164 – 174, 2017. <https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.foodcont.2016.08.001> .

TOLEDO, P. R. A. B.; PEZZA, L.; PEZZA, H. R.; TOCI, A. T. Relationship Between the Different Aspects Related to Coffee Quality and Their Volatile Compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v. 15, n. 4, p. 705-719, 2016. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12205>

TRAN, H. T.; VARGAS, C. A. C.; LEE, L. S.; FURTADO, A.; SMYTH, H.; HENRY, R. Variation in bean morphology and biochemical composition measured in different genetic groups of arabica coffee (*Coffea arabica* L.). *Tree Genetics & Genomes*, v. 13, n. 3, p. 54, 2017.

TSAI, J. J. et al. Analysis and classification of coffee beans using single coffee bean mass spectrometry with machine learning strategy. *Food Chemistry*, v. 426, p. 136610, 2023.

VELLEMA, W.; BURITICA CASANOVA, A.; GONZALEZ, C.; D'HAESE, M. The effect of specialty coffee certification on household livelihood strategies and specialisation. *Food Policy*, v. 57, p. 13–25, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.07.003>

VEZZULLI, F.; ROCCHETTI, G.; LAMBRI, M.; LUCINI, L. Metabolomics combined with sensory analysis reveals the impact of different extraction methods on coffee beverages from *coffea arabica* and *coffea canephora* var. *robusta*. *Foods*, v. 11, p. 807, 2022.

WANG, J.; JUN, S.; BITTENBENDER, H. C.; GAUTZ, L.; LI, Q. X. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy for kona coffee authentication. *Journal of Food Science*, 74, 5, 385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01173.x>

WU, W.; LIU, H. B.; DAI, H. L.; SUN, P. S. The management and planning of citrus orchards at a regional scale with GIS. *Precis. Agric.* v. 12, p. 44–54, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9154-9>.

YAMAMOTO, J. K. *Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais*. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020.

YANG, S.; LI, C.; YANG, M.; WEN, L.; LIU, R.; CHEN, W.; HAN, D.; XU, K. (2021). Determination of the geographical origin of coffee beans using terahertz spectroscopy combined with machine learning methods. *June Frontiers in Nutrition*, 8, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.680627>.

YU, R.; BRILLANTE, L.; MARTÍNEZ-LÜSCHER, J.; KURTURAL, S. K. Spatial Variability of Soil and Plant Water Status and Their Cascading Effects on Grapevine Physiology Are Linked to Berry and Wine Chemistry. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, n. 790, 2020. doi: 10.3389/fpls.2020.00790

ZABIHI, H. et al. Land suitability procedure for sustainable citrus planning using the application of the analytical network process approach and GIS. *Comput. Electron. Agric.*, v. 117, p. 114–126, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.07.014>.

ZABIHI, H.; VOGELER, I.; AMIN, Z. A.; GOURABI, B. R. Mapping the sensitivity of citrus crops to freeze stress using a geographical information system in Ramsar. Iran. *Weather Climate Extremes*, v. 14, p. 17–23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.002>.

ZELBER-SAGI, S.; SALOMONE, F.; WEBB, M.; LOTAN, R.; YESHUA, H.; HALPERN, Z.; SHIBOLET, O. Coffee consumption and nonalcoholic fatty liver onset: a prospective study in the general population. *Translational Research*, v. 165, p. 428-436, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trsl.2014.10.008>

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DA QUALIDADE
SENSORIAL DE CAFÉ CEREJA DESCASCADO E NATURAL NA CHAPADA
DIAMANTINA-BA**

**ARTICLE 1- SPATIAL VARIABILITY OF THE DISTRIBUTION OF SENSORY
QUALITY OF PULPED AND NATURAL COFFEE IN CHAPADA DIAMANTINA-BA**

(VERSÃO PRELIMINAR)

Artigo preparado de acordo com as normas da UFPA.

RESUMO

O café é uma das bebidas mais apreciadas globalmente, com crescente valorização pela sua origem e qualidade. No Brasil, maior produtor mundial, essa demanda tem impulsionado a adoção de Indicações Geográficas para certificar a procedência e características distintivas do produto. Este trabalho empregou a geoestatística para analisar a variabilidade espacial dos atributos sensoriais de cafés da Chapada Diamantina, Bahia, compreendendo a influência do ambiente geográfico na qualidade final da bebida, para café descascado e natural. Os resultados revelaram que a distribuição dos atributos sensoriais na região é espacialmente estruturada. Cafés com perfil sensorial mais equilibrado, com maior intensidade de doçura, acidez, corpo, finalização e notas finais elevadas, são predominantes nas regiões Sul e Centro-Oeste, especialmente em altitudes acima de 1100 metros. Em contrapartida, nos municípios situados ao norte da região, onde as altitudes são menores, observou-se maior intensidade de adstringência e amargor, resultando em menor qualidade e notas sensoriais inferiores. A consistência desses padrões geográficos entre os dois tipos de processamento pós-colheita demonstra a preeminência dos fatores de *terroir* (altitude e latitude) na determinação da qualidade intrínseca do café na região. A geoestatística, ao modelar e inferir esses padrões espaciais, comprova a ligação indissociável entre a qualidade dos produtos e sua região de origem, demonstrando ser uma ferramenta valiosa para subsidiar a proteção e valorização de produtos com Indicação Geográfica, como Denominação de Origem da Chapada Diamantina.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L., atributos sensoriais, geoestatística, denominação de origem.

ABSTRACT

Coffee is one of the most globally appreciated drinks, with increasing appreciation for its origin and quality. In Brazil, the largest producer worldwide, this demand has driven the adoption of geographical indications to certify the origin and distinctive characteristics of the product. This work employed geostatistics to analyze the spatial variability of the Chapada Diamantina, Bahia sensory attributes of cafes, understanding the influence of the geographic environment on the final quality of the drink, for peeled and natural coffee. The results revealed that the distribution of sensory attributes in the region is spatially structured. Coffee with a more balanced sensory profile, with greater sweetness, acidity, body, finishing and high final notes, are predominant in the southern and Midwest, especially at altitudes above 1100 meters. On the other hand, in the municipalities located north of the region, where altitudes are lower, there was greater intensity of astringency and bitterness, resulting in lower quality and lower sensory notes. The consistency of these geographical patterns between the two types of postharvest processing demonstrates the preeminence of terroir factors (altitude and latitude) in determining the intrinsic quality of coffee in the region. Geostatistics, when modeling and inferring these spatial patterns, proves the inseparable connection between product quality and their origin region, proving to be a valuable tool to support the protection and appreciation of products with geographical indication, as a denomination of origin of Chapada Diamantina.

Keywords: *Coffea arabica* L., sensory attributes, geostatistic, denomination of origin.

1 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais apreciadas no mundo, com uma infinidade de variações que se adaptam a diferentes paladares e ocasiões (Pimenta; Angélico; Chalfoun, 2018). Seu consumo, presente em diversas culturas, vai além do simples ato de beber: envolve rituais, memórias e momentos compartilhados. Nas últimas décadas, o café deixou de ser apenas uma *commodity* para se transformar em um item de luxo, impulsionado pelo interesse crescente dos consumidores por produtos de alta qualidade. Os cafés especiais, com sabores e aromas únicos, conquistam cada vez mais espaço, atraindo um público exigente que busca experiências sofisticadas e complexas, muitas vezes associadas à preocupação com saúde e bem-estar (Schuit *et al.*, 2021).

Essa valorização dos cafés diferenciados reflete um movimento global de apreciação pela origem e qualidade dos produtos alimentícios. No Brasil, um dos maiores produtores de café do mundo, esse fenômeno tem estimulado a adoção das Indicações Geográficas (IGs), que é um reconhecimento legal que identifica a origem de um produto ou serviço quando determinada reputação, qualidade ou característica pode ser vinculada predominantemente à sua origem geográfica, que oferecem benefícios econômicos e sociais ao promover o desenvolvimento local, agregando valor à produção e reforçando a identidade regional. Mais do que uma certificação, as IGs funcionam como uma ferramenta de coordenação, unindo produtores, instituições e comunidades em prol da valorização de um produto único e característico (INPI, 2024).

As IGs são classificadas em duas modalidades principais: Indicação de Procedência (IP) e Denominação de Origem (DO). A IP baseia-se na notoriedade do local como um centro de produção reconhecido, enquanto a DO exige comprovação de que as qualidades do produto estão diretamente vinculadas ao meio geográfico, incluindo fatores naturais como solo e clima, e fatores humanos, como o conhecimento tradicional transmitido ao longo das gerações (Bruch *et al.*, 2010; INPI, 2024). No café, a implementação de uma IG na modalidade DO exige um protocolo rigoroso que estabelece uma correlação direta entre o meio geográfico e a qualidade do produto. Nesse contexto, a análise sensorial desempenha um papel crucial. Um painel de degustadores treinados avalia as amostras de café, atribuindo notas a atributos como

sabor, aroma, acidez e corpo (Moser *et al.*, 2018). Esses atributos são influenciados por fatores como altitude, temperatura e práticas agrícolas, que variam conforme a localização geográfica.

Entretanto, esses protocolos para a implementação de uma IG é um processo complexo que exige organização, pesquisa e articulação entre diversos atores, sendo um processo muito dinâmico e que se renova conforme há o desenvolvimento de novas pesquisas com melhoria e adaptação da metodologia. Atualmente, o protocolo é constituído por algumas etapas essenciais como definição da área e sua delimitação, que engloba identificação da região (características geográficas), levantamento histórico (tradição, reputação e conhecimento local) e uma delimitação precisa (definição de fronteiras geográficas da área com levantamento das coordenadas geográficas). Após isso, realiza-se a caracterização do produto e seu vínculo com a região de origem estudada. Essas são etapas importantíssimas do protocolo que irá elaborar um Caderno de Especificações Técnicas (Cahier des Charges), documento fundamental que descreve detalhadamente as etapas acima com os requisitos de qualidade e os mecanismos de controle que a organização gestora (associação, cooperativas ou conselho regulador que represente os produtores e demais atores da cadeia produtiva) irá seguir e implementar, garantindo a padronização e a qualidade do produto final.

Ferramentas geoestatísticas podem e devem contribuir significativamente no desenvolvimento de uma Indicação Geográfica (IG) para café. Elas são essenciais para aprofundar a compreensão do "*terroir*" do café, que é o conjunto de fatores naturais (solo, clima, topografia) e humanos que conferem características únicas ao produto, assim, essas ferramentas tornam-se essenciais para identificar padrões e tendências espaciais, permitindo visualizar a distribuição geográfica das características sensoriais do café. A análise da variabilidade espacial dos atributos sensoriais apresenta-se como uma solução promissora, pois permite relacionar elementos naturais e humanos à qualidade final da bebida (Baqueta *et al.*, 2019). O uso de mapas geoespaciais facilita a identificação de zonas com diferentes níveis de qualidade sensorial, o que otimiza a definição de áreas prioritárias para a produção de cafés especiais e melhora a precisão no controle da qualidade.

No entanto, a geoestatística ainda não é aplicada na metodologia para o desenvolvimento de uma IG. Além disso, a falta de conhecimento sobre a aplicação dessas

ferramentas pode tornar o processo mais lento e oneroso. A crescente necessidade de técnicas que simplifiquem a análise da relação entre a localização geográfica e a qualidade do café se torna evidente. A avaliação da variabilidade espacial dos atributos sensoriais, quando combinada com dados de latitude, longitude e altitude pode evidenciar como o meio ambiente contribui para a singularidade do café. Ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados aos métodos geoestatísticos, podem oferecer uma abordagem eficaz para essa análise, tornando o processo mais ágil e preciso.

Ainda que a maioria dos estudos existentes se concentre no mapeamento das plantas de café, poucos investigam a relação entre o meio geográfico e a qualidade sensorial da bebida. O presente trabalho visa preencher essa lacuna, verificando como as variáveis sensoriais dependem do meio geográfico e como a geoestatística pode validar essa correlação. Se comprovada, essa abordagem poderá se tornar um padrão para as IGs que valorizam a qualidade sensorial de alimentos, permitindo a predição de áreas de maior tendência de qualidade em determinado atributo.

O avanço das tecnologias de análise espacial tem o potencial de revolucionar a forma como a qualidade sensorial do café é avaliada, especialmente no contexto das IGs. Ao demonstrar a eficácia da geoestatística na identificação das influências do meio geográfico, este trabalho abre caminhos para a otimização da produção e a valorização dos cafés especiais. Isso não apenas fortalece as economias locais, mas também promove produtos genuinamente diferenciados, reafirmando o café como um símbolo de excelência, tradição e inovação.

A maioria dos trabalhos disponíveis envolvendo mapeamento da variabilidade espacial é sobre as plantas de café e produção e não tem relação com a qualidade de bebida. Com isso o trabalho tem como objetivo analisar as características sensoriais do café dessa região, compreendendo como as variáveis sensoriais manifestam e se distribuem espacialmente utilizando a geoestatística. A partir disso, ao comprovar a contribuição real da geoestatística no caso estudado, propor uma nova metodologia a ser seguida nas IG relacionadas com qualidade sensorial de alimentos, para a sua melhor predição com a identificação de áreas de incerteza, utilizando técnicas de geoestatísticas e sensoriamento remoto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida nos municípios pertencentes à Indicação Geográfica da Chapada Diamantina - BA, durante a safra 2020/2021.

Apenas frutos maduros ou “cereja” foram selecionados no campo, essas áreas de colheita dos frutos foram georreferenciadas através do aplicativo UTM Geo Map 3.6.4. A seleção, acondicionamento e transporte dos frutos para as áreas de processamento foi realizado pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Campus de Vitória da Conquista, onde as amostras do café foram embaladas à vácuo e enviadas ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, para serem submetidas às análises sensorial e química.

Na safra 2020/2021 a coleta das amostras foi realizada nos municípios de Bonito e Morro do Chapéu (Norte da Chapada); Seabra, Piatã e Rio de Contas (Centro-Oeste da Chapada); e Mucugê, Ibicoara e Barra da Estiva (Sul da Chapada). Essas amostras foram submetidas ao processamento via seca originando os cafés naturais e processamento via úmida, originando cafés descascados. Nessas amostras foram realizadas análise sensorial e análises químicas (UV-vis).

Recepção e preparação das amostras

As amostras ao chegarem ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola – UFLA, foram desembaladas, conferido o teor de água pelo método de capacitância elétrica, já que essas amostras já estavam no padrão ideal de teor de água e, visando maior uniformidade, as amostras passaram pelas peneiras de classificação e foi repassado a catação dos defeitos. As análises químicas e torração foram realizadas nos grãos retidos nas peneiras 14 e acima (14, 15, 16, 17 e 18/64 polegadas).

Para a realização das análises químicas, cada amostra foi acondicionada em um tubo falcon de 50 mL e armazenadas em *freezer*, à temperatura de -80°C, até a realização das análises.

Torração e avaliação sensorial

Todos os procedimentos foram realizados de acordo com os protocolos descritos pela Associação Americana de Cafés Especiais (*Specialty Coffee Association of America*, ou SCAA) (LINGLE, 2011). A análise sensorial foi realizada por profissionais capacitados e experientes com o protocolo SCA. Foi seguida a metodologia proposta por Lingle (2011) para avaliação sensorial de cafés especiais. Nesta metodologia são dadas notas para fragrância/aroma, sabor, acidez, corpo, escala de intensidade para doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor e finalização, sabor residual, uniformidade, xícara limpa e nota final.

A torra (moderadamente leve) foi realizada em 100 g de grãos de café da peneira 14 acima em torrador de laboratório Probat TP2 (Curitiba, Brasil). A temperatura foi monitorada para que o tempo de torra não fosse inferior a 8 min nem superior a 12 min. Para padronizar a torra, e assim evitar influenciar a avaliação dos julgadores, utilizou-se um padrão de torra, em que a cor do grão moído foi seguido para todas as amostras. A torra da amostra da primeira cidade foi registrada e, duplicada essa padronização de torra em todas as outras amostras. Todas as amostras foram torradas pelo menos 12 horas antes da degustação. Os resultados finais da avaliação sensorial foram determinados através da soma de todos os atributos.

Para a degustação as amostras foram pesadas para uma relação pré-determinada de 10 g de grãos torrados, por 150 ml de água e, em seguida, moídas em moinho de amostras Mahlkönig Guatemala (Hamburg, Alemanha). Cada xícara da amostra era avaliada por um degustador, totalizando 6 xícaras (6 repetições por amostra).

Os atributos sensoriais doçura, acidez, corpo, amargor, adstringência e gosto residual foram avaliados usando uma escala de intensidade linear com valores de limite de “0”, representando ausência, e “10”, representando a intensidade máxima do atributo (Salvio et al. 2023). A pontuação geral foi avaliada em uma escala de 0 a 100 usando a metodologia do SCA Protocols – Cupping Specialty Coffee (Lingle, 2011).

Ferramentas estatísticas

A principal característica da geoestatística é o conceito de dependência espacial, que descreve como as variáveis de interesse se correlacionam em função da distância entre seus pontos de observação. Esse conceito é fundamental para a modelagem e análise dos dados

espaciais, pois muitas vezes as variáveis não são independentes, como nas abordagens estatísticas tradicionais. Em vez disso, observa-se que locais próximos tendem a ter valores semelhantes, enquanto locais distantes apresentam maior dispersão entre seus valores.

O semivariograma é uma função que descreve a dependência espacial dos dados geoestatísticos. Ele é definido como a média dos quadrados das diferenças entre os valores de uma variável observada em dois pontos, conforme aumenta a distância entre eles. O estimador clássico do semivariograma, conforme apresentado em Scalón (2024), é dado por

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z(\mathbf{s}_i) - z(\mathbf{s}_j))^2,$$

em que $N(h)$ é o conjunto de todos os pares de distâncias euclidianas $\|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j\| = h$, $|N(h)|$ é o número de pares distintos em $N(h)$ e $z(\mathbf{s}_i)$ e $z(\mathbf{s}_j)$ são valores de dados em localizações espaciais $\mathbf{s}_i$ e $\mathbf{s}_j$, respectivamente. h representa a distância medida apenas em magnitude. Em algumas situações (anisotropia) pode ser de interesse considerar h como um vetor contendo tanto a magnitude como a direção.

O comportamento do variograma pode ser dividido em três partes principais: efeito de pepita, alcance e patamar. O efeito de pepita representa a variabilidade nas escalas menores ou erro de medição; o alcance é a distância além da qual a autocorrelação espacial se torna desprezível; e o patamar indica a variabilidade máxima que pode ser explicada pelas correlações espaciais.

Feita a caracterização da dependência espacial, a próxima etapa é realizar a interpolação que permite estimar valores de uma função ou variável em pontos que não foram diretamente observados, mas a partir de pontos conhecidos. O interpolador mais utilizado na geoestatística é a krigagem que leva em conta a informação da estrutura de dependência espacial extraída do semivariograma (Scalón, 2024). Caso não se queira usar as informações do semivariograma ou o semivariograma tenha apenas efeito pepita puro, pode-se utilizar outro tipo de interpolador. Neste caso, um dos métodos mais comuns é baseado no inverso da distância (Yamamoto, 2020).

O conceito de inverso da distância é baseado na idéia de que a influência de um ponto sobre o valor de um ponto desconhecido diminui à medida que a distância entre os dois aumenta. Em outras palavras, pontos mais próximos ao valor a ser interpolado têm maior influência sobre o valor final, enquanto pontos distantes têm uma influência menor. Isso pode ser obtido, segundo Yamamoto (2020), através da equação

$$\hat{z}(s_o) = \frac{\sum_{i=1}^n z(s_i) W_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

em que $\hat{z}(s_o)$ é o valor predito no ponto desconhecido s_o e $z(s_i)$ é o valor conhecido no ponto s_i . O ponderador do inverso da distância (D_i) entre o ponto s_i e o ponto s_o a ser interpolado, para uma potência p , pode ser determinado como $W_i = \frac{1}{D_i^p}$. Neste método, o parâmetro p define como a distância influencia a estimativa. Quando $p = 1$, a influência diminui linearmente com a distância, e quando $p = 2$, a influência decai quadraticamente e, assim, sucessivamente. Neste trabalho utiliza-se $p = 2$.

O método inverso da distância pode ser aplicado para interpolação tanto em espaços do R^2 como do R^3 , pois depende apenas do cálculo das distâncias nessas dimensões.

A análise da dependência espacial das variáveis aleatórias foi realizada utilizando o semivariograma empírico clássico. Este semivariograma foi obtido para as quatro direções básicas (0° , 45° , 90° e 135°) no intuito de identificar direções na dependência espacial (anisotropia) das características químicas e sensoriais analisadas. A interpolação dos dados em locais não amostrados para a obtenção dos mapas geoestatísticos foi feita utilizando o método do inverso do quadrado da distância. As análises foram conduzidas no R^2 (latitude $\times$ longitude) e no R^3 (Latitude $\times$ Longitude $\times$ Altitude). Neste trabalho, todos os cálculos e gráficos foram realizados utilizando funções disponíveis e/ou desenvolvidas na biblioteca *gstat* (Pebesma e Wesseling, 1998), do *software* R (R Core Team, 2024), através da extensão complementar do R Studio (RStudio Team, 2024).

Mapas temáticos

Os mapas temáticos elaborados foram para compreender a disposição das cidades na região de estudos da Chapada Diamantina e o mapa de hipsometria que auxilia na interpretação dos resultados em relação à altitude. Para o processamento das imagens e obtenção dos valores de cada ponto onde foram coletadas as amostras foi utilizado o software QGIS, versão 3.34.4 'Prizren'. Para a elaboração dos mapas hipsométrico utilizou-se o complemento Open Topography DEM Downloader e as imagens geradas pelo satélite STRM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial de 30 metros. As classes hipsométricas seguiu critérios conforme a indicação de Loch (2006), com definição das faixas de altitude em intervalos de 200 m.

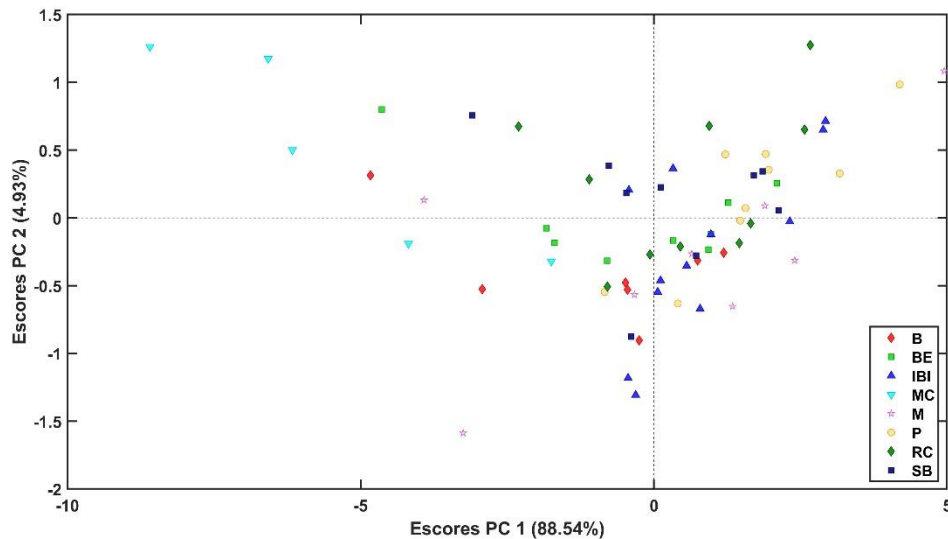
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do Café Descascado

Na análise sensorial foram avaliados os atributos doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final. Excetuando a nota, todos esses atributos são analisados de acordo com a intensidade, fator crucial que contribui para a pontuação final do café e, refere-se à força ou à percepção da presença de determinadas características, não se tratando apenas de "ter" um sabor, mas de quão pronunciado e perceptível esse sabor é, pois um café de alta qualidade não é apenas aquele que possui bons atributos, mas aquele em que esses atributos são claramente perceptíveis, bem definidos e contribuem para uma experiência sensorial rica e agradável do consumidor, variando de 0 (zero), baixa intensidade à 10 (dez) alta intensidade. Esses atributos são apresentados os gráficos abaixo. O atributo nota final utilizado nesse estudo também foi aproveitado por Gonçalves (2022) em sua dissertação.

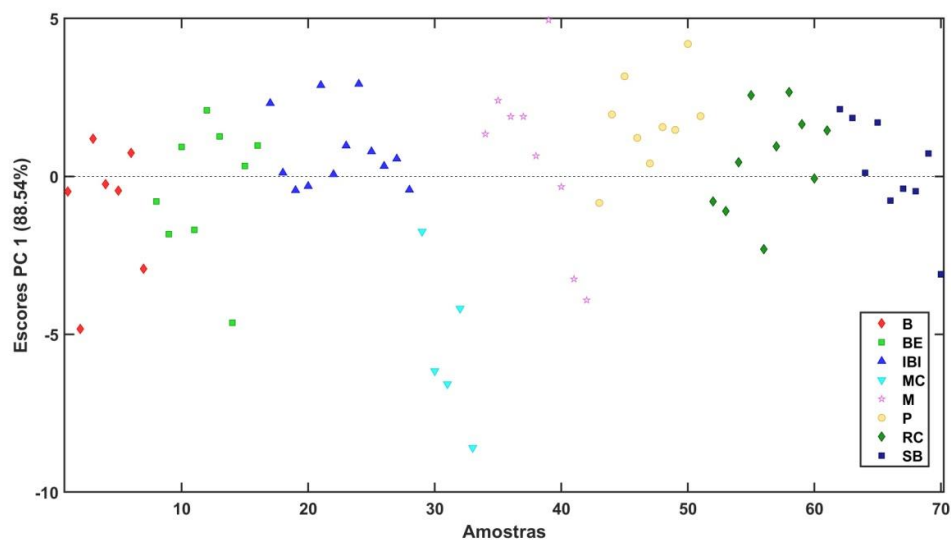
As notas finais dos cafés provenientes do processamento via úmida (café descascado) em relação às cidades produtoras de cafés da Chapada Diamantina são apresentados através da construção de modelos PCA. Os dois componentes principais explicaram 93,47% da variação total, com contribuição de 88,54% da componente PC1 e 4,93% da componente PC2. Essa alta contribuição da componente PC1 (88,54%) significa que as variáveis estão contribuindo de forma similar para a variância nos componentes principais, indicando uma correlação positiva forte entre os pontos.

Figura 1. Análise das componentes principais para duas PCs do atributo nota final da análise sensorial dos cafés provenientes das cidades da Chapada Diamantina, sendo Bonito (♦ B), Barra da Estiva (■ BE), Ibicoara (▲ IBI), Morro do Chapéu (▼ MC), Mucugê (* M), Piatã (● P), Rio de Contas (◆ RC) e Seabra (■ SB).



Fonte: Próprio Autor (2025).

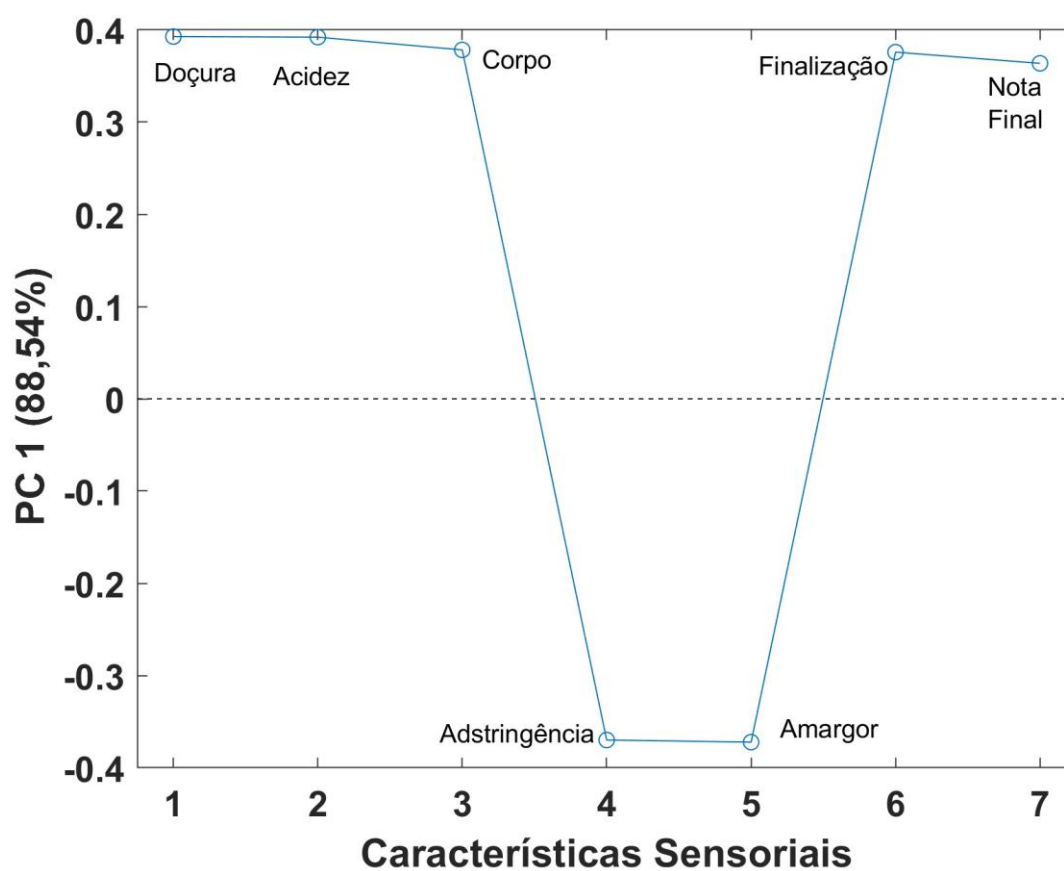
Figura 2. Análise da componente PC1 do atributo nota final da análise sensorial de cafés provenientes das cidades da Chapada Diamantina, sendo Bonito (♦ B), Barra da Estiva (■ BE), Ibicoara (▲ IBI), Morro do Chapéu (▼ MC), Mucugê (* M), Piatã (● P), Rio de Contas (◆ RC) e Seabra (■ SB).



Fonte: Próprio Autor (2025).

Em ambas as figuras, não há nenhuma tendência de agrupamento entre as amostras de cafés e ao analisar o gráfico de PC1 (Figura 2), os cafés encontrados do lado negativo da PC1 são cafés que apresentaram maior adstringência e amargor, consequentemente menores notas finais, como demonstrado na Figura 3, complementar à Figura 2. Aprofundando na análise, as amostras do município de Morro do Chapéu e a maioria das amostras do município de Bonito de encontram do lado negativo da PC1. As amostras no lado positivo do gráfico obtiveram melhor qualidade sensorial (maiores doçura, acidez, corpo e finalização) e consequentemente melhores notas. A Figura 3 demonstra os pesos de *loadings* das amostras complementando a compreensão do gráfico de PC1 (Figura 2).

Figura 3. Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina.

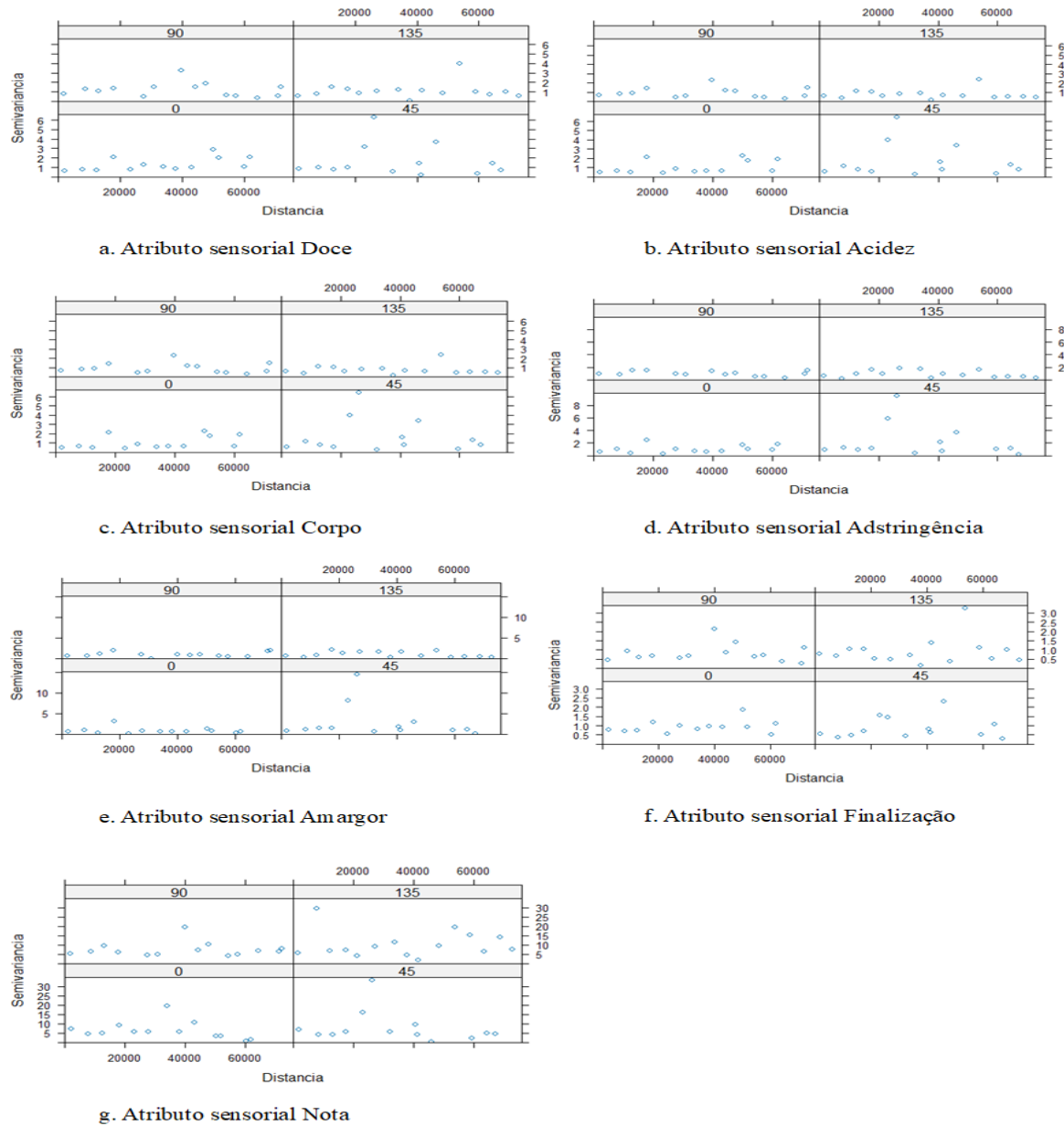


Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise variográfica é uma técnica geoestatística empregada para quantificar a dependência espacial de variáveis. Contudo, conforme demonstrado na Figura 4, os variogramas das variáveis sensoriais do café descascado não apresentaram tendências claras em quaisquer direções ou distâncias, caracterizando um 'Efeito Pepita Pura'. Isso sugere que a variabilidade predominante nessas variáveis ocorre em escalas menores do que a amostragem ou é intrinsecamente aleatória, indicando a ausência de uma estrutura de dependência espacial discernível através do variograma. Este resultado particular justifica a aplicação de métodos de interpolação, como o Inverso da Distância Ponderada, que não dependem da modelagem de uma estrutura espacial pré-definida para estimar a distribuição das variáveis na área de estudo.

Entretanto, é fundamental considerar que as áreas produtoras de café na Chapada Diamantina não formam um continuum espacial uniforme, apresentando 'vazios' significativos de produção. Essa descontinuidade no mapeamento espacial das lavouras contribui para a observação do 'Efeito Pepita Pura' nos variogramas, pois a dependência espacial pode se manifestar em escalas muito locais ou ser mascarada pela irregularidade da distribuição amostral. Diante dessa característica do conjunto de dados e da região, a interpolação pelo Inverso da Distância Ponderada (IDW) foi empregada. Através desta análise, tornou-se possível compreender a distribuição espacial das variáveis sensoriais (Figura 5) e identificar a influência dos fatores geográficos na formação sensorial dos cafés (Figuras 6, 7 e 8).

Figura 4. Modelos de semivariogramas aleatórios das variáveis sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

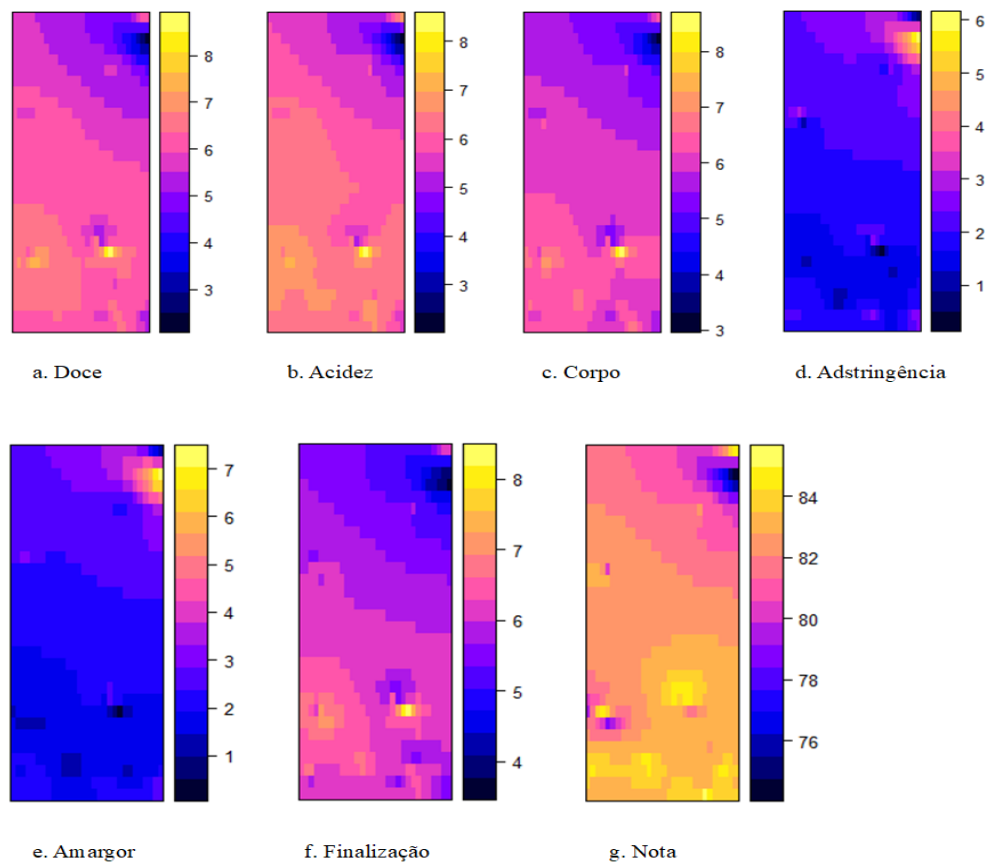


Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise dos mapas de distribuição espacial (Figura 5) revela que os atributos sensoriais apresentam padrões distintos de ocorrência na área de estudo (onde o eixo X

representa a longitude e o eixo Y a latitude). Observou-se que os atributos sensoriais considerados desejáveis — doçura (a), acidez (b), corpo (c) e finalização (f) — e, conseqüentemente, as melhores notas finais (g), concentram-se com maior intensidade nas regiões Sul e Centro-Oeste da Chapada Diamantina. Em contrapartida, os atributos indesejáveis, como adstringência (d) e amargor (e), ocorrem com maior intensidade na região Norte da Chapada Diamantina, resultando em notas finais inferiores (g) nessas áreas. Essa distribuição espacial heterogênea sugere uma forte influência de fatores geográficos, cujas relações com os atributos sensoriais são detalhadas nas seções seguintes, abordando especificamente a altitude (Figura 6), latitude (Figura 7) e longitude (Figura 8).

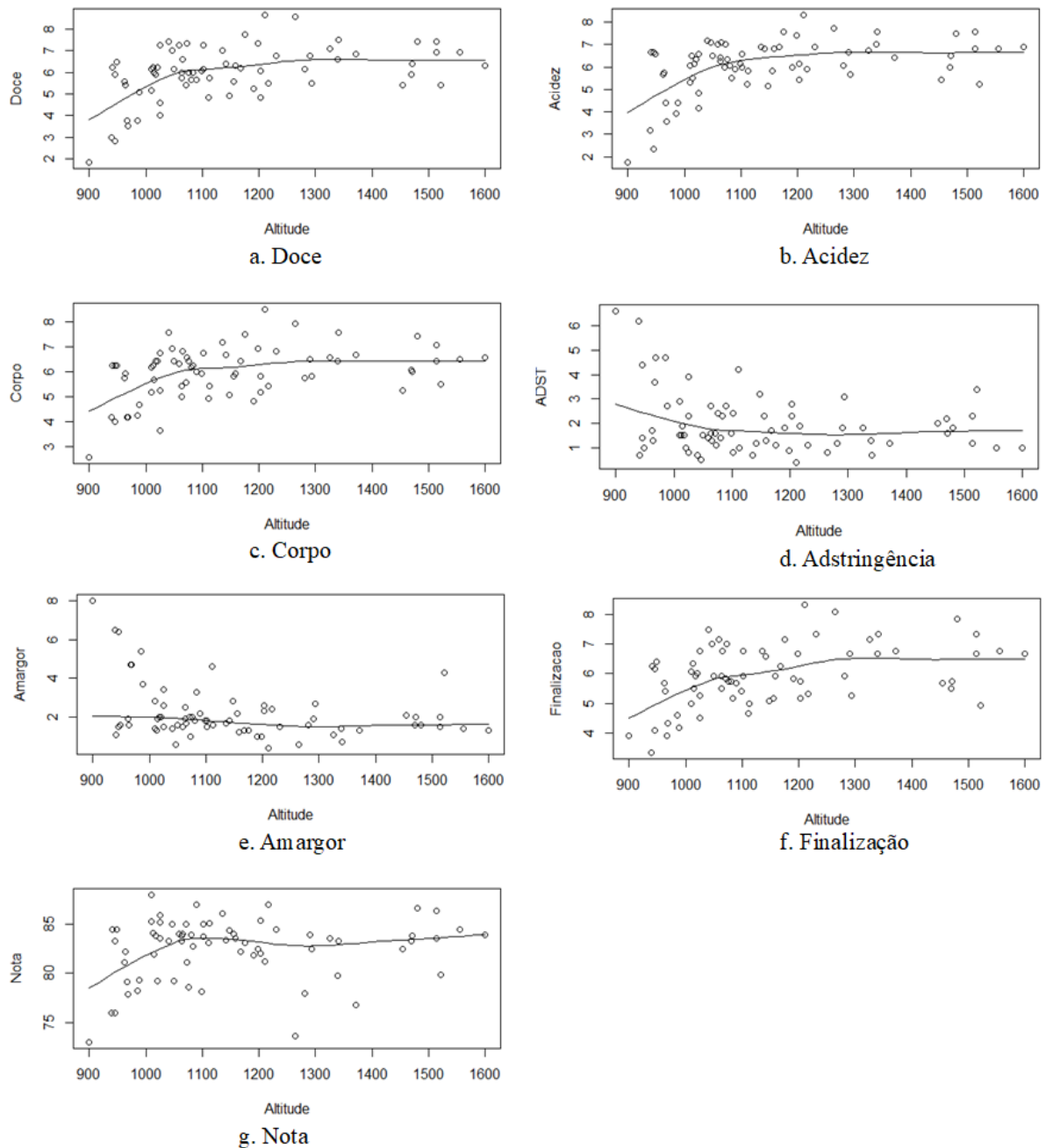
Figura 5. Mapas de distribuição dos atributos sensoriais do café descascado pelo território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 6 ilustra claramente a influência da altitude nos atributos sensoriais do café descascado. Observa-se uma relação direta e positiva: à medida que a altitude aumenta até aproximadamente 1100 metros, a intensidade dos atributos desejáveis como doçura, acidez, corpo, finalização e, conseqüentemente, a nota final, também se eleva. Acima de 1100m, a intensidade desses atributos tende a estabilizar. Em contrapartida, a adstringência e o amargor, atributos indesejáveis, demonstram uma tendência de redução de intensidade com o aumento da altitude. Esses achados corroboram amplamente com a literatura, que frequentemente associa altitudes elevadas à melhoria da qualidade sensorial do café. Por exemplo, Borém *et al.* (2019) identificaram maior qualidade em cafés via seca e via úmida colhidos acima de 1.050 m na região da Mantiqueira de Minas, e Scholz *et al.* (2018) afirmam que condições de altitude elevada, com temperaturas mais baixas, prolongam o período entre a floração e a maturação do grão, favorecendo a formação de precursores de aromas e sabores complexos definindo a originalidade de diferentes terroirs do estado do Paraná. Uma revisão sistemática abrangente por Ahmed *et al.* (2021) consolidou essa evidência, apontando o aumento da altitude como consistentemente associado à melhoria dos atributos sensoriais do café, o que se alinha perfeitamente aos resultados obtidos neste estudo para a Chapada Diamantina, ressaltando a altitude como um fator crucial na qualidade da bebida.

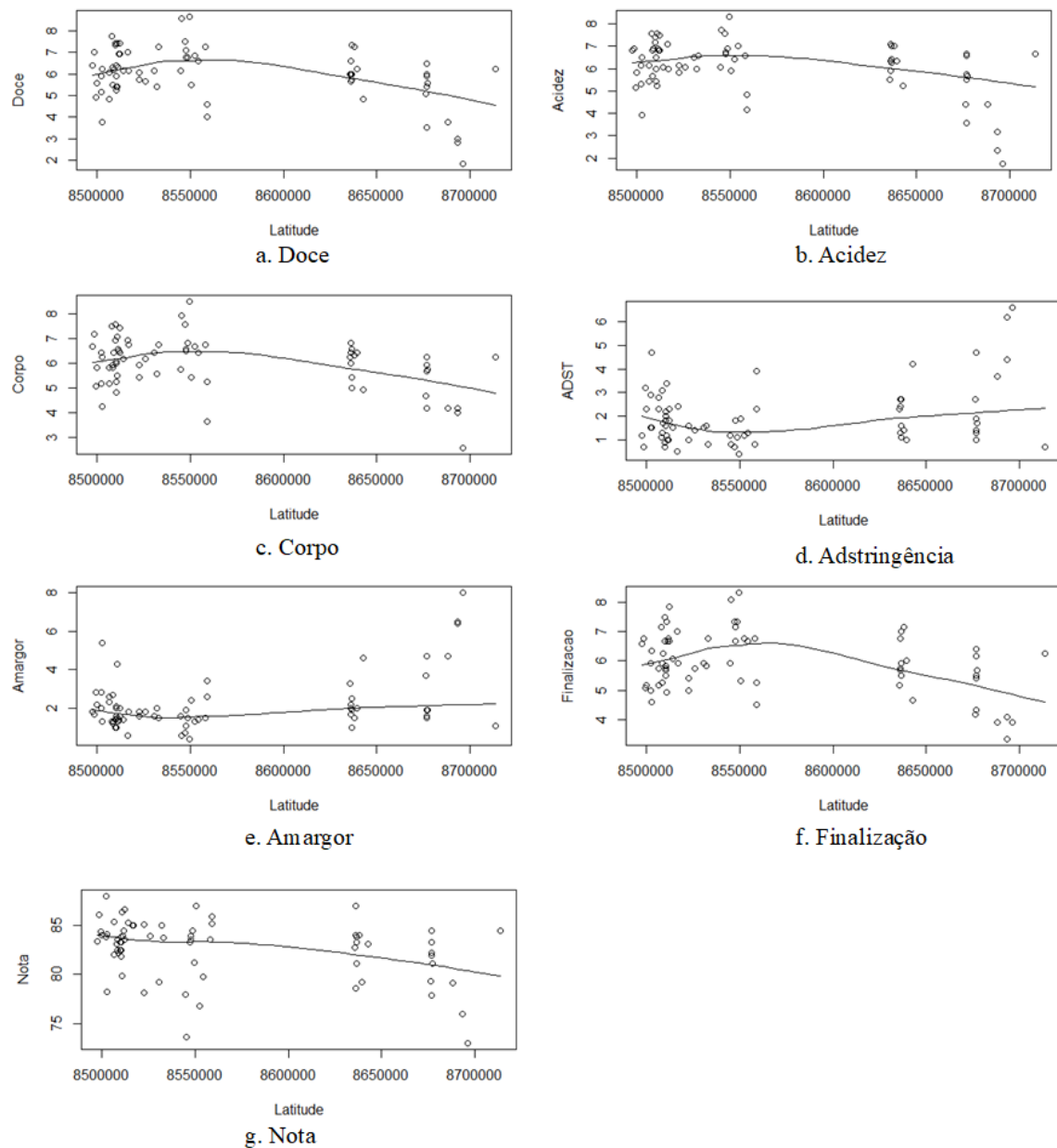
Figura 6. Variabilidade espacial de Altitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 7 demonstra o impacto da latitude na qualidade sensorial do café descascado. Observa-se que, à medida que a latitude aumenta (isto é, avançando para o norte da região de estudo), os atributos sensoriais desejáveis como doçura, acidez, corpo, finalização e nota final tendem a diminuir. Este padrão corrobora diretamente com a distribuição espacial apresentada na Figura 5, reforçando que as características sensoriais superiores dos cafés especiais da Chapada Diamantina são favorecidas por variáveis espaciais encontradas nas regiões Sul e Centro-Oeste, as quais proporcionam condições ideais para a formação da qualidade sensorial. Complementarmente, a adstringência e o amargor demonstram uma redução de intensidade em latitudes menores (regiões Sul e Centro-Oeste), onde os atributos positivos são mais proeminentes. A relação entre latitude e qualidade do café é complexa e pode interagir com outros fatores geográficos, como a altitude. Embora Barbosa *et al.* (2012) tenham avaliado essa relação em Minas Gerais, indicando que em latitudes mais altas, uma altitude menor seria necessária para uma boa pontuação, os resultados aqui apresentados para a Chapada Diamantina mostram que as maiores qualidades estão associadas a menores latitudes combinadas com maiores altitudes (conforme já discutido para a Figura 6). Esta particularidade ressalta que, embora a latitude seja um fator determinante, sua interação com a altitude na Chapada Diamantina cria um terroir específico, reforçando a importância de estudos regionais detalhados para compreender as complexas interações entre fatores geográficos e a qualidade final da bebida.

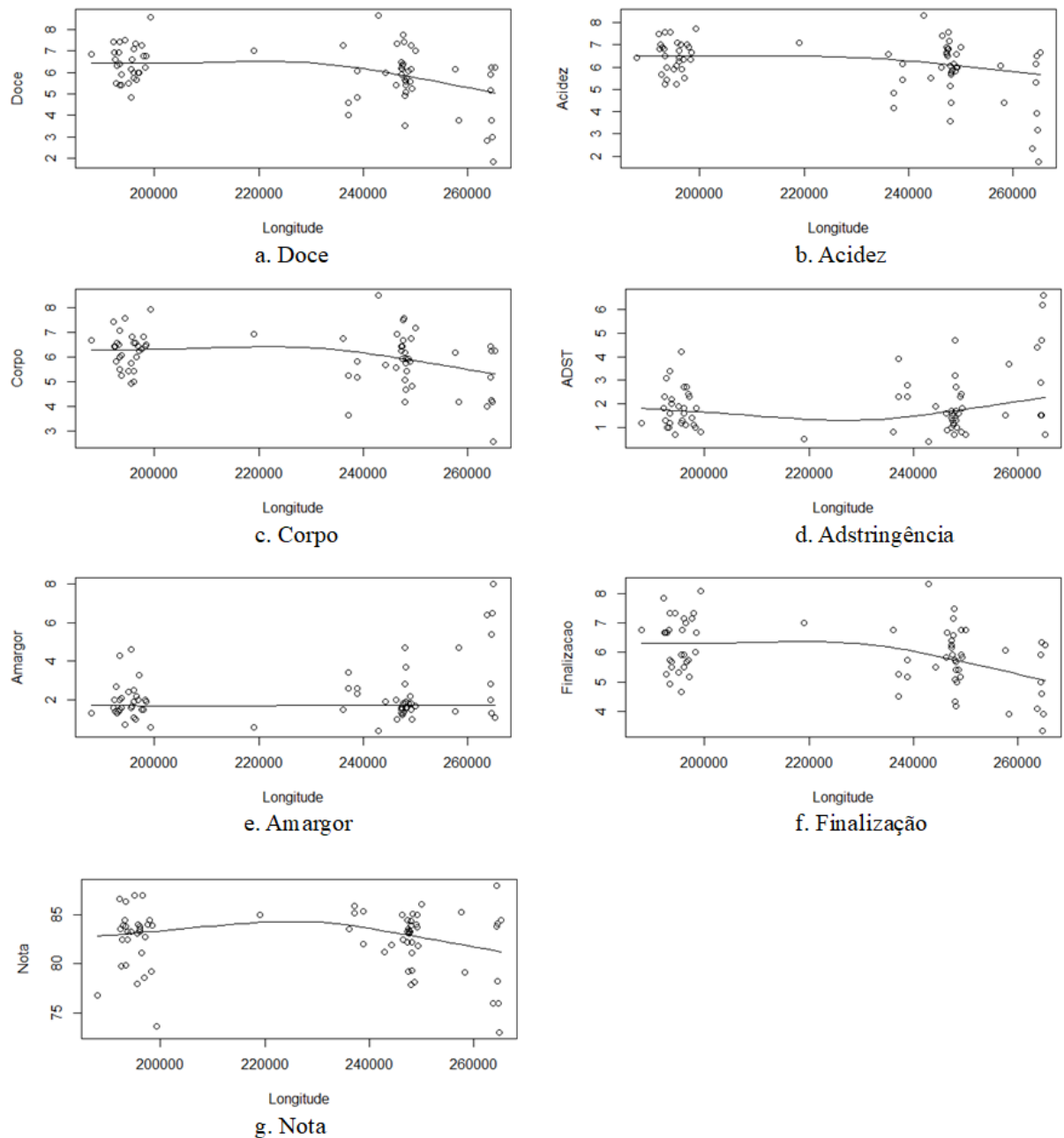
Figura 7. Variabilidade espacial de Latitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 8 detalha a variabilidade espacial dos atributos sensoriais em função da longitude na Chapada Diamantina. Observa-se um padrão mais complexo e variável para a longitude em comparação com a altitude e latitude. Para o atributo amargor, a intensidade se mantém relativamente constante no sentido leste-oeste. De maneira semelhante, a acidez também exibe uma distribuição quase constante ao longo do eixo leste-oeste. Contudo, os demais atributos sensoriais desejáveis, como doçura, corpo, finalização e a nota final, demonstram uma tendência de maior intensidade nas regiões a oeste da Chapada Diamantina, com uma diminuição progressiva dessa intensidade em direção ao leste da região. Esses padrões sugerem que, embora a longitude possa não ter uma influência tão marcada quanto a altitude e a latitude em todos os atributos, sua variação ainda contribui para a heterogeneidade espacial da qualidade do café na região. As diferenças observadas podem estar associadas a variações microclimáticas, tipos de solo ou práticas de cultivo que se correlacionam com as coordenadas longitudinais na área de estudo.

Figura 8. Variabilidade espacial de Longitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café descascado, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

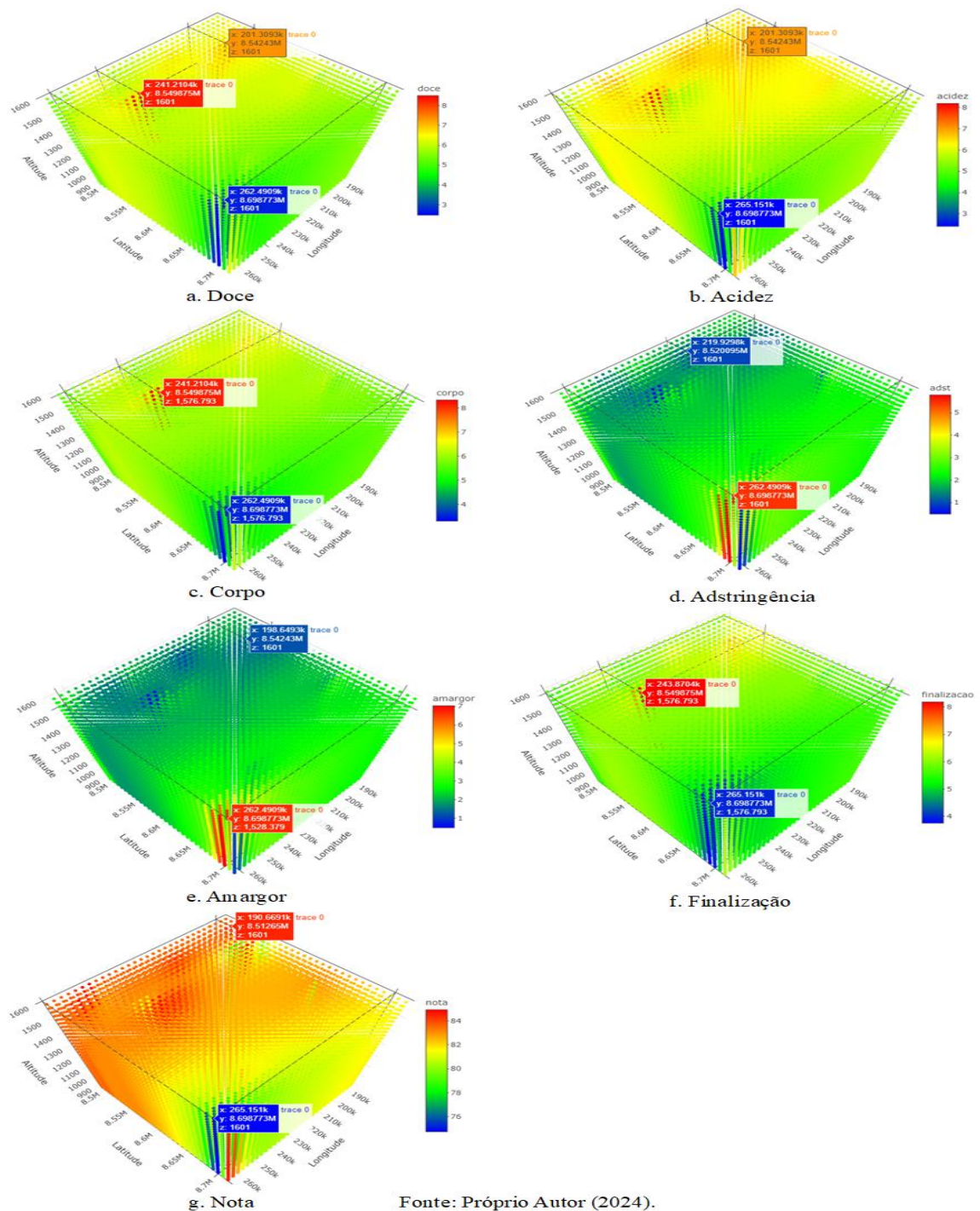


Fonte: Próprio Autor (2025).

A fim de integrar e consolidar a compreensão da influência combinada dos fatores geográficos, a análise geoestatística tridimensional (considerando Longitude, Latitude e Altitude) foi realizada, e seus resultados são apresentados na Figura 9. Esta abordagem auxilia na visualização e interpretação de como as variáveis sensoriais se manifestam e se distribuem complexamente no espaço geográfico da Chapada Diamantina.

De forma consistente com as análises individuais, a Figura 9 demonstra claramente que as menores intensidades dos atributos sensoriais desejáveis (doçura, acidez, corpo, finalização e nota final) são predominantes em valores maiores de latitude (região norte) e de longitude (região leste) da área de estudo, em todas as classes de altitude, visualmente representadas pela coloração azul nos mapas. Em contrapartida, os atributos indesejáveis, como amargor e adstringência – cuja alta intensidade prejudica a qualidade da bebida –, também se concentram nessas mesmas áreas de maior latitude (norte) e longitude (leste), manifestando-se com altas intensidades (coloração vermelha) independentemente da altitude. Inversamente, os atributos desejáveis, que conferem as maiores notas finais à bebida do café, são observados com maior intensidade nas regiões que tendem ao sul e centro-oeste, no sentido oeste da Chapada Diamantina. Tal padrão reforça a identificação das cidades de Bonito e Morro do Chapéu, localizadas predominantemente ao norte da Chapada Diamantina, como áreas com menor potencial para a produção de cafés de alta qualidade sensorial, devido à sua posição geográfica desfavorável em relação a esses múltiplos fatores.

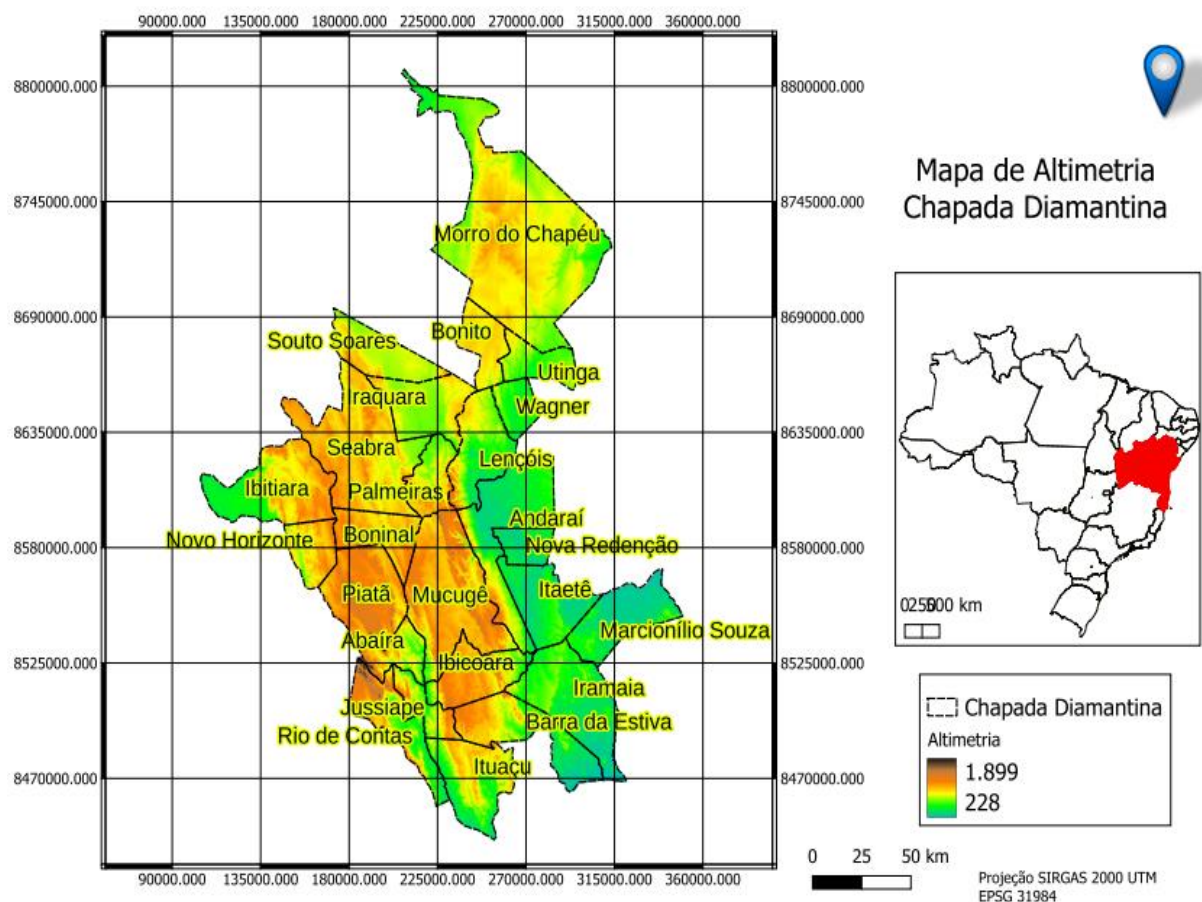
Figura 9. Análise tridimensional da distribuição dos atributos sensoriais do café descascado de acordo com a variabilidade espacial do território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2024).

Em síntese, os resultados obtidos consolidam a altitude como a principal variável geográfica a influenciar a qualidade sensorial dos cafés da Chapada Diamantina, seguida pela latitude e, em menor grau, pela longitude. Conforme ilustrado no mapa altimétrico da Figura 9, as regiões de maiores altitudes, localizadas no centro-oeste e sul da Chapada Diamantina, consistentemente produzem cafés com as maiores notas sensoriais. Em contraste, os municípios situados ao norte da região, como Bonito e Morro do Chapéu, caracterizam-se por altitudes menores, o que se correlaciona com a menor qualidade sensorial observada nesses locais. Esta evidência ressalta a importância crítica do relevo e da orografia na determinação do potencial de produção de cafés especiais nesta área.

Figura 10. Mapa altimétrico da Chapada Diamantina, Bahia.



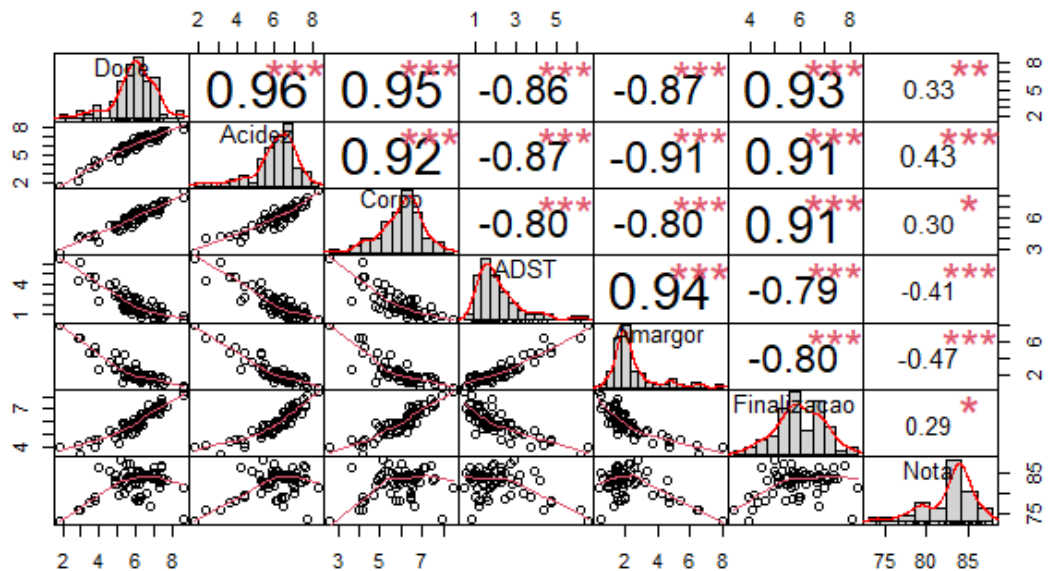
Fonte: Próprio Autor (2025).

A qualidade e a experiência sensorial do café são intrinsecamente determinadas pela interação complexa de seus atributos. Conforme demonstrado na Figura 11, os atributos sensoriais do café descascado exibem correlações significativas, evidenciando que não são percebidos isoladamente, mas em um perfil integrado, em que quanto mais próximo de um (1,0), maior a dependência entre os atributos e quanto mais próximo de menos um (-1,0), menor dependência entre essas características.

Especificamente, observa-se que doçura, acidez, corpo e finalização apresentam correlações positivas entre si e com a nota final, indicando que a alta intensidade desses atributos contribui para uma melhor qualidade sensorial da bebida. Em contrapartida, a adstringência e o amargor, reconhecidos por prejudicarem a qualidade da bebida, mostraram forte correlação positiva entre si (valor de 0,94) e, notavelmente, correlações negativas com todos os demais atributos desejáveis e com a nota final. Este padrão de correlação negativa reforça quantitativamente a natureza antagônica desses atributos em relação ao perfil de qualidade.

Tais interdependências entre os atributos sensoriais são consistentes com a literatura, corroborando estudos como o de Carvalho *et al.* (2016). Estes autores, ao avaliar a qualidade sensorial de 10 cultivares de *Coffea arabica* em três importantes regiões cafeeiras de Minas Gerais, também identificaram correlações entre diversos atributos sensoriais como componentes importantes na determinação da qualidade da bebida. É crucial ressaltar, contudo, que, embora essas correlações indiquem fortes associações, elas não estabelecem, por si só, relações de causa e efeito diretas, mas sim a manifestação de um perfil sensorial global.

Figura 11. Correlação dos atributos sensoriais do café descascado da Chapada Diamantina, Bahia.



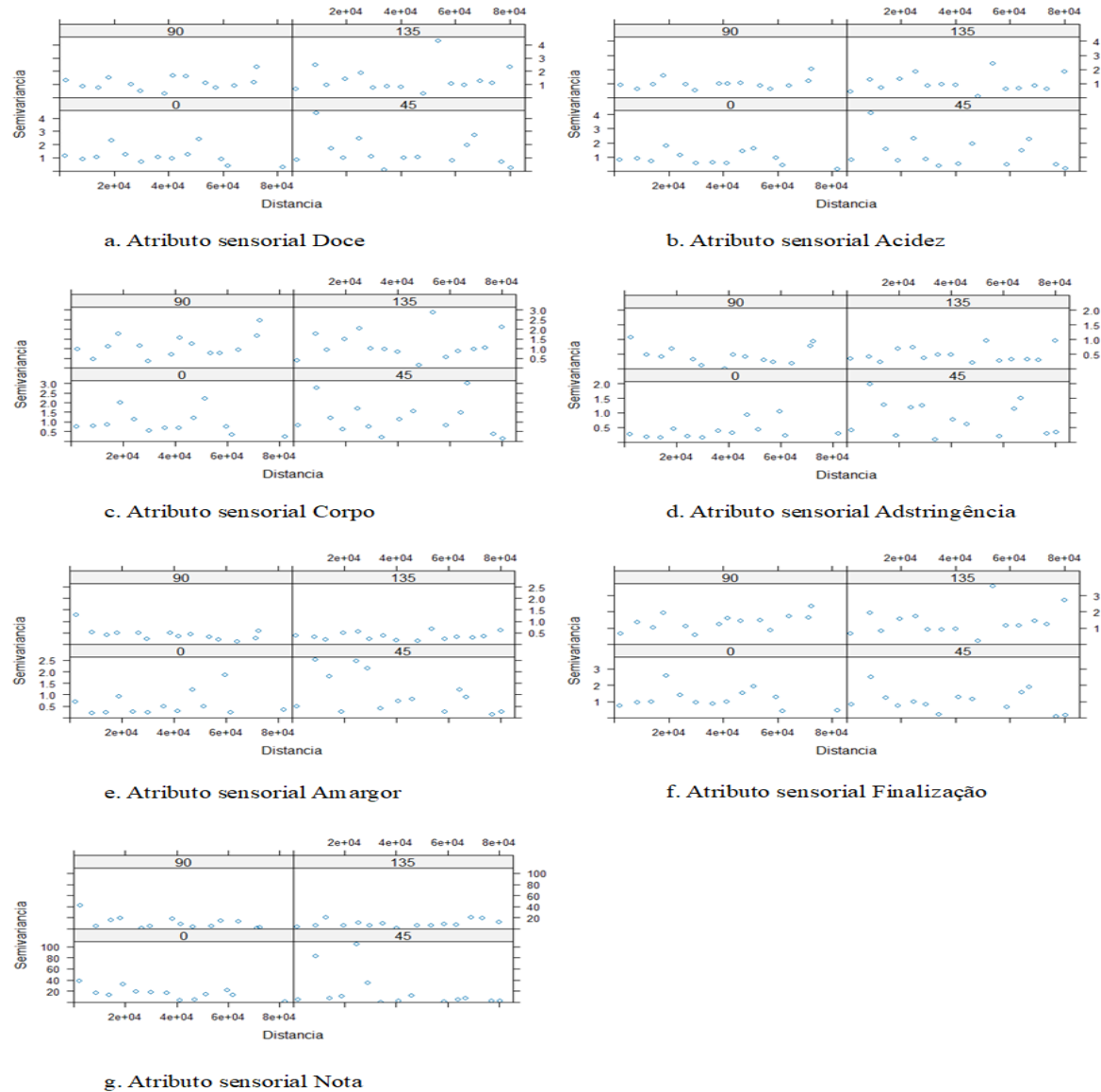
Fonte: Próprio Autor (2025).

Análise do Café Natural

De forma análoga aos resultados obtidos para o café descascado, a análise sensorial do café de processamento natural revelou padrões e conclusões semelhantes, embora com algumas variações pontuais.

Assim como observado para o café descascado, os variogramas do café natural (Figura 12) também apresentaram o “Efeito Pepita Pura”. Este comportamento reitera que a heterogeneidade das variáveis sensoriais ocorre predominantemente em escalas menores que a amostragem ou é inerentemente aleatória, e que a aparente ausência de dependência espacial estruturada nos variogramas pode ser atribuída à descontinuidade das áreas de produção de café dentro da Chapada Diamantina. Diante dessa característica dos dados e da região, a interpolação pelo Inverso da Distância Ponderada (IDW) foi novamente empregada para visualizar a distribuição espacial das variáveis sensoriais (Figura 13) e investigar a contribuição dos fatores geográficos (altitude, latitude e longitude) na formação do perfil sensorial (Figuras 14, 15 e 16).

Figura 12. Modelos de semivariogramas aleatórios das variáveis sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

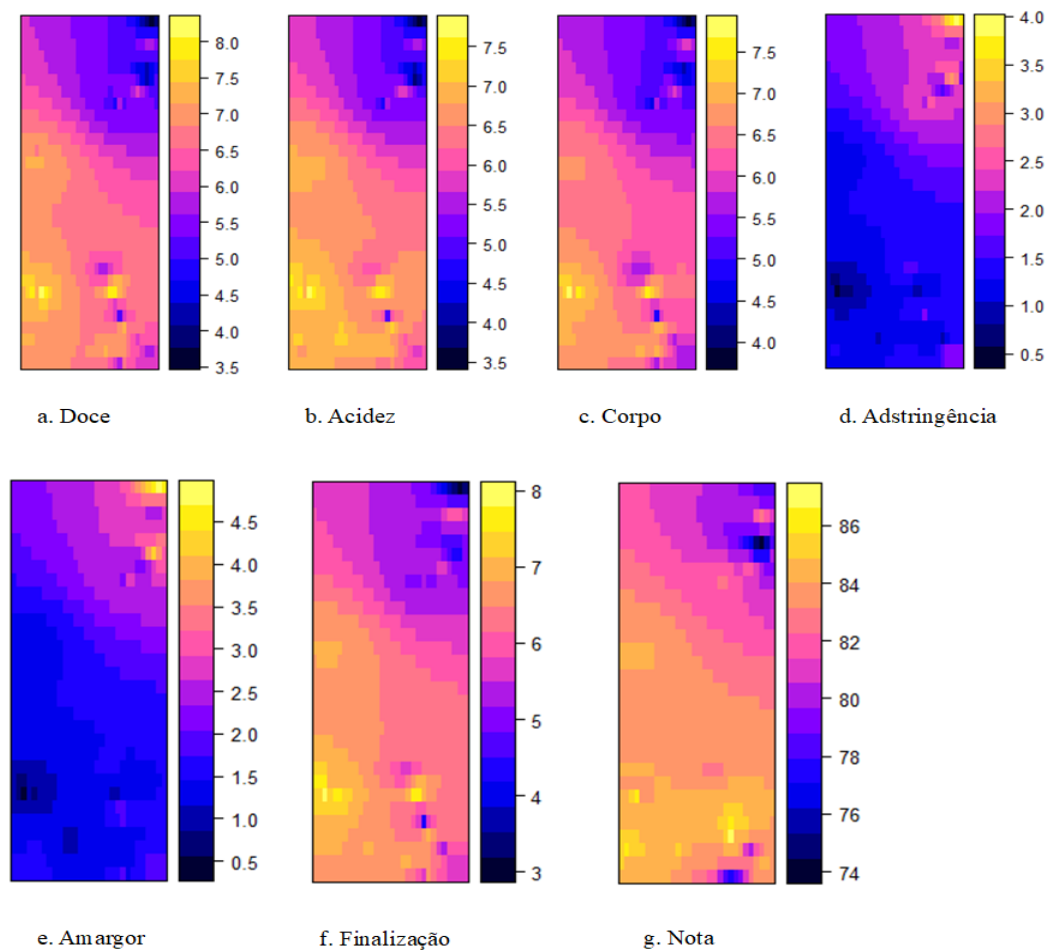


Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise dos mapas de distribuição espacial para o café natural (Figura 13) reitera os padrões geográficos já observados para o café descascado. Confirmou-se que os atributos sensoriais desejáveis — doçura (a), acidez (b), corpo (c) e finalização (f) — e, por conseguinte, as melhores notas finais (g), exibem maior intensidade nas regiões Sul e Centro-

Oeste da Chapada Diamantina (considerando longitude no eixo X e latitude no eixo Y). Em contrapartida, os atributos indesejáveis, como adstringência (d) e amargor (e), predominam com maior intensidade na região Norte da Chapada Diamantina, correlacionando-se com notas finais mais baixas nessas áreas. Essa consistência na distribuição espacial entre os dois tipos de processamento pós-colheita reforça a preeminência da influência das variáveis geográficas na determinação da qualidade sensorial dos cafés da região. As próximas análises detalham como a altitude, latitude e longitude atuam sobre esses atributos.

Figura 13. Mapas de distribuição dos atributos sensoriais do café natural pelo território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

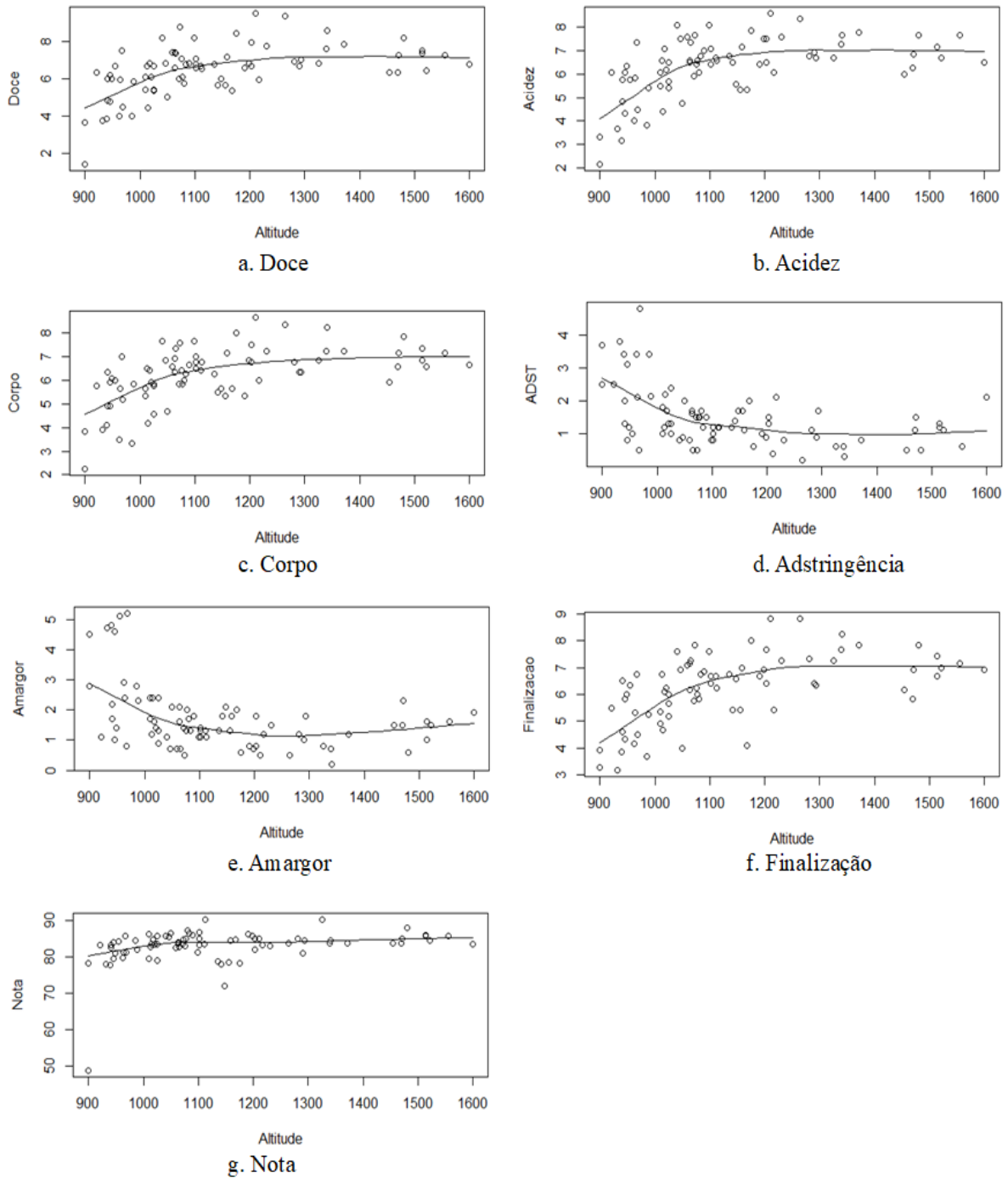


Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 14 comprova a influência da altitude na qualidade sensorial do café natural, seguindo um padrão muito similar ao observado para o café descascado. Os atributos de doçura, acidez e corpo demonstram um aumento de intensidade até aproximadamente 1100m de altitude, com tendência à estabilização em altitudes superiores. Para a finalização, a estabilização ocorre em torno de 1200m, e para a nota final, em 1050m, indicando pequenas variações nos patamares ótimos entre os atributos. No entanto, a intensidade da adstringência e do amargor diminui consistentemente com o aumento da altitude.

Essa relação positiva entre altitude e qualidade é amplamente reportado na literatura. Tieghi *et al.* (2024), por exemplo, investigaram cafés especiais de *Coffea arabica* processadas via seca e via úmida em diferentes regiões de Minas Gerais (Cerrado – Mata de Savana, Matas de Minas e Sul de Minas - Mata Atlântica) e concluíram que a altitude é um dos principais fatores que contribuem para a diferenciação da qualidade, especialmente para o café processado via seca. A explicação para este fenômeno reside nas condições microclimáticas das altitudes elevadas, assim, como observaram Quesada-Román *et al.* (2022) para cafés da Costa Rica que temperaturas mais baixas nessas localidades promovem uma maturação mais lenta dos grãos. Este período prolongado favorece um maior acúmulo de precursores de aroma e sabor, resultando em uma complexidade sensorial superior na bebida. A consistência desses resultados com os de estudos anteriores reforça a altitude como um fator geográfico primordial na determinação do perfil de qualidade dos cafés da Chapada Diamantina, independentemente do método de processamento.

Figura 14. Variabilidade espacial de Altitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

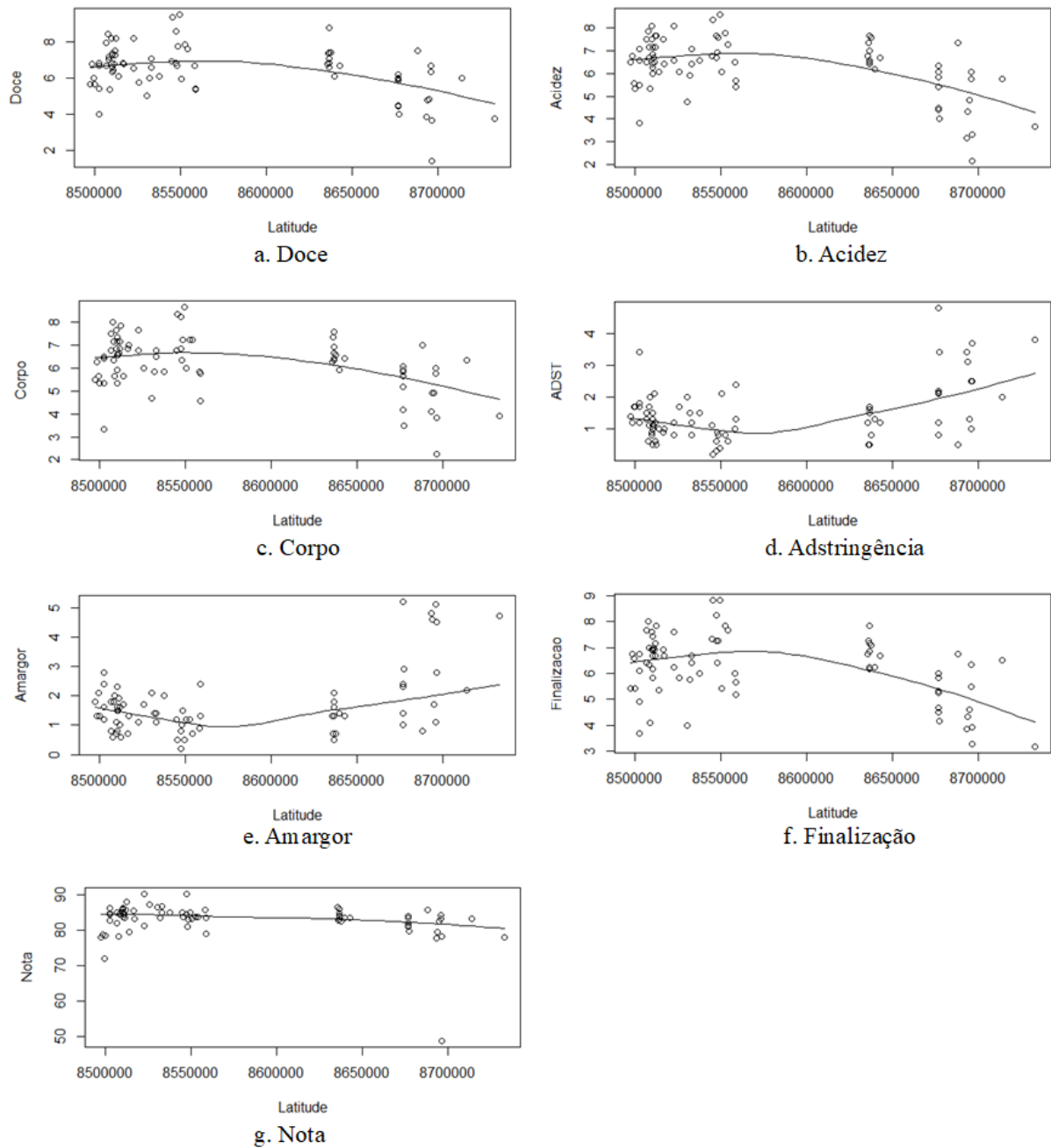


Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise da Figura 15 revela que a latitude exerce uma influência consistente na qualidade sensorial do café natural, com padrões que espelham os observados para o café descascado. Confirma-se que o aumento da latitude (direção norte da região) correlaciona-se com a diminuição da intensidade dos atributos sensoriais desejáveis — doçura, acidez, corpo, finalização e nota final. Isso reitera que as características de alta qualidade em cafés especiais se concentram nas regiões Sul e Centro-Oeste da Chapada Diamantina, onde a combinação de menores latitudes e altitudes elevadas proporciona condições altamente favoráveis para o desenvolvimento de um perfil sensorial superior. Inversamente, a adstringência e o amargor tendem a apresentar menor intensidade em latitudes mais baixas (regiões Sul e Centro-Oeste), onde a qualidade geral é mais alta.

A interação entre latitude e altitude na determinação da qualidade do café é complexa e regionalmente específica. Embora Barbosa *et al.* (2012) tenham demonstrado que no estado de Minas Gerais a relação entre altitude e pontuação de qualidade variava em função da latitude — sugerindo que altitudes mais baixas poderiam resultar em boas pontuações em latitudes mais elevadas —, os resultados do presente estudo na Chapada Diamantina indicam uma dinâmica particular. Aqui, as maiores altitudes e, consequentemente, a melhor qualidade sensorial, estão associadas às latitudes mais baixas (Sul e Centro-Oeste). Essa distinção geográfica sublinha que a especificidade do *terroir* de cada região, incluindo a Chapada Diamantina, molda a forma como os fatores geográficos interagem para influenciar a qualidade final da bebida, justificando a necessidade de estudos regionalizados para uma compreensão aprofundada. É precisamente a identificação e a caracterização dessas condições específicas de *terroir* que são fundamentais para a criação e o reconhecimento de uma Denominação de Origem (DO), agregando valor e identidade aos cafés produzidos na Chapada Diamantina com base em sua singularidade geográfica.

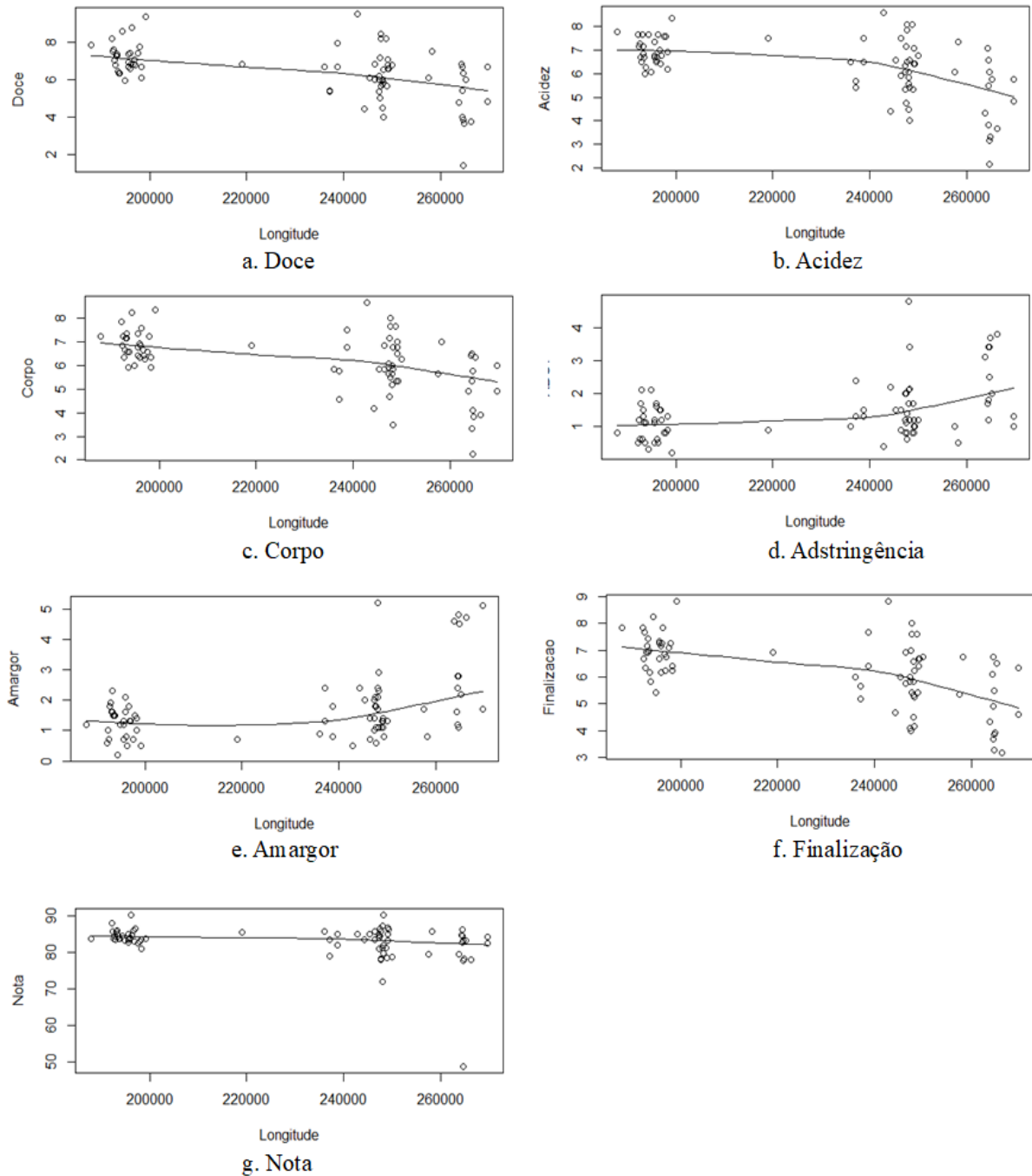
Figura 15. Variabilidade espacial de Latitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2025).

A Figura 16 ilustra a variabilidade espacial dos atributos sensoriais do café natural em relação à longitude. De forma consistente com o café descascado, observa-se que, à medida que a longitude aumenta (direção leste), a intensidade dos atributos desejáveis como doçura, acidez, corpo e finalização diminui. Em contrapartida, a adstringência e o amargor exibem um aumento de intensidade no sentido leste, reiterando o padrão já identificado para o café descascado. Curiosamente, a nota final do café natural demonstra uma tendência de se manter mais constante ao longo do eixo leste-oeste da Chapada Diamantina, o que difere ligeiramente do padrão observado para o café descascado, onde havia uma tendência de maior intensidade a oeste. Esses resultados para a longitude, para ambos os processamentos, sugerem que fatores microclimáticos, edáficos ou de manejo associados a essas coordenadas podem influenciar o perfil sensorial. Embora a longitude possa não ser tão determinante quanto a altitude e a latitude para a qualidade geral, suas variações contribuem para a heterogeneidade espacial e a singularidade dos cafés produzidos em diferentes áreas da região.

Figura 16. Variabilidade espacial de Longitude do território da Chapada Diamantina que influencia nos atributos sensoriais do café natural, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).

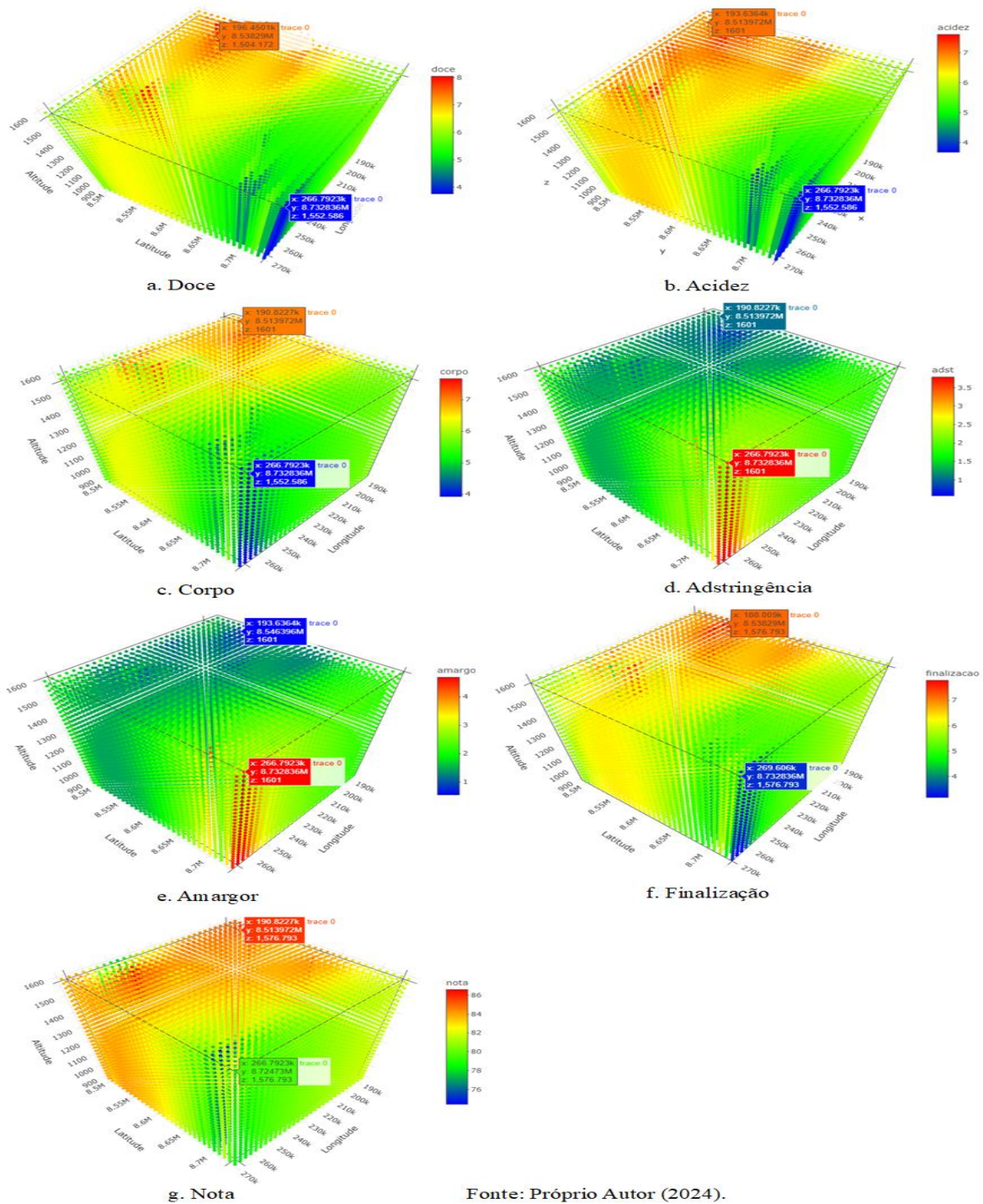


Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise geoestatística tridimensional do café natural, que integra os efeitos de longitude, latitude e altitude (Figura 17), oferece uma visão consolidada do comportamento das variáveis sensoriais no meio geográfico da Chapada Diamantina. De maneira consistente com os resultados do café descascado, a Figura 16 demonstra que as menores intensidades dos atributos sensoriais desejáveis — doçura, acidez, corpo, finalização e nota final — são predominantes em regiões de alta latitude (norte) e longitude (leste), representadas visualmente pela coloração azul. Essa distribuição espacial se sobrepõe às áreas onde se localizam cidades como Bonito e Morro do Chapéu, confirmando-as como zonas de menor qualidade sensorial, tal como identificado nas análises do café descascado. Inversamente, as maiores intensidades dos atributos desejáveis (coloração vermelha) são observadas em regiões de baixa latitude e longitude (centro-oeste e sul), que se correlacionam com as áreas de maiores altitudes.

A convergência dessas evidências geográficas tridimensionais reafirma a forte influência dos fatores ambientais na qualidade intrínseca do café. Corroborando estes achados, a revisão sistemática de Ahmed *et al.* (2021) destaca que a variação de latitude e longitude em distintas áreas geográficas de cultivo de café impacta diretamente múltiplos metabólitos primários (como lipídios, açúcares e aminoácidos), os quais são precursores dos atributos sensoriais. Além disso, o mesmo estudo, ao compilar evidências de doze artigos, ressalta a associação consistente entre o cultivo em altitudes elevadas e a melhoria dos atributos sensoriais. O presente trabalho, ao empregar análises geoestatísticas, não apenas corrobora estas relações já estabelecidas, mas as consolida ao demonstrar empiricamente a influência quantificável dessas variáveis geográficas na qualidade sensorial final do café na Chapada Diamantina.

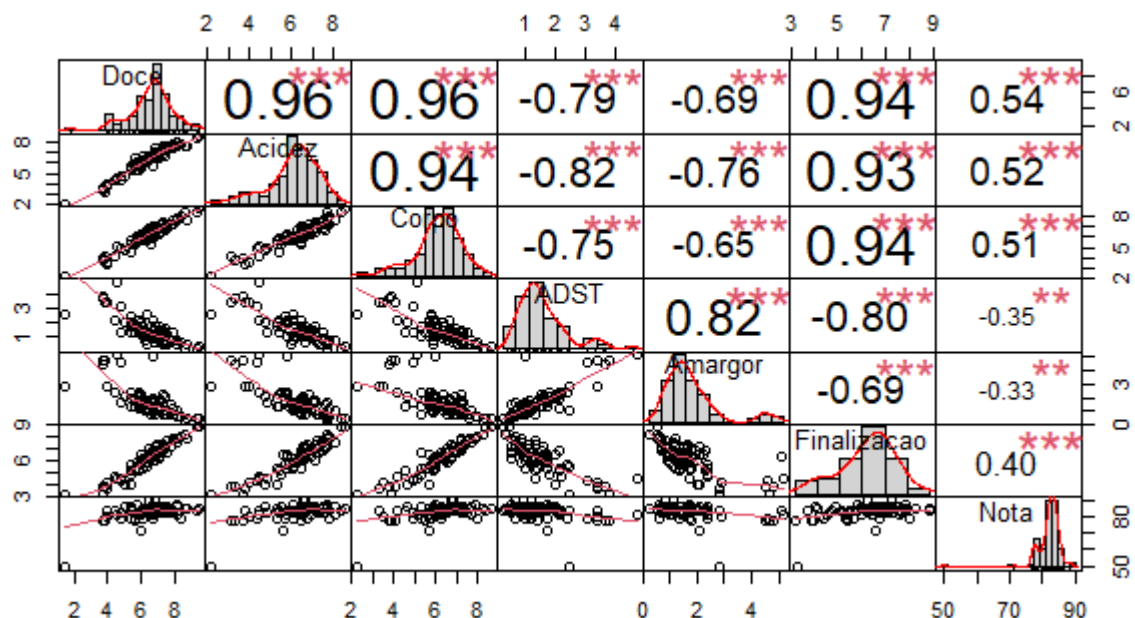
Figura 17. Análise tridimensional da distribuição dos atributos sensoriais do café natural de acordo com a variabilidade espacial do território da Chapada Diamantina, sendo os atributos sensoriais: Doce (a), Acidez (b), Corpo (c), Adstringência (d), Amargor (e), Finalização (f) e Nota Final (g).



Fonte: Próprio Autor (2024).

A análise da correlação entre os atributos sensoriais do café natural (Figura 18) reafirma os padrões de interdependência já observados para o café descascado. Confirma-se que os atributos desejáveis como doçura, acidez, corpo e finalização, assim como a nota final, apresentam correlações positivas entre si. Em contrapartida, a adstringência e o amargor demonstram forte correlação positiva entre si e, consistentemente, correlações negativas com os atributos de qualidade e a nota final. Este comportamento de correlação entre os atributos sensoriais do café, independentemente do tipo de processamento (descascado ou natural), é recorrente na literatura, como discutido previamente com base em Carvalho *et al.* (2016). A consistência desses resultados reforça que a qualidade final da bebida é determinada pela complexa interação e equilíbrio desses múltiplos atributos sensoriais, não sendo a percepção de um isolada das demais. Contudo, é fundamental reiterar que, embora essas correlações indiquem associações robustas, elas descrevem relações estatísticas e não implicam necessariamente em causalidade direta entre os atributos.

Figura 18. Correlação dos atributos sensoriais do café natural da Chapada Diamantina, Bahia.



Fonte: Próprio Autor (2025).

4 CONCLUSÃO

A aplicação da geoestatística revelou-se uma ferramenta indispensável para analisar e interpretar a variabilidade espacial dos atributos sensoriais do café e, fundamentalmente, compreender como o ambiente geográfico da Chapada Diamantina influencia a qualidade final da bebida, tanto para o café descascado quanto para o natural.

Os resultados demonstraram que a distribuição dos atributos sensoriais na região não é aleatória, mas sim espacialmente estruturada. Identificou-se que cafés de perfil sensorial mais equilibrado e desejável, caracterizados pela maior presença de doçura, acidez, corpo, finalização e notas finais elevadas, estão predominantemente associados aos municípios produtores localizados nas regiões Sul e Centro-Oeste, especialmente em altitudes acima de 1100 metros. Em contrapartida, as regiões ao norte da Chapada Diamantina, onde as altitudes tendem a ser menores, observou-se uma maior intensidade de adstringência e amargor, resultando em uma diminuição significativa da qualidade da bebida e, conseqüentemente, em notas sensoriais inferiores. A análise tridimensional consolidou esses achados, evidenciando a complexa interação entre latitude, longitude e altitude no perfil sensorial do café.

A consistência desses padrões geográficos entre os cafés de processamento descascado e natural sublinha a preeminência dos fatores de terroir (altitude e latitude, em particular) na determinação da qualidade intrínseca do café da região, sugerindo que as características ambientais exercem uma influência mais marcante do que as diferenças nos métodos de processamento pós-colheita na distribuição espacial da qualidade.

Dessa forma, este estudo comprova que a geoestatística é uma ferramenta valiosa não apenas para modelar e inferir padrões espaciais de atributos sensoriais, mas também para fornecer subsídios científicos que comprovam a ligação indissociável entre a qualidade dos produtos e sua região de origem, fator crítico para a proteção, valorização e reconhecimento formal de produtos com Indicação Geográfica, como a DO de cafés da Chapada Diamantina.

A script em linguagem R utilizada para essas análises, disponibilizada em anexo, representa uma contribuição metodológica valiosa que pode ser replicada e adaptada em outros estudos de Indicação Geográfica, tanto para o café quanto para outros produtos alimentícios que necessitam demonstrar que sua qualidade ou reputação são intrinsecamente

atribuídas ao seu ambiente geográfico, associadas a características únicas devido à sua origem e tradição na região produtora.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG, CNPq e INCT-CAFÉ pelos auxílios financeiros, à UFMG por disponibilizar laboratórios de química e à UESB e Associação Aliança dos Cafeicultores da Chapada Diamantina pelo fornecimento da matéria-prima (café em grão cru).

REFERÊNCIAS

AHMED, S. *et al.*, Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the Effects of Environmental and Management Variation on Secondary Metabolites and Sensory Attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 2021. <https://DOI=10.3389/fpls.2021.708013>

BARBOSA, J. N., BOREM, F. M., CIRILLO, M. A., MALTA, M. R., ALVARENGA, A. A.; ALVES, H.M.R. (2012) Coffee Quality and Its Interactions with Environmental Factors in Minas Gerais. *Brazil Journal of Agricultural Science*, 4, 181-190. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n5p181>

BAQUETA *et al.*, 2019. Brazilian Coffee Blends: A Simple and Fast Method by Near-Infrared Spectroscopy for the Determination of the Sensory Attributes Elicited in Professional Coffee Cupping. *Journal of food science*.

BORÉM *et al.*, 2020. Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*. v. 35, p.12552. <https://doi.org/10.1111/joss.12552>.

BRUCH, K. L.; VITROLLES, D.; LOCATELLI, L. Estudo de caso: IP Vale dos Vinhedos, IP Paraty e IP Vale do Submédio São Francisco. In: CERDAN, C. M.; BRUCH, K. L.; SILVA, A. L. (Org.). *Curso de propriedade intelectual e inovação no agronegócio*. Florianópolis, SC: SEaD/UFSC/FAPEU, 2010. Módulo II – Indicação Geográfica. MAPA.

CARVALHO *et al.*, 2016. Relationship between the sensory attributes and the quality of coffee in different environments. *African Journal of Agricultural Research*. Vol.11(38), pp. 3607-3614

GONÇALVES, A. N. S. Café da Chapada Diamantina, Bahia: qualidade da bebida e relações com o ambiente. Dissertação de mestrado - Programa De Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia. Vitória da Conquista, Bahia, 71 p., 2022.

INPI, Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Manual de Indicações Geográficas. 2021. Disponível em: <<https://manualdeig.inpi.gov.br/projects/manual-de-indicacoes-geograficas/wiki#Anexo-Guia-do-Peticionamento-Eletr%C3%B4nico-Sistema-e-IG>>. Acesso: 10 out. 2024.

PIMENTA, C. J.; ANGÉLICO, C. L.; CHALFOUN, S. M. Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 42, p. 337-349, ago. 2018.

MOSER, M.; LEPAGE, M.; PINEAU, N.; FILLION, L.; RYTZ, A. Replicates in sensory profiling: Quantification of the impact of moving from two to one assessment. *Food Quality and Preference*, v. 65, p. 185-190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.002>.

PEBESMA, E. J.; WESSELING, C. G. Gstat: a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, v. 24, p.17 – 31, 1998.

QUESADA-ROMÁN, A.; QUIRÓS-ARIAS, L.; ZAMORA-PEREIRA, J.C. Interactions between Geomorphology and Production Chain of High-Quality Coffee in Costa Rica. *Sustainability* 2022, 14, 5265. <https://doi.org/10.3390/su14095265>

R CORE TEAM (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>.

RSTUDIO TEAM. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>, 2024.

SCALON, J. D. *Análise com dados espaciais com aplicações em R*. Lavras: Editora UFLA, 2024.

SCHOLZ, M. B. S.; KITZBERGER, C. S. G.; PRUDENCIO, S. H.; SILVA, R. S. S. F. The typicity of coffees from different terroirs determined by groups of physico-chemical and sensory variables and multiple factor analysis, *Food Research International*, v. 114, p. 72-80, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.058>.

SCHUIT, P., MOAT, J., GOLE, T. W., CHALLA, Z. K., TORZ, J., MACATONIA, S., CRUZ, G. & DAVIS, A. P. (2021). The potential for income improvement and biodiversity

conservation via specialty coffee in Ethiopia. PeerJ, 9, Article e10621. <https://doi.org/10.7717/peerj.10621>.

TIEGHI, H. *et al.* Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans, Food Research International, v 186, p. 114346, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114346>.

YAMAMOTO, J. K. *Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais*. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020.

ANEXO

Protocolo Geoestatístico para Análise Espacial da Qualidade de Café em através do software R

Este protocolo descreve os procedimentos utilizados em linguagem R para a análise geoestatística de atributos sensoriais do café, visando compreender sua variabilidade espacial e a influência de fatores geográficos. As etapas cobrem desde a importação de dados até a visualização de padrões espaciais em 2D e 3D, bem como análises exploratórias de correlação.

Pacotes Essenciais: Certifique-se de que os seguintes pacotes estejam instalados e carregados no R antes de iniciar: `install.packages(c("gstat", "sp", "sf", "plotly", "RColorBrewer", "PerformanceAnalytics", "lattice"))` `library(gstat)` `library(sp)` `library(sf)` `library(plotly)` `library(RColorBrewer)` `library(PerformanceAnalytics)` `library(lattice)`

1. Preparação e Carregamento dos Dados

- **Objetivo:** Importar os dados brutos de qualidade de café (atributos sensoriais e coordenadas geográficas) para o ambiente R e prepará-los para análises espaciais.
- **Dados de Entrada:** Arquivo de dados tabulares (e.g., .csv ou .xlsx) contendo colunas para Latitude, Longitude, Altitude e os diferentes atributos sensoriais (Doçura, Acidez, Corpo, Finalização, Adstringência, Amargor, Nota Final).
- **Procedimento:**

- Carregar o arquivo de dados em um data.frame. (Assumimos laisnatural e laiscd como os data.frames contendo os dados do café natural e descascado, respectivamente).
- Converter o data.frame em um objeto SpatialPointsDataFrame, definindo as colunas de longitude e latitude como coordenadas espaciais.

- **Código (Exemplo para um atributo, Doce):**

R

```
# Assumindo que 'laisnatural' é o seu data.frame carregado
g <- data.frame(x = laisnatural$Longitude, y = laisnatural$Latitude, v = laisnatural$Doce)
coordinates(g) <- ~x+y # Cria o objeto SpatialPointsDataFrame
```

- **Verificações Iniciais:**

- class(g): Verifica se o objeto foi corretamente convertido para SpatialPointsDataFrame.
- summary(g): Obtém estatísticas descritivas básicas.
- bubble(g, "v", col="red", main="Distribuição de Doçura", xlab="Longitude", ylab="Latitude"): Visualiza a distribuição espacial do atributo.
- hist(g\$v, xlab="Nível de Doçura", main="Histograma de Doçura"): Analisa a distribuição de frequência do atributo.
- qqnorm(g\$v): Avalia a normalidade da distribuição do atributo. (A proximidade com a normalidade é desejável para algumas técnicas geoestatísticas, embora o IDW não seja estritamente dependente dela).

2. Análise Variográfica (Avaliação da Dependência Espacial)

- **Objetivo:** Calcular o variograma experimental para cada atributo sensorial para caracterizar sua variabilidade e dependência espacial.
- **Procedimento:**
 - Calcular o variograma experimental para diferentes direções (variograma direcional/anisotrópico) para verificar a presença de tendências ou anisotropias.
 - Calcular o variograma omnidirecional (sem considerar direções específicas) para uma visão geral da dependência espacial.

- **Funções:** `variogram()` do pacote `gstat`.
- **Parâmetros Chave:**
 - `alpha`: Define as direções para o variograma direcional (e.g., `c(0, 45, 90, 135)`).
 - `cutoff`: Distância máxima para a qual a semivariância é calculada. Definir um `cutoff` adequado (e.g., 40000 metros) é crucial para evitar distorções por pontos muito distantes.
- **Interpretação:**
 - A observação de um "Efeito Pepita Pura" (semivariância constante e alta mesmo em distâncias pequenas) em todas as direções indica a ausência de dependência espacial estruturada na escala de amostragem. Isso pode ser devido à variabilidade ocorrer em distâncias menores que o menor espaçamento amostral ou a descontinuidades no espaço de estudo (como "vazios" na produção).
- **Código (Exemplo para Doce):**

R

```
# Variograma direcional (para verificar anisotropia)
v.direcional <- variogram(v ~ 1, data=g, alpha=c(0, 45, 90, 135), cressie=FALSE)
plot(v.direcional, xlab="Distância", ylab="Semivariância", main="Variograma Direcional do Doce")
```

```
# Variograma omnidirecional (para avaliar efeito pepita)
v.omnidirecional <- variogram(v ~ 1, cutoff=40000, data=g, cressie=FALSE)
plot(v.omnidirecional, xlab="Distância", ylab="Semivariância", main="Variograma Omnidirecional do Doce")
```

3. Interpolação Espacial 2D (Inverso da Distância Ponderada - IDW)

- **Objetivo:** Estimar os valores dos atributos sensoriais em locais não amostrados, gerando mapas de distribuição espacial. O IDW é escolhido quando há ausência de dependência espacial estruturada (Efeito Pepita Pura) ou quando a modelagem do variograma é inviável, mas a proximidade dos pontos ainda é considerada relevante.
- **Funções:** `krige()` (sim, o `krige` do `gstat` pode ser usado para IDW, definindo `model = NULL` ou `idp` diretamente) ou `idw()`. A função `idw()` é mais explícita para este método.

- **Procedimento:**

- Criar uma grade de pontos vazios (grid2D) que cobrirá toda a área de interesse.
- Aplicar a interpolação IDW utilizando a fórmula do atributo, os dados amostrados e a grade de predição.
- Visualizar o mapa resultante.

- **Parâmetros Chave:**

- formula: Define o atributo a ser interpolado (e.g., $v \sim 1$ para interpolação sem tendência).
- locations: O SpatialPointsDataFrame com os dados amostrados.
- newdata: A grade de predição (grid2D).
- idp: O expoente da distância para o IDW (o padrão geralmente é 2, mas pode ser ajustado).

- **Código (Exemplo para Doce):**

R

Criação da grade de predição 2D

rangex <- seq(from = min(g\$x) - 1, to = max(g\$x) + 1, length = 100) # Aumentar length para maior resolução

rangey <- seq(from = min(g\$y) - 1, to = max(g\$y) + 1, length = 100) # Aumentar length

grid2D <- expand.grid(x = rangex, y = rangey)

gridded(grid2D) = ~x+y

Interpolação IDW

g.idw <- idw(v ~ 1, g, grid2D, idp = 2) # idp=2 é o padrão, pode ser ajustado

summary(g.idw)

Construção e visualização do mapa (usando spplot para objetos sp)

spplot(g.idw["var1.pred"], main="Mapa de Distribuição do Doce (IDW)")

Ou para maior controle de visualização com ggplot2 (requer conversão)

library(raster)

idw_raster <- raster(g.idw["var1.pred"])

library(ggplot2)

ggplot() +

geom_raster(data = as.data.frame(idw_raster, xy=TRUE), aes(x=x, y=y, fill=var1.pred)) +

scale_fill_gradientn(colors = c("blue", "cyan", "yellow", "red")) +

coord_equal() +

labs(title = "Mapa de Distribuição do Doce (IDW)", x = "Longitude", y = "Latitude", fill = "Doce") +

theme_minimal()

4. Análise Geoestatística 3D (Interpolação de Volume)

- **Objetivo:** Visualizar a distribuição espacial dos atributos sensoriais considerando as três dimensões geográficas (Longitude, Latitude, Altitude), permitindo identificar padrões em volume.
- **Funções:** `gstat()` e `predict()` do pacote `gstat` para a interpolação; `plot_ly()` do pacote `plotly` e `wireframe()` do pacote `lattice` para visualização 3D.
- **Procedimento:**
 - Criar um objeto `gstat` que define a fórmula de interpolação e os locais (x, y, z).
 - Criar uma grade tridimensional (`grid3D`) que abrange as extensões de Longitude, Latitude e Altitude dos dados.
 - Realizar a predição dos valores do atributo nessa grade 3D.
 - Gerar gráficos 3D interativos (com `plotly`) ou estáticos (com `lattice`) para visualizar a distribuição dos valores no espaço 3D.
- **Parâmetros Chave:**
 - `locations`: Define as três coordenadas ($\sim x + y + z$).
 - `grid3D`: A grade de predição tridimensional.
- **Código (Exemplo para Doce):**

R

Preparação dos dados 3D

```
data3D <- data.frame(x = laisnatural$Longitude, y = laisnatural$Latitude,
                    z = laisnatural$Altitude, v = laisnatural$Doce)
```

Criação do modelo `gstat` para interpolação 3D (ainda usando IDW, pois kriging exigiria modelo de variograma 3D)

Para IDW 3D, a estrutura é a mesma, mas os dados de localização e a grade são 3D.

No seu script, a chamada `predict(kriging_model, grid3D)` é uma interpolação.

Se você não ajustou um variograma 3D, isso se comporta mais como IDW 3D.

Para um IDW explícito em 3D, o `gstat::idw` pode ser usado, mas seu método com `predict` é válido.

```
kriging_model <- gstat(id = "v", formula = v ~ 1, locations = ~x + y + z, data = data3D)
```

Criação da grade de predição 3D (ajustar `length` para resolução)

```
rangex <- seq(from = min(data3D$x) - 1, to = max(data3D$x) + 1, length = 20)
```

```
rangey <- seq(from = min(data3D$y) - 1, to = max(data3D$y) + 1, length = 20)
```

```
rangez <- seq(from = min(data3D$z) - 1, to = max(data3D$z) + 1, length = 20) # Para altitude
```

```
grid3D <- expand.grid(x = rangex, y = rangey, z = rangez)
```

```

# Predição/Interpolação 3D
kriging_result <- predict(kriging_model, grid3D)

# Visualização 3D Interativa com Plotly
doce_pred <- kriging_result$v.pred # Renomear para clareza
fig <- plot_ly(
  x = grid3D$x, y = grid3D$y, z = grid3D$z,
  marker = list(size = 3),
  color = doce_pred, colors = colorRamp(c("blue", "green", "yellow", "red")),
  type = 'scatter3d', mode = 'markers'
)
fig <- fig %>% layout(
  scene = list(xaxis = list(title = "Longitude"),
    yaxis = list(title = "Latitude"),
    zaxis = list(title = "Altitude")),
  title = "Distribuição 3D do Doce no Café Natural"
)
fig

# Visualização 3D Estática com Lattice (wireframe é mais para superfícies, para volume talvez uma fatia)
# A função wireframe do lattice é mais complexa para visualização de volumes 3D diretamente.
# Seu uso com 'at=doce' implica mapear a cor baseada no valor do atributo em uma superfície 2D (x,y) com z como superfície.
# Para representar o volume real do atributo, a visualização com plotly é mais adequada,
# ou fatias 2D em diferentes altitudes com spplot/ggplot2.
# colr <- brewer.pal(11, "RdYlGn")
# colr <- colorRampPalette(colr, space = "rgb")
# wireframe(z ~ x * y, data = grid3D,
#   xlab = "Longitude", ylab = "Latitude", zlab = "Altitude",
#   col.regions = colr(101), drape = TRUE, scales = list(arrows = FALSE),
#   at = doce_pred) # Usar doce_pred

```

5. Análises Exploratórias e Comparativas

- **Objetivo:** Complementar as análises geoestatísticas com estatísticas descritivas, gráficos de dispersão e comparações entre os tipos de processamento (natural vs. descascado).
- **Funções:** summary(), chart.Correlation() do pacote PerformanceAnalytics, scatter.smooth(), t.test(), barplot().
- **Procedimento:**

- Obter um resumo estatístico dos dados.
- Gerar uma matriz de correlação com histogramas e curvas de densidade para os atributos sensoriais.
- Criar gráficos de dispersão dos atributos sensoriais versus as variáveis geográficas (Altitude, Latitude, Longitude).
- Realizar testes t de Student para comparar as médias dos atributos entre os cafés natural e descascado.
- Gerar gráficos de barras comparativos para as médias dos atributos entre os processamentos.

- **Código:**

```
R
# Resumo descritivo dos dados
summary(laisnatural)

# Análise de Correlação entre Atributos Sensoriais
my_data <- laisnatural[, 5:11] # Ajustar as colunas conforme seus dados (Doce, Acidez,
Corpo, Finalização, Adstringência, Amargor, Nota)
chart.Correlation(my_data, histogram=TRUE, pch=19, main="Matriz de Correlação dos
Atributos Sensoriais - Café Natural")

# Gráficos de Dispersão vs. Variáveis Geográficas
with(laisnatural, scatter.smooth(Altitude, Doce, main="Doçura vs. Altitude", xlab="Altitude
(m)", ylab="Doçura"))
with(laisnatural, scatter.smooth(Latitude, Doce, main="Doçura vs. Latitude",
xlab="Latitude", ylab="Doçura"))
with(laisnatural, scatter.smooth(Longitude, Doce, main="Doçura vs. Longitude",
xlab="Longitude", ylab="Doçura"))
# Repetir para outros atributos conforme necessário

# Comparação entre Café Natural e Descascado (Exemplo para Doce)
# Assumindo que 'laiscd' é o data.frame do café descascado
var(laisnatural$Doce) / var(laiscd$Doce) # Razão das variâncias
t.test(laisnatural$Doce, laiscd$Doce, var.equal=TRUE) # Teste t para médias iguais
(assumindo variâncias iguais)

# Gráfico de Barras Comparativo de Médias
par(pty="s") # Ajusta o tipo de plot para ser quadrado
means <- c(mean(laisnatural$Doce, na.rm=TRUE), mean(laiscd$Doce, na.rm=TRUE))
```

```

depa <- c(sd(laisnatural$Doce, na.rm=TRUE), sd(laiscd$Doce, na.rm=TRUE)) # Desvio
padrão para barras de erro
mp <- barplot(means, col=c("red", "blue"),
             xlab="Tipo de Processamento", ylab="Doçura", ylim=c(0, max(means + depa) *
1.1))
axis(1, labels=c("Natural", "Descascado"), at = mp)
# Adicionando barras de erro
segments(mp, means - depa, mp, means + depa, lwd=2)
segments(mp - 0.1, means - depa, mp + 0.1, means - depa, lwd=2)
segments(mp - 0.1, means + depa, mp + 0.1, means + depa, lwd=2)

# Lembrar de limpar os gráficos ou fechar dispositivos após cada uso se precisar.
# dev.off()

```

Observações Finais para o Protocolo:

- **Modularidade:** O protocolo deve ser repetido para cada atributo sensorial de interesse.
- **Ajuste de Parâmetros:** Parâmetros como cutoff, width nos variogramas, idp no IDW, e length nas grades de predição devem ser ajustados conforme as características dos dados e a resolução desejada para os mapas.
- **Interpretação:** A interpretação dos resultados de cada etapa é tão crucial quanto a execução do código. Entender os gráficos de variograma, os mapas interpolados e as correlações é fundamental.
- **Gerenciamento de Gráficos:** Utilize dev.off() para fechar dispositivos gráficos abertos após cada plotagem, evitando que os gráficos se sobreponham.

**ARTIGO 2 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E EFEITOS DAS VARIÁVEIS
GEOGRÁFICAS NOS CAFÉS DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA UTILIZANDO
ESPECTROSCOPIA UV-VIS**

**ARTICLE 2 - PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND EFFECTS OF
GEOGRAPHICAL VARIABLES ON CHAPADA DIAMANTINA COFFEE, BAHIA
USING UV-VIS SPECTROSCOPY**

Artigo redigido e formatado de acordo com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

A Chapada Diamantina, Bahia, destaca-se como região produtora de café arábica de alta qualidade relevante no Brasil. Suas condições únicas de *terroir*, com altitudes elevadas, solos diversificados e clima tropical semiúmido, promovem o desenvolvimento de cafés especiais com atributos sensoriais notáveis, como corpo encorpado, acidez cítrica e notas de chocolate e nozes. O objetivo deste estudo foi realizar uma caracterização detalhada dos grãos de café da Chapada Diamantina, empregando uma abordagem combinada de espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) e avaliação sensorial, visando subsidiar a valorização da Indicação Geográfica (IG) e desenvolver metodologias para a certificação e diferenciação de cafés especiais. Foram avaliados extratos de café cru da safra 2020/2021 em um espectrofotômetro UV-Vis (faixa de 200 a 800 nm), e a análise sensorial foi conduzida por cinco Q-Graders com registros em fichas sensoriais específicas. Nos cafés descascados, a correlação dos dados de UV-Vis com os resultados sensoriais revelou uma clara tendência de separação espacial: cafés de maiores altitudes foram consistentemente descritos como mais doces e receberam notas finais superiores. Nas regiões de maior latitude e longitude (norte da região), os atributos de adstringência e amargor apresentaram maior intensidade. Nos cafés naturais, não foi observada com a mesma clareza essa mesma tendência de correlação entre os dados. Conclui-se que a técnica de UV-Vis é eficiente e promissora para auxiliar na compreensão das análises sensoriais e das características químicas dos cafés, demonstrando ser uma ferramenta valiosa para a caracterização e valorização de cafés.

Palavras-chave: Café natural; café descascado; análise sensorial; variáveis geográficas.

ABSTRACT

Chapada Diamantina, Bahia, stands out as one of the producing regions of relevant high quality Arabica coffee in Brazil. Its unique *terroir* conditions, with high altitudes, diverse soils and a semi-mitigated tropical climate, promote the development of specialty coffees with remarkable sensory attributes, such as full-bodied body, citrus acidity and notes of chocolate and nuts. The objective of this study was to make a detailed characterization of Chapada Diamantina coffee beans, employing a combined approach to absorption spectroscopy in the Ultraviolet-Visible region (UV-VIS) and sensory evaluation, aiming to support the appreciation of geographical indication (IG) and develop methodologies for certification and differentiation of special cafes. Crop 2020/2021 crop extracts were evaluated in an UV-VIS spectrophotometer (range from 200 to 800 nm), and sensory analysis was conducted by five Q-graders with records in specific sensory tokens. In peeled coffees, the correlation of UV-Vis data with sensory results revealed a clear tendency of spatial separation: cafes of higher altitudes were consistently described as sweeter and received higher final notes. In the regions of greater latitude and longitude (north of the region), the attributes of astringency and bitterness showed greater intensity. Natural coffees, this same trend of correlation between UV-vis data and sensory characteristics related to geographical variations was not observed with the same clarity. It is concluded that the UV-Vis technique is efficient and promising to assist in understanding the sensory analyzes and the chemical characteristics of the coffes, demonstrating its a valuable tool for the characterization and appreciation of coffes.

Keywords: Natural Coffee; pulped coffee; Sensory analysis; geographical variables.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura desempenha um papel significativo na economia brasileira, sendo amplamente reconhecida por sua contribuição à agricultura familiar e ao desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões do país. O estado da Bahia, em particular, abriga a Chapada Diamantina, uma das regiões produtoras mais relevantes de café arábica de alta qualidade. As condições climáticas e geográficas únicas da região, como altitudes elevadas, solos diversificados e clima tropical semiúmido, favorecem a produção de cafés especiais, reconhecidos por atributos sensoriais diferenciados, como corpo encorpado, acidez cítrica e notas de chocolate e nozes (Santos *et al.*, 2020; BSCA, 2023b; Borém *et al.*, 2019). Esses cafés têm ganhado notoriedade internacional, reforçando a importância da região no mercado global de cafés especiais.

A Chapada Diamantina destaca-se pela interação de seus fatores naturais e humanos, que moldam a identidade de seus cafés. Essa combinação de elementos, muitas vezes definida como *terroir*, abrange características como composição do solo, altitude, clima e práticas agrícolas específicas (Borém *et al.*, 2019). Na região, os solos predominantes, como os Latossolos profundos e bem drenados, aliados a altitudes que variam de 400 a 1700 metros, criam condições ideais para a produção de grãos de alta qualidade (Santos *et al.*, 2020). Além disso, práticas pós-colheita, como colheita seletiva e secagem cuidadosa, contribuem para a excelência do café produzido. Essa atenção aos detalhes tem permitido que municípios como Piatã, Mucugê e Ibicoara se destaquem em concursos nacionais e internacionais de qualidade (BSCA, 2023b).

O mercado global de cafés especiais tem experimentado uma demanda crescente, impulsionada por consumidores que buscam produtos de qualidade superior, com rastreabilidade e produção sustentável. Essa tendência reflete o aumento do interesse em cafés certificados por Indicações Geográficas (IGs), que conectam as características sensoriais e químicas do produto à sua origem geográfica. No Brasil, as IGs têm desempenhado um papel importante na valorização de produtos regionais, conferindo credibilidade e acesso a mercados especializados. A recente certificação da Chapada Diamantina como Denominação

de Origem (DO) pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) reforça a importância da região como produtora de cafés de alta qualidade e singularidade (INPI, 2024).

A composição química dos grãos de café reflete sua interação com o ambiente de cultivo e o processamento pós-colheita. Compostos como açúcares, ácidos clorogênicos, cafeína e trigonelina desempenham papéis cruciais na definição do sabor, aroma e características antioxidantes do café (Borém *et al.*, 2016; Durán *et al.*, 2017). Técnicas analíticas avançadas, como espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), têm sido amplamente empregadas para caracterizar a composição química dos grãos. Essas técnicas destacam-se pela acurácia, eficiência e capacidade de fornecer informações detalhadas sobre o perfil químico do café, permitindo identificar padrões regionais que reforçam o diferencial do produto (Adnan *et al.*, 2020; Dankowska *et al.*, 2017).

Além disso, a espectroscopia UV-Vis se apresenta como uma ferramenta versátil e de baixo custo para estudos em cafés especiais. Essa técnica tem sido empregada na identificação de adulterações, quantificação de compostos bioativos como cafeína e ácidos clorogênicos, e até mesmo na discriminação de origens geográficas de diferentes blends de café (Caldeira *et al.*, 2024; Borém *et al.*, 2023). Sua aplicação na Chapada Diamantina permite explorar não apenas os compostos químicos que conferem qualidade à bebida, mas também como esses atributos estão relacionados ao terroir da região. Essa abordagem possibilita o desenvolvimento de metodologias para proteger a autenticidade dos cafés locais e ampliar o potencial de comercialização internacional.

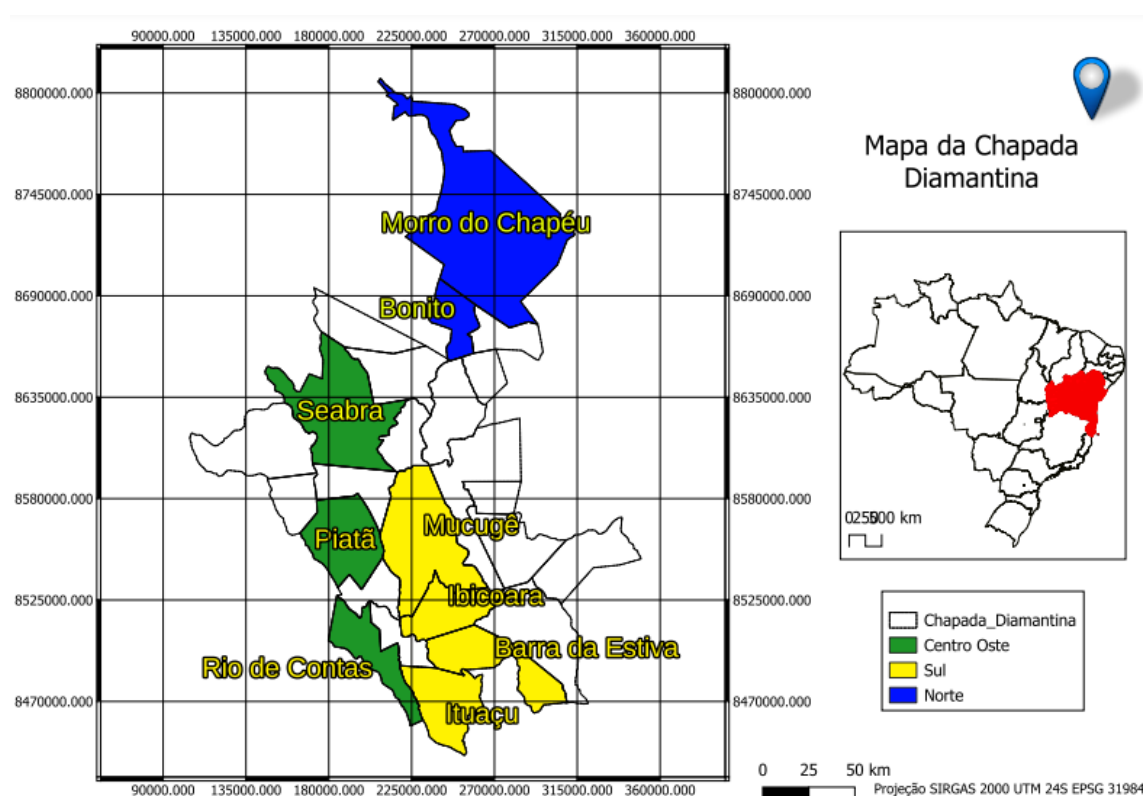
Dessa forma, a caracterização química dos cafés da Chapada Diamantina oferece informações fundamentais para consolidar sua posição no mercado de cafés especiais e fortalecer a identidade regional. O objetivo deste estudo é realizar uma caracterização detalhada dos grãos de café da Chapada Diamantina por meio da espectroscopia UV-Vis, e compreender como meio interage nas características sensoriais do café natural e do café descascado, contribuindo para a valorização da Indicação Geográfica e para o desenvolvimento de metodologias que ampliem o potencial de certificação e diferenciação de cafés especiais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e coleta de amostras

O estudo foi conduzido nos municípios que compõem a Indicação Geográfica da Chapada Diamantina, Bahia, durante a safra 2020/2021, conforme Figura 1. As amostras de frutos maduros (cereja) foram coletadas em áreas previamente georreferenciadas, utilizando o aplicativo UTM Geo Map 3.6.4. Após a colheita, os frutos foram transportados para a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), onde foram selecionados, embalados a vácuo e enviados para o Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais.

Figura 1. Localização dos municípios produtores de café da Chapada Diamantina – BA integrantes da indicação geográfica.



Fonte: Próprio autor (2025).

Processamento e preparação das amostras

As amostras foram classificadas em peneiras (14 a 18/64 polegadas) e submetidas a uma triagem manual para remoção de defeitos. Os grãos selecionados foram acondicionados em tubos Falcon de 50 mL e armazenados a -80°C até a realização das análises químicas. Para as análises espectroscópicas, os grãos foram triturados, e os extratos obtidos por meio de aquecimento e ultrassonicação.

Análise por espectroscopia UV-Vis

As análises de espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível foram realizadas no Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os extratos foram preparados adicionando-se 0,5 g de grãos triturados a 10 mL de água destilada, aquecidos a 60°C e submetidos à ultrassonicação por 30 minutos. Após filtração, alíquotas de 50 µL foram diluídas para 10 mL com água destilada, e 1 mL da solução final foi analisado em um espectrofotômetro UV-Vis (Cary 60, Agilent) na faixa de 200 a 800 nm.

Tratamento estatístico

O tratamento dos dados das análises químicas foi realizado na Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, onde a construção dos modelos quimiométricos das matrizes com os dados de UV-Vis, foram realizados utilizando o software MATLAB, versão 7.10 (The MathWorks, Natick, MA, EUA) com pacote PLS Toolbox, versão 5.2.2 (Eigenvector Research, Manson, WA, EUA) para uma análise exploratória nos modelos usando a análise de componentes principais (PCA) dos espectros das amostras para o café natural e o café descascado.

Mapas temáticos

Os mapas temáticos elaborados foram para compreender a disposição das cidades na Chapada Diamantina e o mapa de hipsometria. Para o processamento das imagens e obtenção

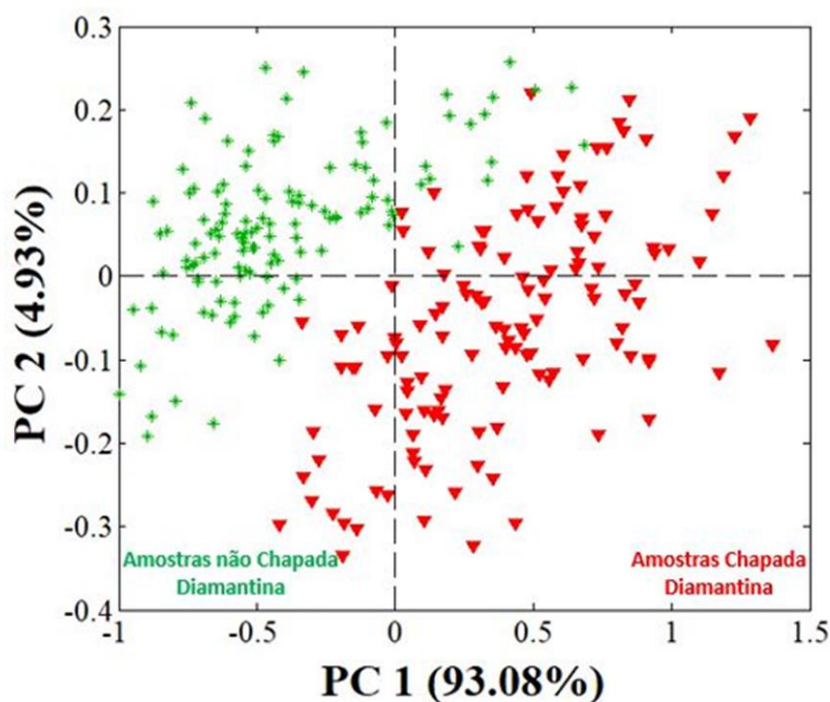
dos valores de cada ponto onde foram coletadas as amostras foi utilizado o software QGIS, versão 3.34.4 'Prizren'. Para a elaboração dos mapas hipsométrico utilizou-se o complemento Open Topography DEM Downloader e o satélite (SRTM), com 30 metros. As classes hipsométricas seguiu critérios conforme a indicação de Loch (2006), com definição das faixas de altitude em intervalos de 200 m.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise exploratória dos dados por PCA, obtidos por UV-vis de cafés da Chapada Diamantina e cafés do Sul de Minas Gerais, visualiza-se o perfil e a estrutura dos dados, com a intenção de verificar se a técnica seria capaz de separar cafés de diferentes origens a partir da composição química. A Figura 2 apresenta o gráfico dos escores obtido para o modelo PCA para duas componentes principais que explicam 98,01% da variância total dos dados.

No gráfico de PC1 vs. PC2, é possível observar que existe uma tendência de agrupamento das amostras. No lado positivo de PC1 e negativo de PC2 estão agrupadas predominantemente amostras oriundas da Chapada Diamantina (▼). Já no lado negativo da PC1 estão distribuídas as amostras provenientes de outras regiões produtoras de café (+), isso demonstra que estes dois grupos de cafés são diferentes quimicamente e ainda, que a região da Chapada Diamantina possui características próprias como produtora de café. A metodologia de UV-vis foi utilizada com eficiência para identificar adulterações em cafés torrados e moídos (Souto *et al.*, 2015), como também é eficiente para identificar regiões produtoras de cafés especiais como as Denominações de Origem de cafés, garantindo sua singularidade, como foi mostrado por Caldeira *et al.* (2024), usando a espectroscopia UV-Vis na autenticação de cafés especiais nas Regiões do Noroeste Fluminense e Caparaó (Brasil) discriminando de forma eficaz de adulterações feitas com a casca, palha e grãos de café de baixa qualidade. Suhandy e Yulia (2017) demonstraram o potencial da informação espectral UV-Vis usada para discriminação simples e robusta de amostras de café Peaberry (café tradicional da Indonésia) puro moído e café normal moído.

Figura 2. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis dos café provenientes da Chapada Diamantina (▼) e cafés de outras regiões produtoras de café (+).

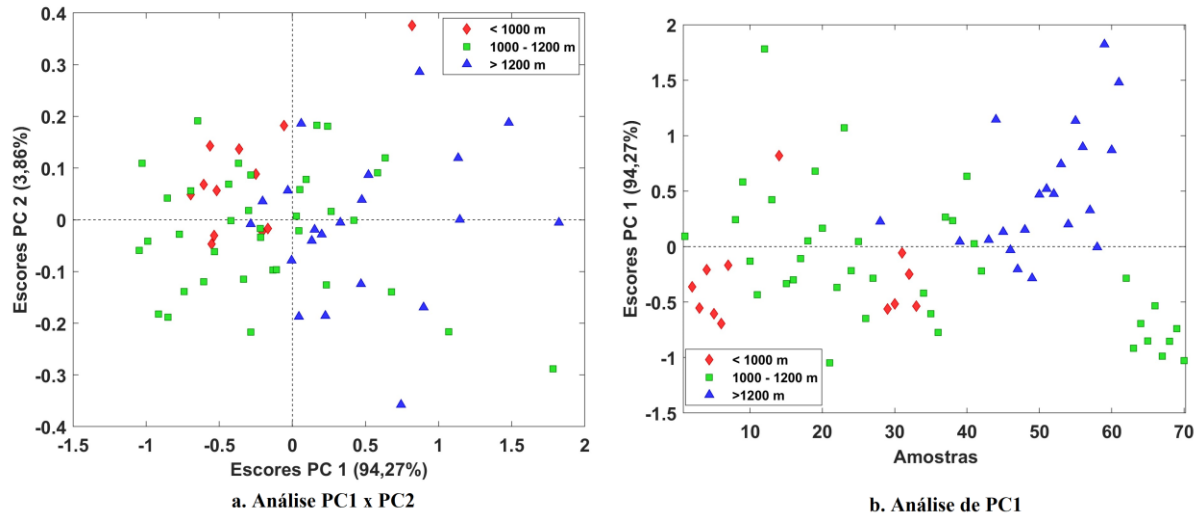


Fonte: Próprio Autor (2025).

Análise do Café Descascado

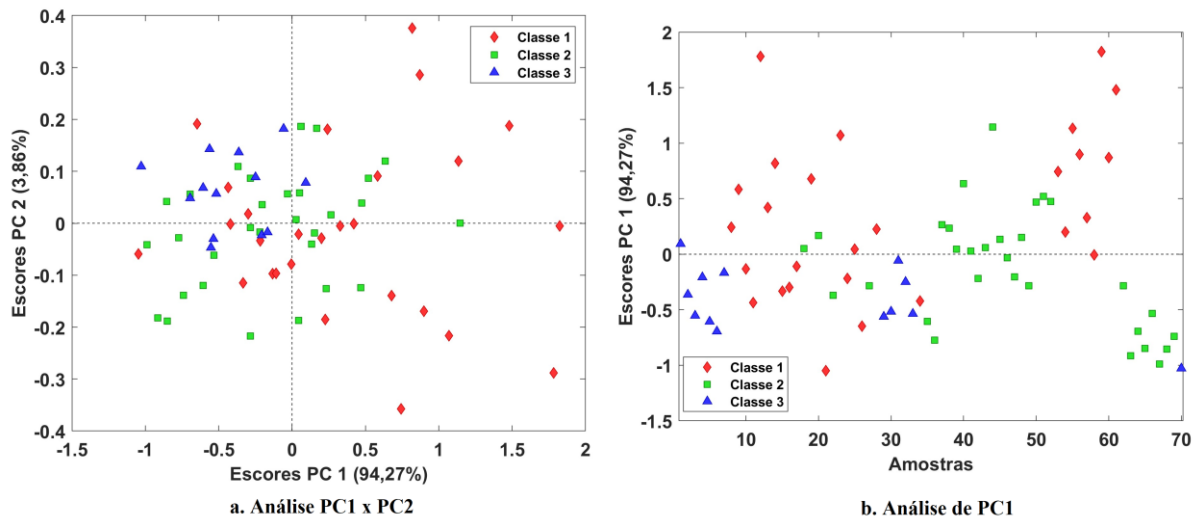
No modelo PCA, os dados obtidos através da técnica de UV-vis dos cafés provenientes do processamento via úmida (café descascado) em relação à altitude, latitude e longitude, os dois componentes principais explicaram 98,13% da variação total, com contribuição de 94,27% da componente PC1 e 3,86% da componente PC2. Por a componente PC1 de ambas as figuras apresentar maior contribuição na variância total nesse conjunto de dados, gerou-se um gráfico de escores para esta componente, conforme figuras 3(altitude), figura 4 (latitude) e figura 5 (longitude).

Figura 3. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em $\blacklozenge$ <1000, $\blacksquare$ 1000-1200m, $\blacktriangle$ >1200.



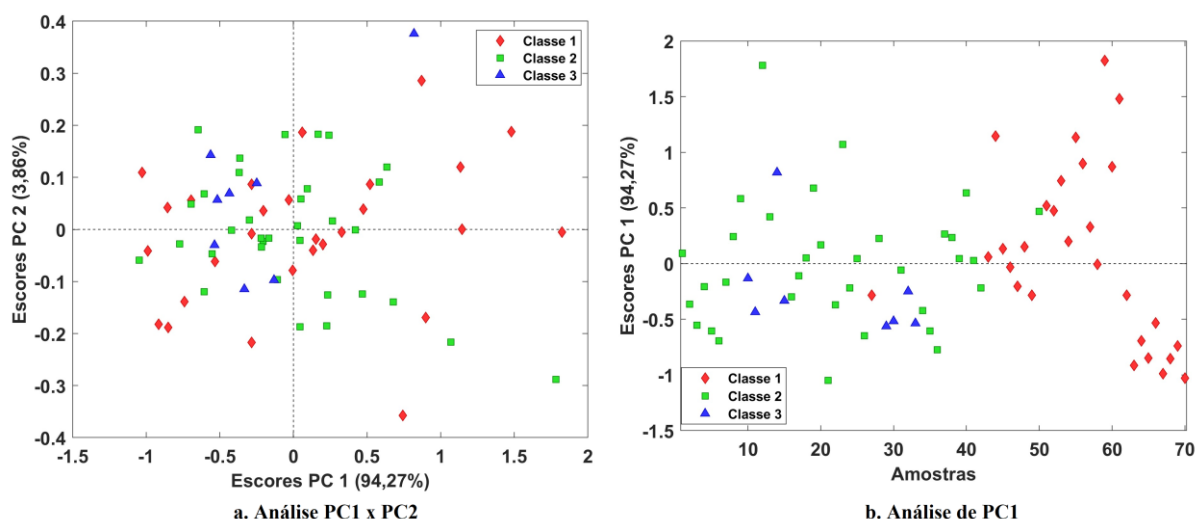
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 4. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ < 8522635, Class 2: $\blacksquare$ 8522635-8642635, Class 3: $\blacktriangle$ >8642635



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 5. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <199266, Class 2: $\blacksquare$ 199266-259265, Class 3: $\blacktriangle$ >259266.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Através das figuras acima, as variáveis analisadas de altitude e latitude há tendências de agrupamentos, indicando a influencia nas características químicas do café. No entanto, em relação à variável longitude não se observa agrupamentos, sendo inconclusivo sua influência nas características sensoriais.

As áreas produtoras de café possuem alta variabilidade em relação à altitude. Na Chapada Diamantina há cafés produzidos desde altitudes abaixo de 1000m, como observado na cidade de Morro do Chapéu (região Norte) até 1590m de altitude, observado no município de Rio de Contas (Região Centro-oeste). Ao analisar a figura 3, os cafés produzidos abaixo de 1000m de altitude estão representados pelo símbolo vermelho, sendo predominantes no lado negativo da PC1 (“b. Análise de PC1”), que significa que esses cafés apresentam características químicas e notas sensoriais inferiores aos cafés do lado positivo, com exceção de apenas 1 café no lado positivo, que nesse caso é proveniente no município de Barra da Estiva (região Sul), produzido há 985m de altitude resultou em um café com nota sensorial abaixo de 80 pontos, assim como outros cafés abaixo de 1000m de altitude pertencentes aos

municípios de Bonito e Morro do Chapéu (região Norte), que também possuem a menor média de notas sensoriais.

Os cafés produzidos no intervalo de altitude de 1000m a 1200m estão distribuídos pela PC1, sendo esse um intervalo de transição de altitude. Essa distribuição pela PC1 induz a concluir que há outro fator agindo juntamente com a altitude, como a latitude (Figura 4) e longitude (Figura 5), além de fatores bióticos como o tipo de solo e fatores abióticos como o clima e processamento, resultando em cafés químicos e sensorialmente melhores no lado positivo da PC1. Ao comparar os cafés na faixa de 1000m à 1200m de altitude (símbolo quadrado de cor verde na Figura 3) com esses mesmos cafés na figura 4, referente à latitude, observa-se que essas amostras se encontram nas regiões Centro-oeste e sul da Chapada Diamantina, conforme o mapa (Figura 1), assim, são cafés em região de transição tanto em relação à altitude quanto à latitude.

As amostras acima de 1200m estão predominantemente no lado positivo da PC1, portanto apresentam melhor qualidade química e consequentemente melhores atributos sensoriais, demonstrando que a técnica de UV-vis caracterizou quimicamente esses cafés de acordo com a altitude, sendo possível verificar uma tendência de separação. Entende-se que as notas sensoriais, com melhores características químicas, tendem a aumentar conforme aumenta as altitudes nos locais de cultivo dos cafés. Isso evidencia que há relação direta entre a qualidade sensorial do café com condições de altitudes elevadas, corroborando com os estudos de Wang *et al.* (2022), Getachew *et al.* (2022); Ribeiro *et al.* (2016) e Ramos *et al.* (2015).

Ao analisar as figuras 4 e 5 observa-se que em maiores latitudes (símbolo azul) e maiores longitudes (símbolo azul), os cafés se encontram predominantes no lado negativo da PC1, que significa características químicas diferentes dos cafés presentes no lado positivo. Os cafés com maiores latitudes (norte) e longitudes (leste) se encontram nos municípios de Morro do Chapéu e Bonito, que resultou em menores médias sensoriais. As notas sensoriais médias por altitude, latitude, longitude e região estão expostas na tabela 1.

Tabela 1 – Score (média de pontuação final) a partir da estratificação da hipsometria, do score e da divisão regional dos cafés processados por via úmida (CD) produzidos no território da Chapada Diamantina – BA.

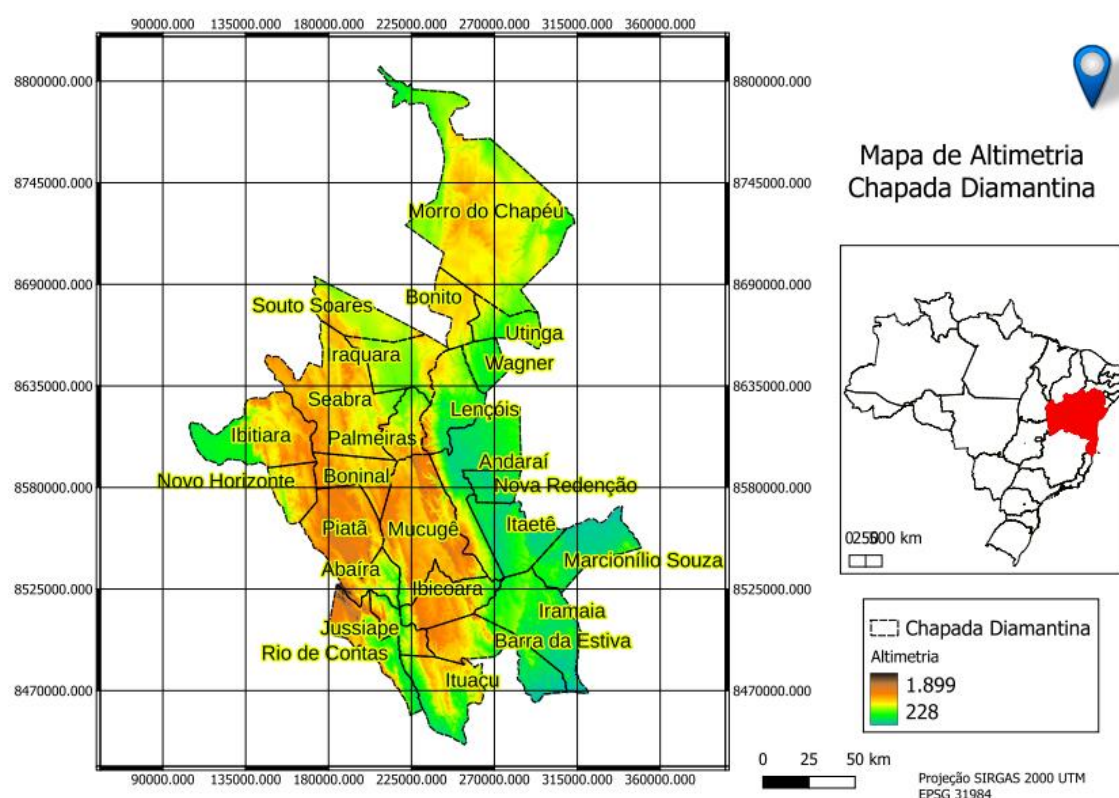
VARIÁVEIS	ALTITUDE (M)	MÉDIA
ESTRATIFICAÇÃO HIPSOMÉTRICA	< 1000	79,60
	1000-1200	83,45
	> 1200	82,55
CLASSES DE LATITUDE	< 8522635	83,73
	8522635-8642635	82,34
	>8642635	80,16
CLASSES DE LONGITUDE	<199266	82,89
	199266-259265	82,60
	>259266	81,51
DIVISÃO REGIONAL	REGIÃO	
	NORTE	80,16
	CENTRO-OESTE	84,11
	SUL	83,43

Fonte: Próprio Autor (2025).

Analizando o conjunto de dados simultaneamente nas Figuras 3, 4 e 5, através da técnica de UV-vis foi possível observar um agrupamento entre as amostras, em que cafés em menores altitudes e maiores latitudes (norte da Chapada Diamantina) e maiores longitudes (ao leste da Chapada Diamantina), concentram-se na região Norte, composta pelos municípios de Bonito e Morro do Chapéu, confirmado através da figura 6, que apresentam menores altitudes. A área de estudo é muito extensa, por isso, apresenta variadas características ambientais que juntamente com os atributos estudados dificulta uma discriminação dos atributos químicos e sensoriais do café. Dessa forma, a técnica de UV-vis foi eficiente para identificar e discriminar cafés dentro da Chapada Diamantina, podendo subdividir em regiões, apesar da alta heterogeneidade regional e possíveis similaridades químicas, assim como evidenciado por Caldeira *et al.* (2024), que utilizou essa técnica com eficiência para

identificar e garantir autenticação dos cafés especiais nas Regiões do Noroeste Fluminense e Caparaó (Brasil) contra adulterações feitas com a casca, palha, grãos de café de baixa qualidade e cafés de outras regiões dentro de uma Indicação Geográfica.

Figura 6. Mapa altimétrico da Chapada Diamantina, Bahia.

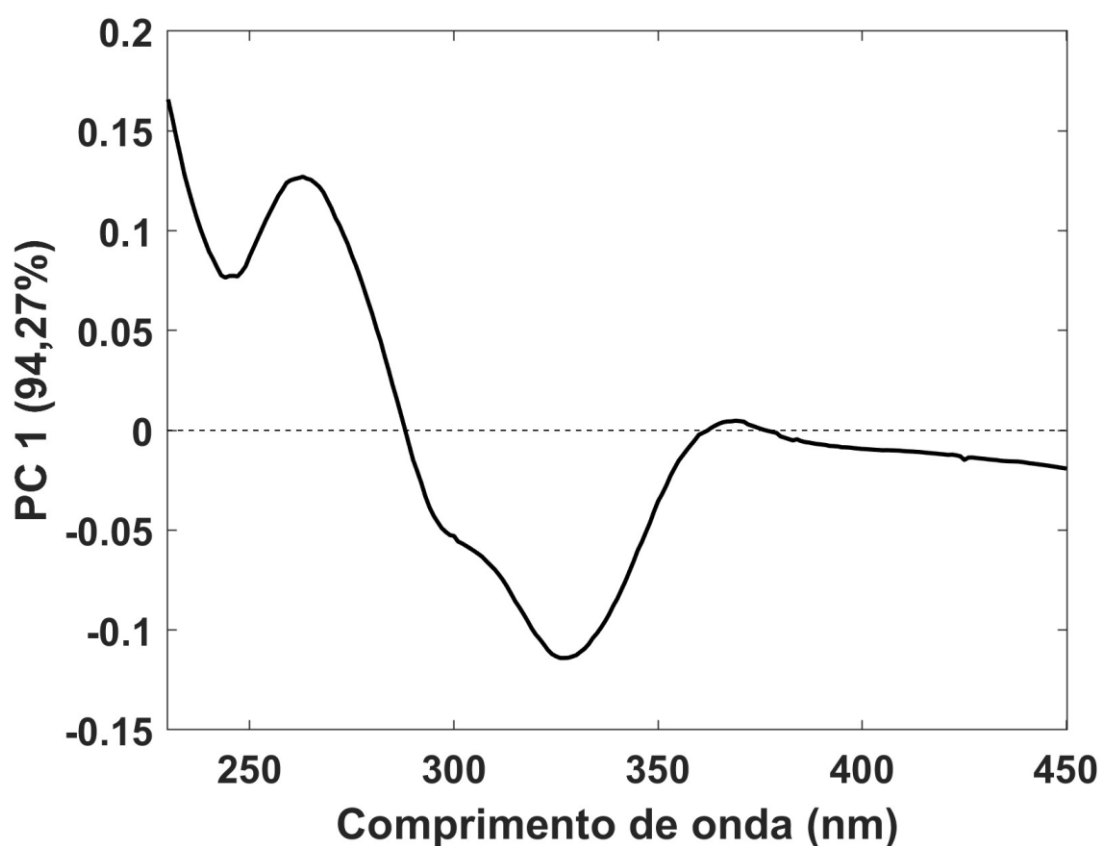


Fonte: Próprio Autor (2025).

Os extratos dos grãos de café verde emitiram espectros com informações importantes sobre a composição das amostras na faixa entre 230-450nm. A Figura 7 apresenta o gráfico de pesos na PC1 vs. comprimento de onda, que traz informações a respeito das variáveis que foram importantes e influenciaram na tendência de agrupamento das amostras. Observa-se que existem duas bandas características que foram significativas para o comportamento das amostras. No lado positivo de PC1, as variáveis que influenciam as amostras se encontram na faixa espectral em torno de 265 (max) a 272 nm, atribuída à trigonelina presente no café,

conforme os autores Moreira *et al.* (2014) e Souto *et al.* (2015), nessa mesma faixa de 272 nm identifica-se a cafeína (Moreira *et al.*, 2014; Belay *et al.*, 2008). No lado negativo de PC1 as variáveis mais importantes para as amostras estão em torno da região entre 320 a 350 nm, que são os ácidos clorogênicos presentes nos cafés (Souto *et al.*, 2015; Belay e Gholap, 2009). A maioria dos compostos bioativos pertencem às classes dos polifenóis e alcaloides. Entre os alcaloides, a cafeína é o composto mais conhecido e abundante na bebida do café seguido pela trigonelina, que é o segundo alcalóide principal de grãos de café (Carneiro *et al.*, 2021). Já os ácidos clorogênicos (CGA) são os principais compostos fenólicos do café (Belay e Gholap, 2009). Esses compostos bioativos são muito importantes na composição do café e, fornecem características sensoriais desejáveis, influenciando na qualidade final da bebida (Monteiro e Trugo, 2005).

Figura 7. Loadings em PC1 para o modelo PCA construído.



Fonte: Próprio Autor (2025).

As amostras de grãos crus submetidos à espectroscopia de UV-vis que estão distribuídos no lado positivo da PC1 na figura 3 (altitude), figura 4 (latitude) e figura 5 (longitude) são cafés que apresentam maior conteúdo de Trigonelina e Cafeína. Os teores de trigonelina variam de acordo com a espécie de café, em que a espécie *Coffea arabica* apresenta maior teor de trigonelina quando comparado aos grãos de *Coffea canephora*. Além disso, durante o processo de torrefação, o tempo e a temperatura utilizados no processamento degradam rapidamente a trigonelina, produzindo uma série de compostos voláteis, importantíssimos no aroma e sabor da análise sensorial, originando por exemplo compostos da classe das piridinas e o N-metipirrol e, uma vitamina, a niacina (vitamina B3) (Canzi *et al.*, 2023; Monteiro e Trugo, 2005). Portanto, quanto mais drástico a torra, menores teores de trigonelina são encontrados (Monteiro e Trugo, 2005).

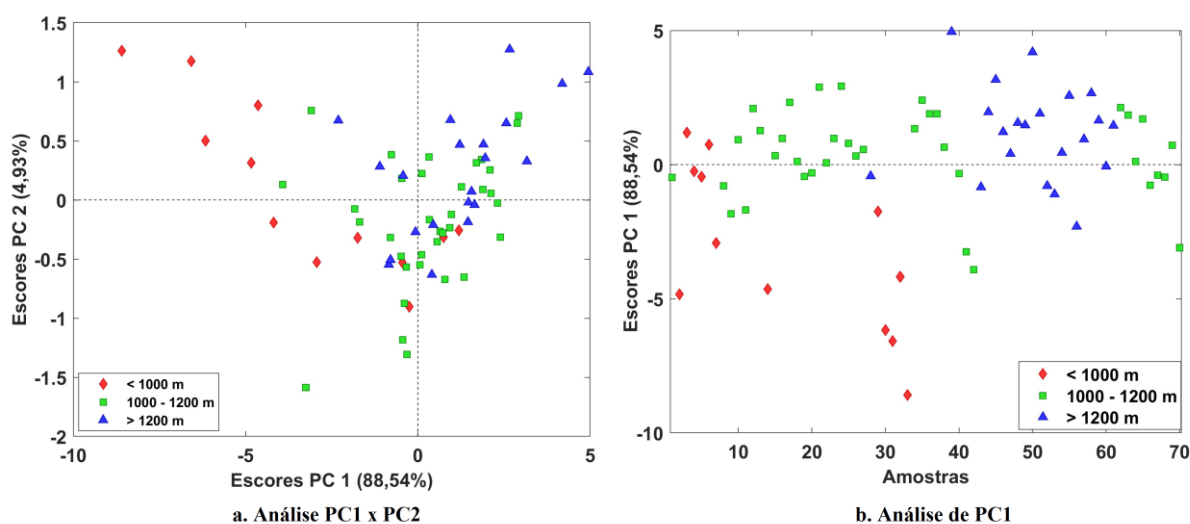
A cafeína também varia de acordo com a espécie, ao contrário da trigonelina, grãos de *Coffea canephora* apresentam maiores teores de cafeína quando comparados aos grãos de café arábica. Além disso, a maior estabilidade térmica da cafeína, diminuem suas perdas durante a torrefação (Monteiro e Trugo, 2005).

Grãos de cafés crus que ficaram no lado negativo da PC1 foram cafés em que a espectroscopia de UV-vis identificou maior conteúdo de ácidos clorogênicos. O conteúdo de ácido clorogênico (CGA) em grãos de café diminui conforme a maturação do fruto do café (Koshiro *et al.*, 2007), assim, esses cafés podem estar associados ao grau de maturação que foram colhidos, pois os ácidos clorogênicos têm uma relação inversa com a qualidade do café e, o maior teor de ácidos clorogênicos totais podem ser encontrados em café de baixa qualidade (Silva *et al.*, 2000; Carvalho *et al.*, 1989). Entretanto, com o aumento no grau de maturidade, entre os isômeros dos ácidos clorogênicos, o conteúdo de ácidos monocateoilquínicos (3-CQA) aumentam, e os conteúdos de 5-CQA e di-CQA diminuem, segundo avaliou Smrke *et al.* (2015). Esse isômero 3-CQA também foi encontrado em maior teor em cafés produzidos acima de 1.200 m de altitude (Ribeiro, 2013) que como já discutido, em condições de altitudes elevadas observa-se melhor qualidade sensorial do café (Wang *et al.*, 2022; Getachew *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2015). Assim, os isômeros dos ácidos clorogênicos se apresentam de forma diferenciada de acordo com a maturação e condições do ambiente.

Análise Sensorial dos cafés descascados (CD)

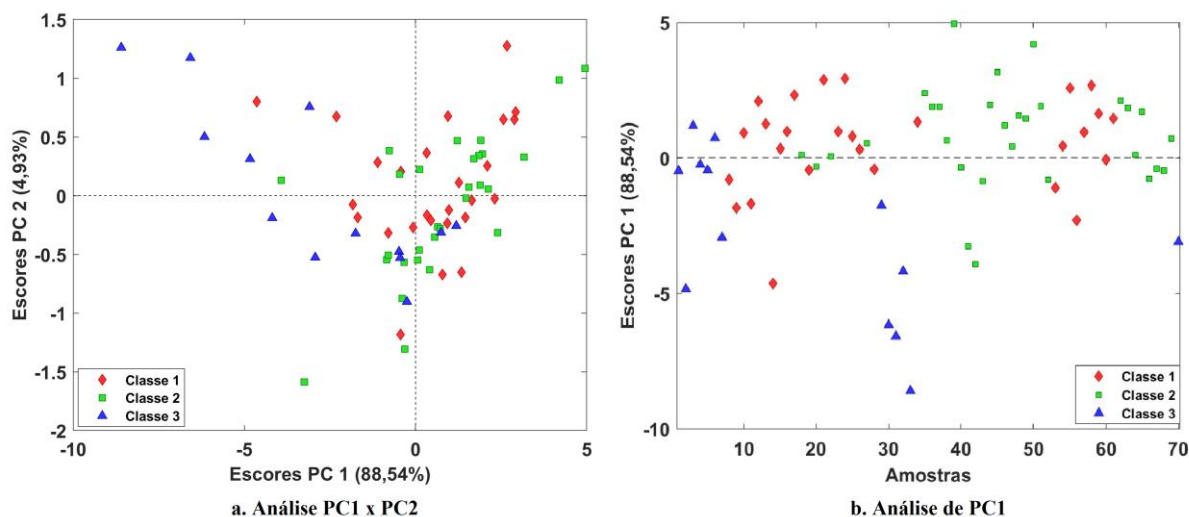
A análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina provenientes do processamento via úmida (café descascado) em relação à altitude (Figura 8), latitude (Figura 9) e longitude (Figura 10), são apresentados através de modelos PCA. Os dois componentes principais explicaram 93,47% da variação total, com contribuição de 88,54% da componente PC1 e 4,93% da componente PC2 (a. PC1 x PC2). Aprofundando na análise da componente PC1 que explicou 88,54% da variância total do conjunto de dados observa-se o gráfico b das figuras seguintes.

Figura 8. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200.



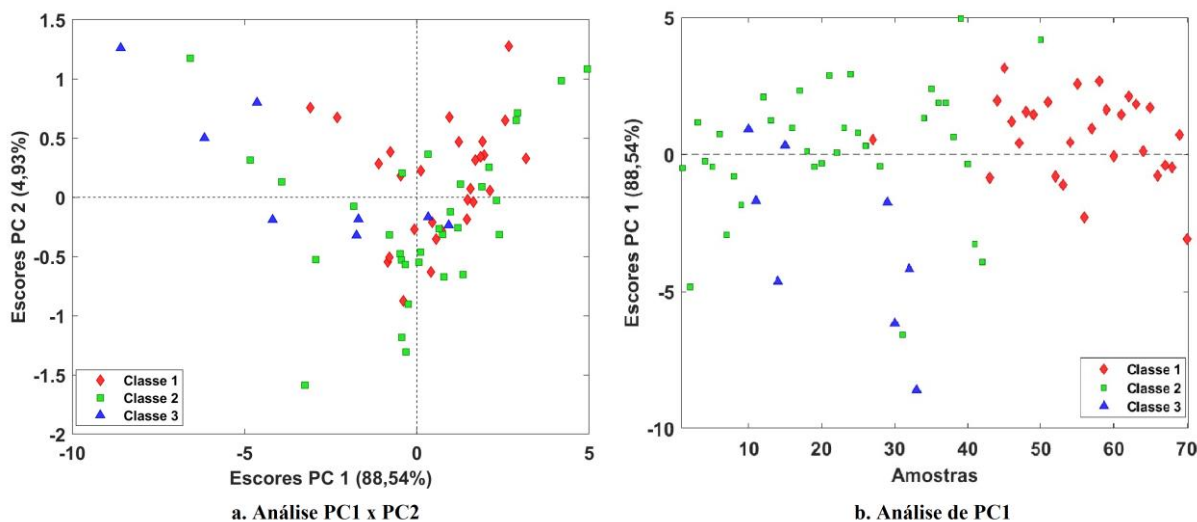
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 9. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ < 8522635 , Class 2: $\blacksquare$ $8522635-8642635$, Class 3: $\blacktriangle$ >8642635 .



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 10. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <199266 , Class 2: $\blacksquare$ $199266-259265$, Class 3: $\blacktriangle$ >259265 .

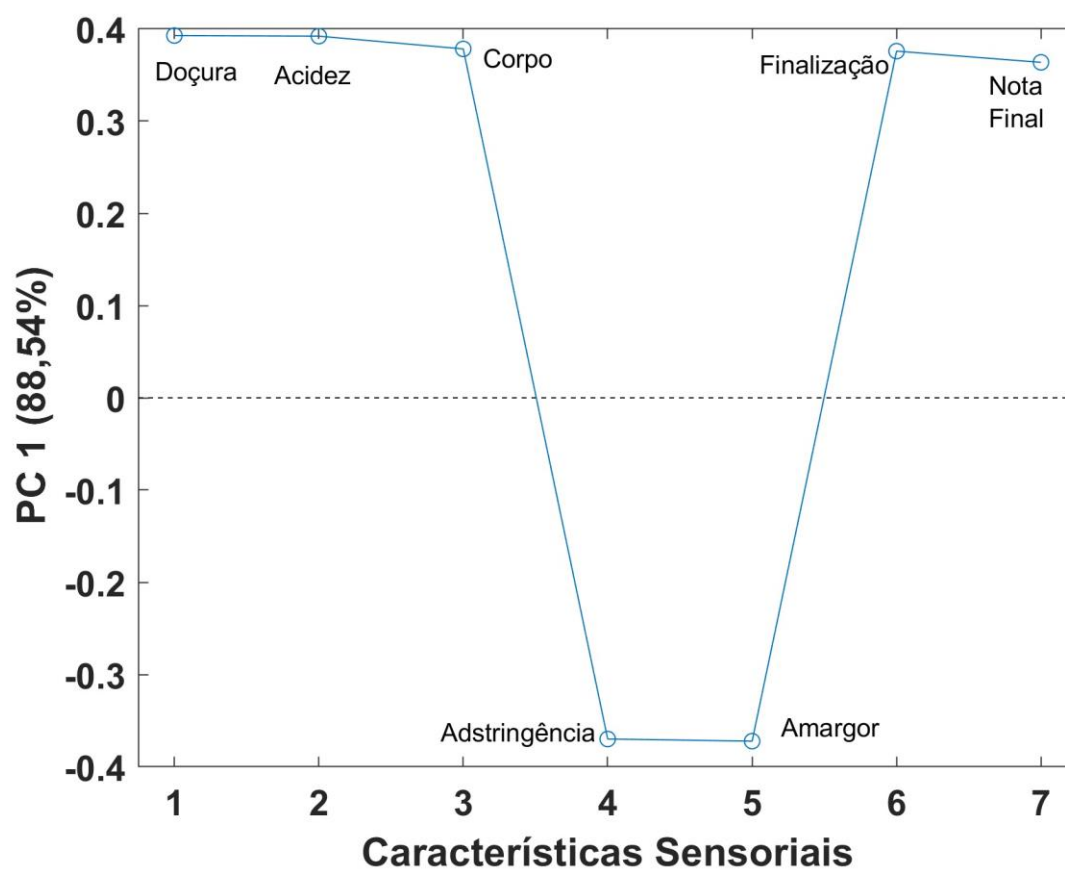


Fonte: Próprio Autor (2025).

Foram avaliados na análise sensorial os atributos doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final. A componente PC1 nessas figuras apresenta valor de 88,54% e, há clara tendência de separação dentro da PCA, em que amostras com menores altitudes estão predominantemente no lado negativo da PC1 e maiores altitudes no lado positivo da PC1. Os cafés encontrados do lado negativo da PC1 apresentaram maior adstringência e amargor, consequentemente menores notas finais. As amostras no lado positivo do gráfico obtiveram melhor qualidade sensorial (maiores doçura, acidez, corpo e finalização) e consequentemente melhores notas. Um café do município de Mucugê sobrepõe a linha de score em PC1 no valor de 5 dos gráficos (linha limítrofe superior do gráfico), esse café apresentou a maior nota durante a degustação (análise sensorial) e também está há 1211m de altitude (estratificação >1200m). Comprovando mais uma vez que a altitude possui relação direta na qualidade final da bebida dos cafés avaliados, como já discutido anteriormente.

A Figura 11 apresenta os pesos das variáveis da análise sensorial avaliadas, os atributos adstringência e amargor são responsáveis pelo deslocamento dos cafés para o lado negativo do gráfico de PC1 (b. Análise de PC1) conforme observado na figura 8 (altitude), figura 9 (latitude) e figura 10 (longitude), que em maiores altitudes e, menores latitudes e longitudes, os cafés apresentam melhor qualidade sensorial.

Figura 11. Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise sensorial é uma ferramenta muito importante na caracterização de diferentes tipos de café (Borém *et al.*, 2013). A soma das pontuações individuais de todos os atributos constitui a pontuação final, que representa a qualidade geral do café. Cafés que pontuam mais de 80 pontos são considerados cafés especiais (Lingle, 1993). A qualidade dos cafés especiais está relacionada à suas características intrínsecas, representadas pelo produto da composição química dos grãos de café. Os compostos químicos encontrados em grãos de café fornecem sabor, aroma, acidez, doçura e amargor para a bebida (Figueiredo *et al.*, 2015; Giomo e Borém, 2011).

De acordo com Borém *et al.* (2019), o café e suas propriedades sensoriais é essencialmente um produto do *terroir* (do ambiente) onde é cultivado e produzido. Vários *terroirs* já foram identificados e associados com inúmeras variáveis como clima, solo, topografia, altitude, latitude (Figueiredo *et al.*, 2015; Bertrand *et al.*, 2012; Figueiredo *et al.*, 2013), hidrografia e aspectos ambientais que podem afetar a qualidade do café (Alpizar & Bertrand, 2004; Tolessa *et al.*, 2016). Corrobora com isso o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE, 2020) que leva em conta a importância ecológica, as limitações e as fragilidades dos ecossistemas na distribuição espacial das atividades agrícolas econômicas (ZEE, 2020).

A Chapada Diamantina possui variação tanto de solo, quanto características ecológicas e climáticas dentro da região, que assumiu formas morfológicas condicionadas pela estrutura sedimentar que ‘facilitou’ o seu modelamento devido à processos erosivos (Petri *et al.*, 2018), que nos maciços e serras altas os solos são em geral rasos, pedregosos e pobres, predominando os solos litólicos (rasos, pedregosos e de fertilidade baixa) e grandes afloramentos de rocha. Nos topos planos os solos são em geral profundos e muito pobres, com predominância de latossolos (profundos, bem drenados, ácidos e de fertilidade baixa) (ZEE, 2020). Além disso, em seu interior há a “Serra do Sincorá”, que atravessa a região da “Chapada Diamantina”, no sentido SSE – NNW e apresenta altitudes em torno de 1.600m. Essa dinâmica influencia os sistemas meteorológicos que atuam na região e condiciona o regime pluviométrico dominante (Silva e Azevedo, 2000). Do ponto de vista climático, a Chapada Diamantina possui clima subúmido dentro do domínio semiárido baiano, pois a região é ponto de convergência de massas de ar, que geram um mosaico climático bastante complexo por influência do relevo. Quatro massas de ar atuam nesta região: Equatorial Continental; Tropical Continental; Tropical Atlântica e Polar. A ação conjunta das mesmas, proporciona um clima tropical chuvoso de floresta, com um a três meses secos (Koeppen, 1936), e temperatura média anual abaixo de 22 °C, bem mais abaixo do que as áreas circundantes (ZEE, 2020). O ocidente da Serra do Sincorá ocorre tipos climáticos úmidos e subúmidos (Silva e Azevedo, 2000).

Variáveis climáticas, como temperatura do ar, incidência de luz solar e precipitação e, características de solo, como a umidade e a disponibilidade de água, estão entre os

principais fatores que afetam o desenvolvimento do café, uniformidade de floração, maturidade da fruta e seus estádios fenológicos e, conseqüentemente, na qualidade do produto final (Borém *et al.*, 2019). Em concordância, na Chapada Diamantina, essas variáveis refletem nos índices hídrico, umidade e aridez (Silva e Azevedo, 2000).

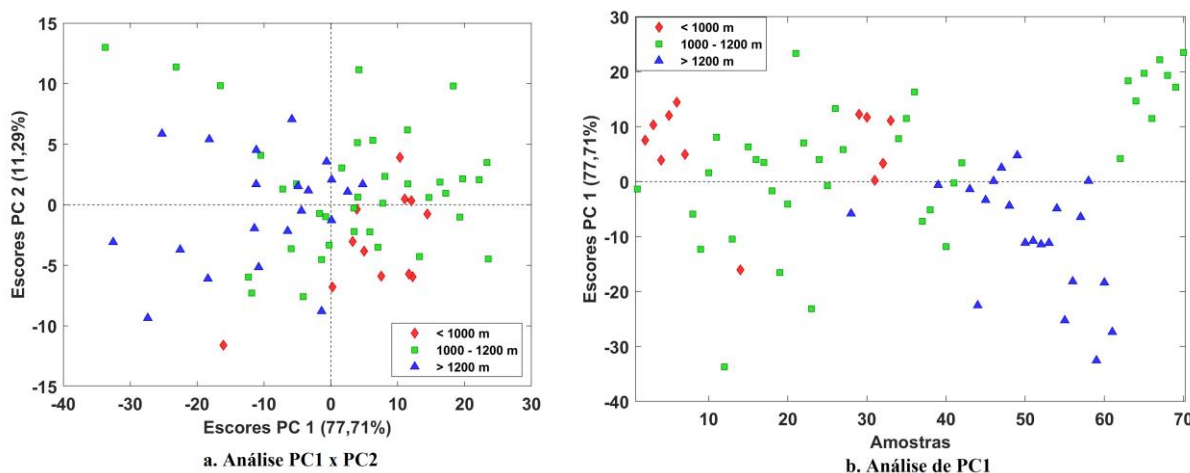
Espectroscopia de UV-vis e atributos sensoriais

As Figuras 12 (altitude), 13 (latitude) e 14 (longitude) apresentam o modelo PCA com duas componentes principais (a. Análise PC1 x PC2) para a fusão de dados entre a espectroscopia de Uv-vis e a análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina, que explicam 89,00% da variância total dos dados. O gráfico de escores para a PC1 (b. Análise de PC1) também está disponível, já que esta componente explica 77,71% da variância cumulativa presente nesse conjunto de dados.

Analizando o modelo PCA para as duas componentes (a. Análise de PC1 x PC2) nas figuras abaixo, não é possível verificar nenhuma tendência de separação do conjunto de dados (UV-vis e atributos sensoriais) (safra 2020/2021). No entanto, ao analisar conjuntamente os dados de UV-VIS e sensorial na análise dos escores da PC1 (b), observa-se uma inversão na direção das PCs, em que os cafés com melhores notas estão no lado negativo da PC1. Neste caso, os *loadings* das características sensoriais também invertem (adstringência e amargor passam a ser observados no lado positivo da PC1, enquanto que os outros atributos estão no lado negativo da PC1). Assim, há tendências de agrupamentos no lado negativo da PC1, que significa que a técnica de UV-vis encontrou diferenças químicas nos atributos sensoriais dentro das 3 categorias estratificadas de altitude, latitude e longitude.

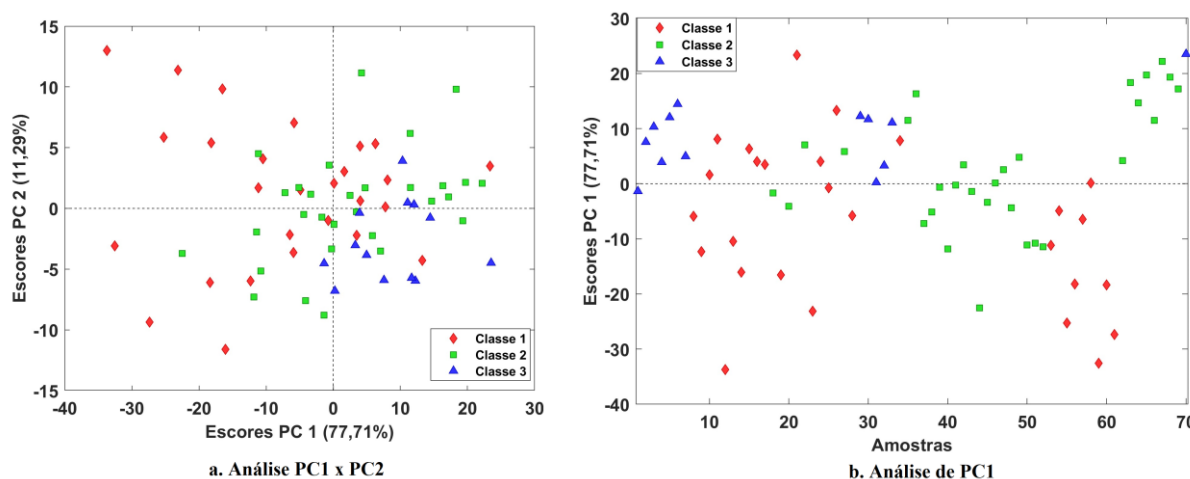
Os cafés presentes em maiores altitudes (símbolo ▲) estão no lado negativo da PC1 e são cafés com melhores atributos sensoriais e conseqüentemente melhores notas finais como observado na tabela 1. Cafés com maiores latitudes (Figura 13) e longitudes (Figura 14) estão presentes na região norte e leste (símbolo ▲), se concentram no lado positivo da PC1 e são cafés com menores notas sensoriais e maior presença de adstringência e amargor.

Figura 12. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionado com a altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200.



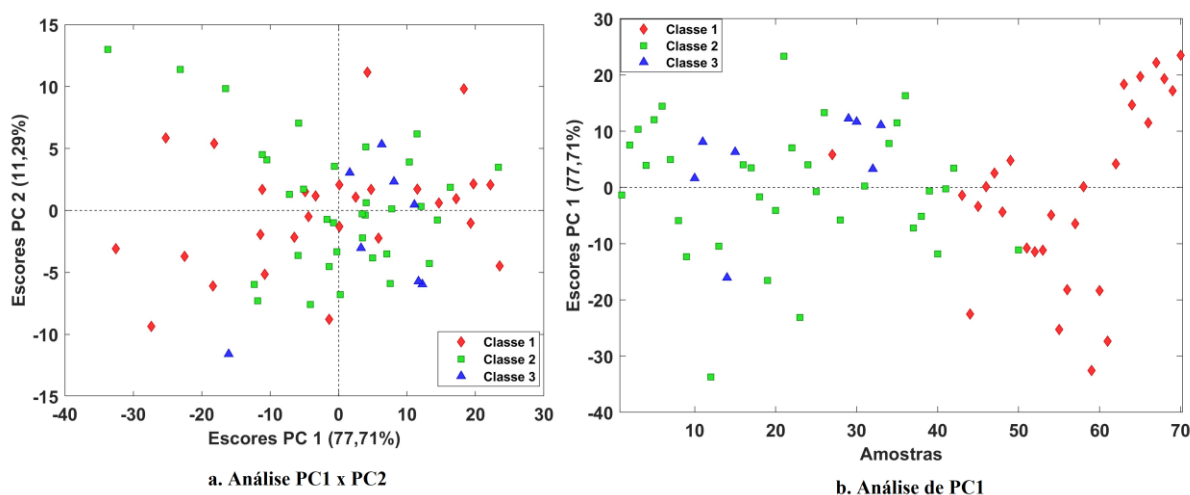
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 13. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 14. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <199266, Class 2: $\blacksquare$ 199266-259265, Class 3: $\blacktriangle$ >259266.



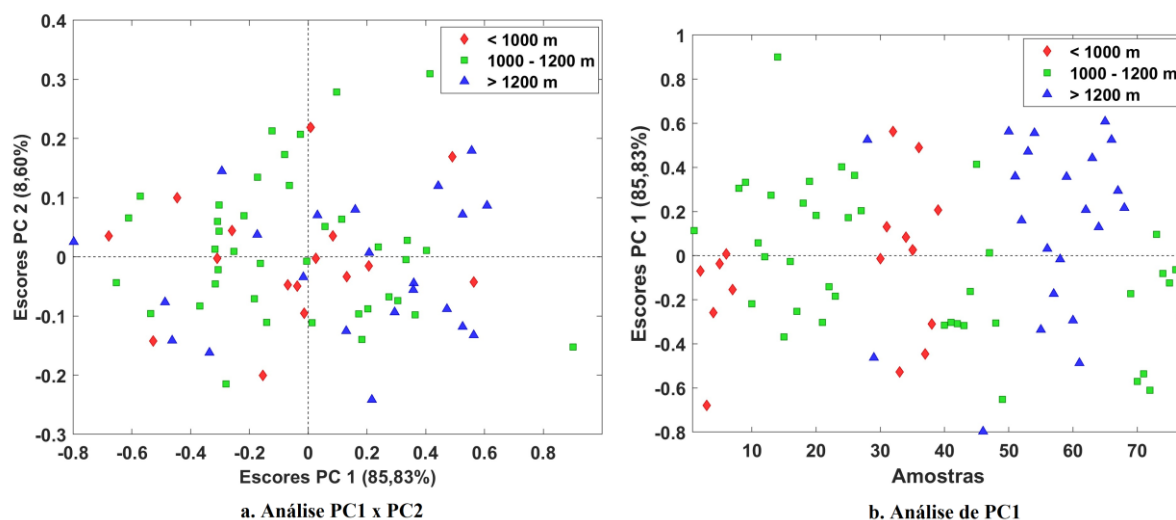
Fonte: Próprio Autor (2025).

Através das figuras acima, assim como já discutido anteriormente, há tendências de agrupamentos, indicando a influencia das características químicas do café identificadas através da espectroscopia de UV-vis nos atributos sensoriais. Isso evidencia que as melhores características químicas são diretamente proporcionais com a qualidade sensorial do café e as condições de altitudes elevadas, corroborando com os estudos de Wang *et al.* (2022), Getachew *et al.* (2022); Ribeiro *et al.* (2016) e Ramos *et al.* (2015).

Análise do Café Natural

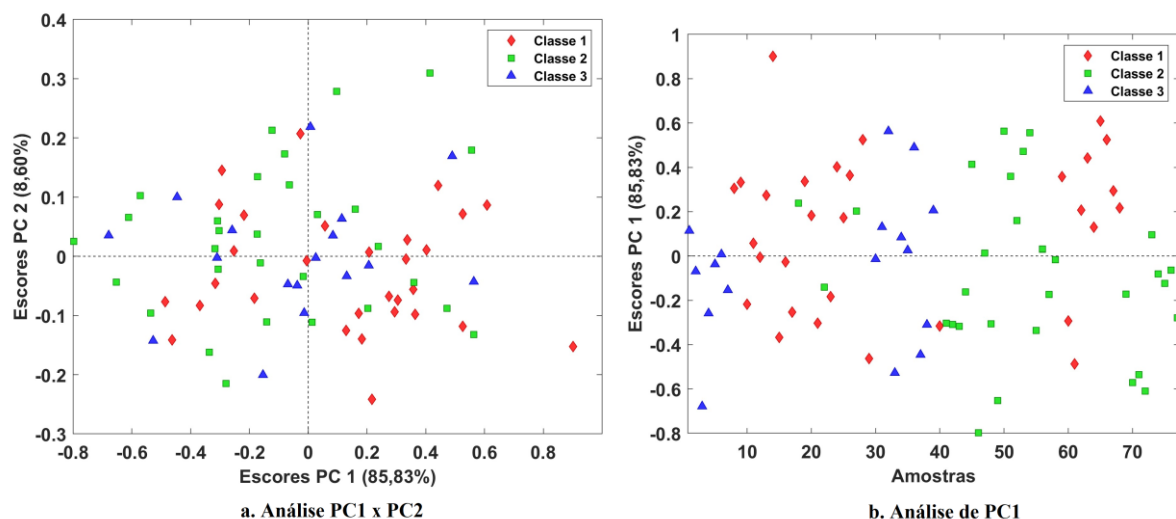
No modelo PCA, os dados obtidos através da técnica de UV-vis dos cafés provenientes do processamento via seca (café natural) em relação à altitude (Figura 15), latitude (Figura 16) e longitude (Figura 17), os dois componentes principais explicaram 94,43% da variação total, com contribuição de 85,83% da componente PC1 e 8,60% da componente PC2. Percentual menor do que o encontrado para o café descascado. A componente PC1 explicou 85,83% da variância total para estes dados apresentados em “b. Análise de PC1” nas figuras abaixo.

Figura 15. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em 3 alturas: ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200.



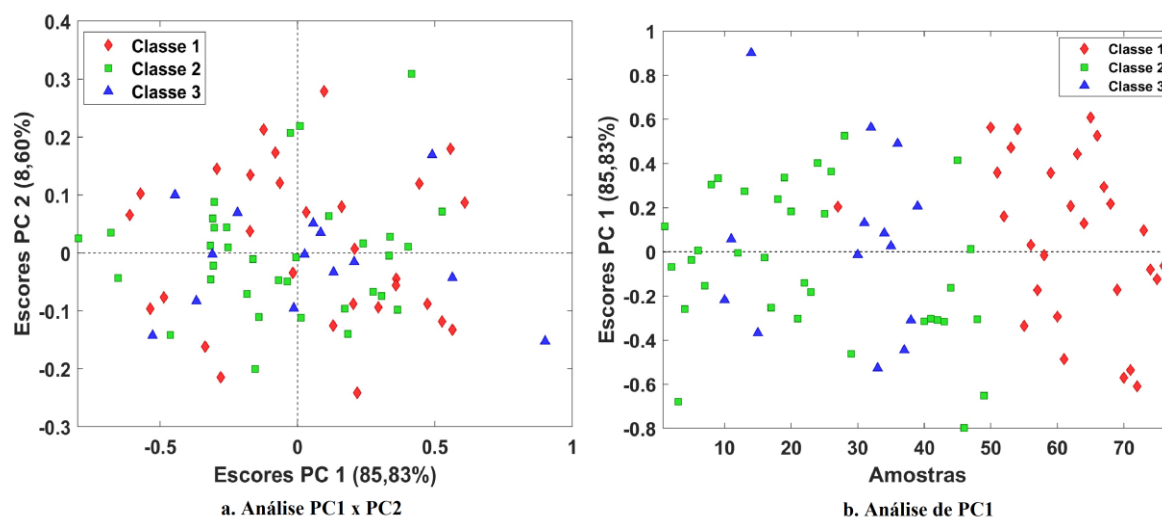
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 16. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 17. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <218010, Class 2: $\blacksquare$ 218010-258009, Class 3: $\blacktriangle$ >258010.



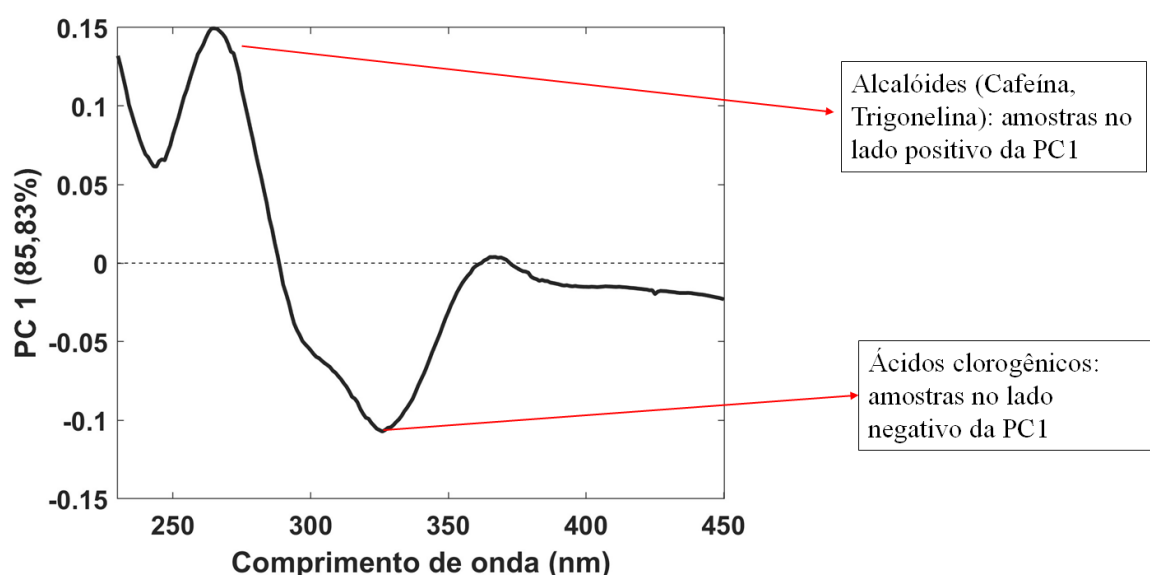
Fonte: Próprio Autor (2025).

Diferente do café descascado, os cafés naturais não apresentam tendências de agrupamento e ocorrem de forma aleatória no PCA, presentes no lado positivo e negativo da PC1 independente da variável analisada, assim, não é possível diferenciar quimicamente os cafés que compõem essa região geográfica, entre as variações de altitude, latitude e longitude usando a técnica de UV-vis, que independente da região produtora da Chapada Diamantina, os cafés são quimicamente semelhantes. Como já discutido, Caldeira *et al.* (2024) em seus estudos concluem que a técnica de UV-vis também não foi eficiente para identificar e discriminar cafés dentro de uma mesma região podendo ser explicado pela alta heterogeneidade das amostras e possível similaridade química.

Os extratos dos grãos de café verde emitiram espectros adquiridos na faixa de 200-450 nm. A Figura 18 apresenta o gráfico de pesos na PC1 vs. comprimento de onda, que traz informações a respeito das variáveis que foram importantes e influenciaram na tendência de agrupamento das amostras. Observa-se que existem duas bandas características que foram significativas para o comportamento das amostras. No lado positivo de PC1, as variáveis que

influenciaram as amostras se encontram na faixa espectral de 265 (max) a 272 nm, atribuída aos alcalóides como à trigonelina presente no café, conforme os autores Moreira *et al.* (2014) e Souto *et al.* (2015), nessa mesma faixa de 272 nm identifica-se a cafeína (Moreira *et al.*, 2014; Belay *et al.*, 2008). No lado negativo de PC1 as variáveis mais importantes para as amostras estão em torno da região entre 320 a 350 nm, que são os ácidos clorogênicos presentes nos cafés (Souto *et al.*, 2015; Belay e Gholap, 2009). Assim como já foi verificado para o café descascado.

Figura 18. Loadings em PC1 para o modelo PCA construído.

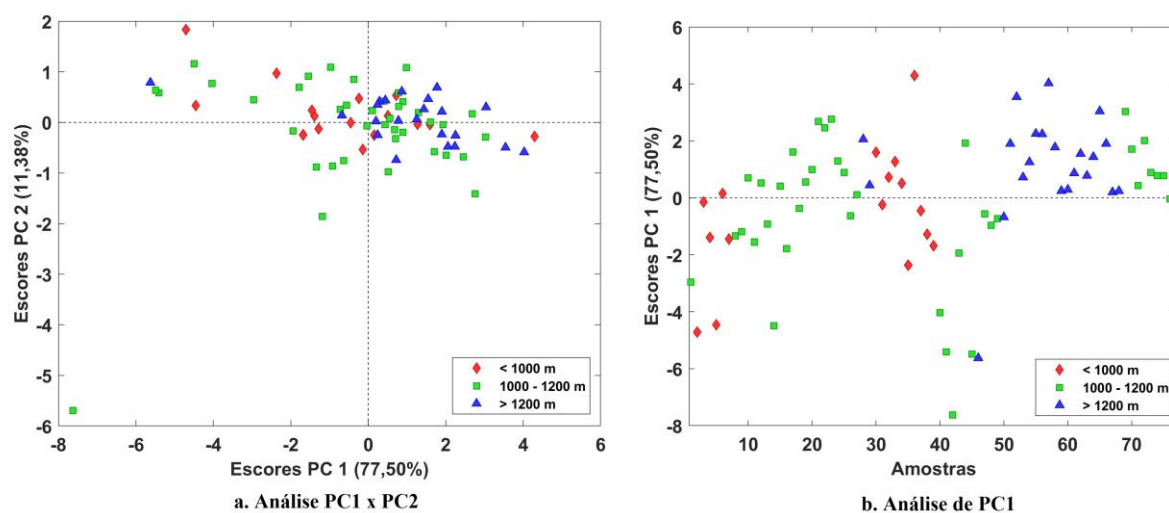


Fonte: Próprio Autor (2025)

Análise Sensorial dos cafés naturais

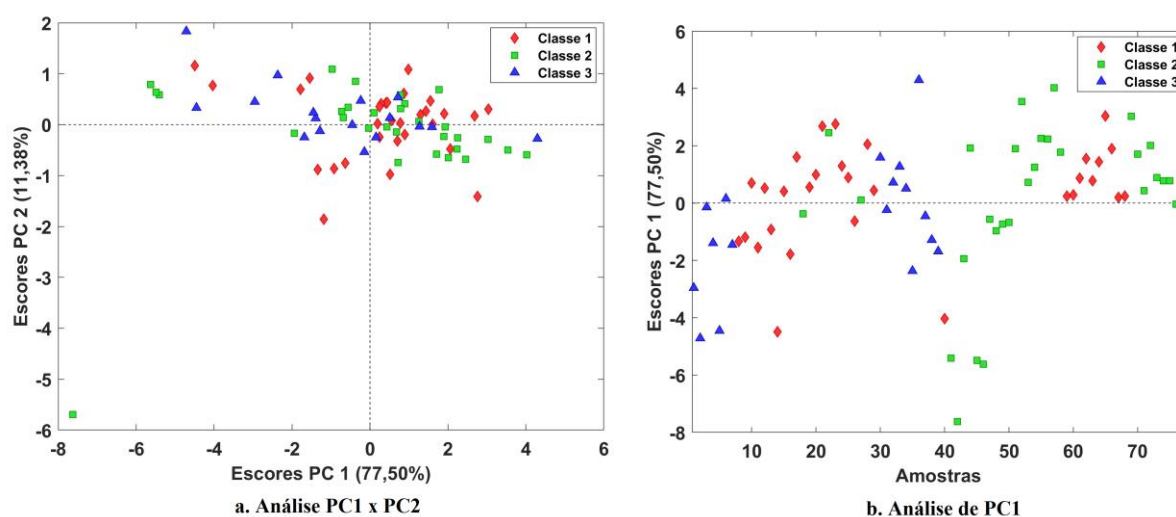
A análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina provenientes do processamento via seca (café natural) em relação à altitude (Figura 19), à latitude (Figura 20) e longitude (Figura 21), são apresentados através de modelos PCA. Os dois componentes principais explicaram 88,88% da variação total, com contribuição de 77,50% da componente PC1, a qual gerou-se um gráfico de escores para esta componente (b. Análise de PC1), conforme as figuras apresentadas abaixo.

Figura 19. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em $\blacklozenge$ <1000, $\blacksquare$ 1000-1200m, $\blacktriangle$ >1200.



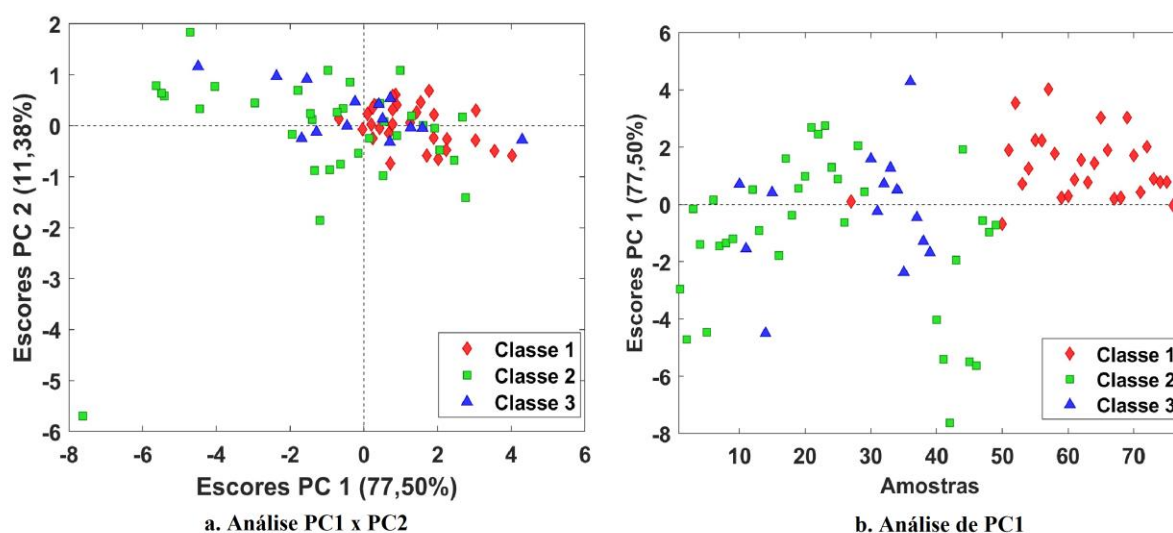
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 20. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ < 8522635, class 2: $\blacksquare$ 8522635-8642635, Class 3: $\blacktriangle$ >8642635.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 21. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos da análise sensorial e a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <218010, Class 2: $\blacksquare$ 218010-258009, Class 3: $\blacktriangle$ >258010.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A análise sensorial avaliou os atributos doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização que resultou em uma nota final. Sensorialmente, observa-se através dos gráficos de PC1 apresentados que as variáveis geográficas de altitude, latitude e longitude tiveram influencia na qualidade final da bebida do café, pois há tendências de separação entre os cafés.

Cafés produzidos acima de 1200 m de altitude ($\blacktriangle$) se encontram predominantemente no lado positivo da PC1 (Figura 19), assim como, os cafés de menor latitude (regiões ao sul da Chapada Diamantina) e longitude (regiões à oeste da Chapada Diamantina) apresentados pelo símbolo vermelho ($\blacklozenge$) nas figuras 20 e 21, respectivamente, que também estão predominantes no lado positivo de PC1. Essas mesmas estratificações apresentaram notas finais melhores que os cafés presentes no lado negativo da PC1 conforme demonstrado na Tabela 2, que apresentam as médias finais por altitude, latitude, longitude e região.

Tabela 2 – Score (média de pontuação final) a partir da estratificação da hipsometria, do score e da divisão regional dos cafés processados por via seca (natural) produzidos no território da Chapada Diamantina – BA.

VARIÁVEIS	ALTITUDE (M)	MÉDIA
ESTRATIFICAÇÃO HIPSOMÉTRICA	< 1000	79,70
	1000-1200	83,50
	> 1200	84,60
CLASSES DE LATITUDE	< 8522635	83,30
	8522635-8642635	84,60
	>8642635	80,50
CLASSES DE LONGITUDE	<218010	84,45
	218010-258010	82,90
	>258010	79,96
DIVISÃO REGIONAL	REGIÃO	
	NORTE	81,26
	CENTRO-OESTE	85,73
	SUL	84,50

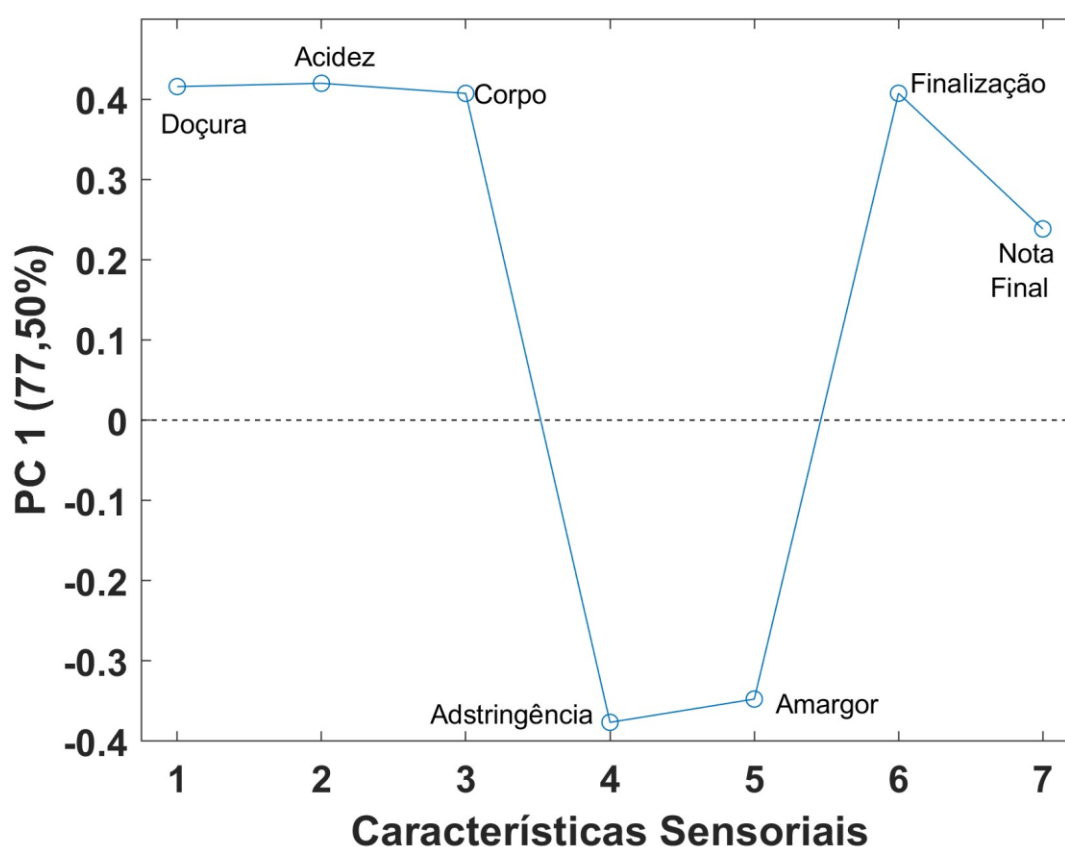
Fonte: Próprio Autor (2025).

A nota final atribuída à amostra de café é uma nota global diante da percepção do profissional e o equilíbrio durante a degustação de diversos atributos além das intensidades de doçura, acidez, corpo, finalização, adstringência e amargor. Assim, as amostras de café no lado positivo da PC1, conforme as figuras acima, são cafés que também apresentaram melhores notas finais e as médias dessas notas por estratificação são apresentados na tabela 2, comprovando essa realidade.

A Figura 22 apresenta os pesos avaliados das variáveis sensoriais, em que os atributos adstringência e amargor foram os responsáveis pelo deslocamento dos cafés para o lado negativo do gráfico de PC1 nas figuras 19, 20 e 21. Logo, os cafés encontrados do lado negativo da PC1 são cafés que apresentaram maior adstringência e amargor, resultando em

menores notas finais. As amostras no lado positivo do gráfico obtiveram melhor qualidade sensorial (maiores doçura, acidez, corpo e finalização) e consequentemente melhores notas.

Figura 22. Análise da componente PC1 para as características sensoriais avaliadas: doçura, acidez, corpo, adstringência, amargor, finalização e nota final obtidas na degustação de cafés provenientes da Chapada Diamantina.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Os cafés especiais são diferenciados pelos seus atributos sensoriais, com o objetivo de permitir ao consumidor degustar e apreciar um produto distinto com qualidade superior, capaz de impulsionar o prazer da bebida através dos órgãos e sentidos humanos (Silveira, 2015). O aroma do café é resultado, em grande parte, da quebra das proteínas durante o processo pirólico devido à ação do calor na torra. Assim, quanto maior o teor de proteínas do grão cru,

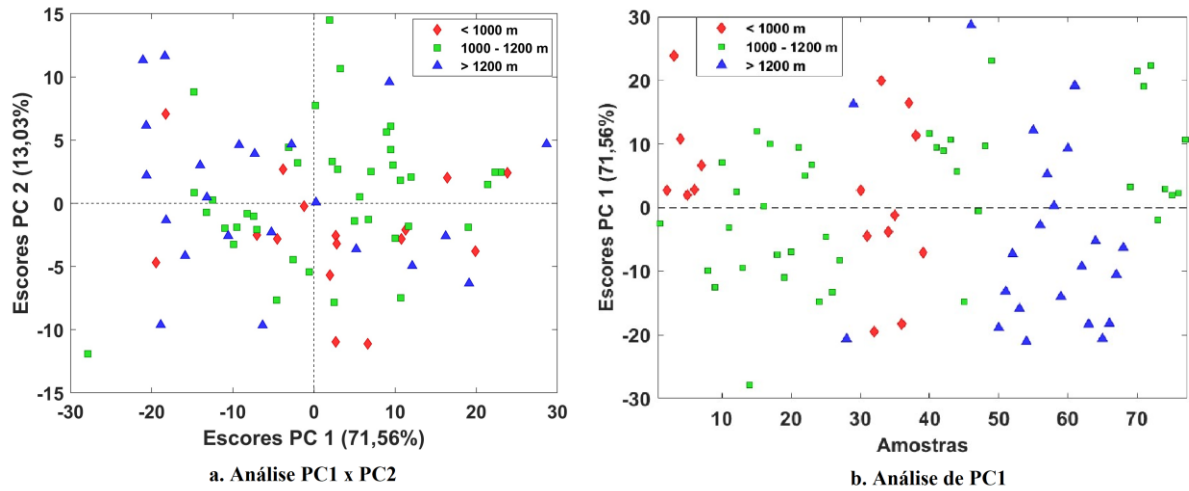
maior é a possibilidade de formação de compostos aromáticos (Xavier e Celestino, 2015), que influenciam no aroma e sabor desse produto final.

Quando ao provar um café, os órgãos sensoriais sentem mais a adstringência e amargor, por esses atributos não trazerem prazer, o produto final é depreciado em sua nota final durante a avaliação sensorial. A adstringência dos grãos é resultado dos polifenóis encontrados no café, o que diminui a qualidade da bebida em altas concentrações (Xavier e Celestino, 2015).

Espectroscopia de UV-vis e atributos sensoriais

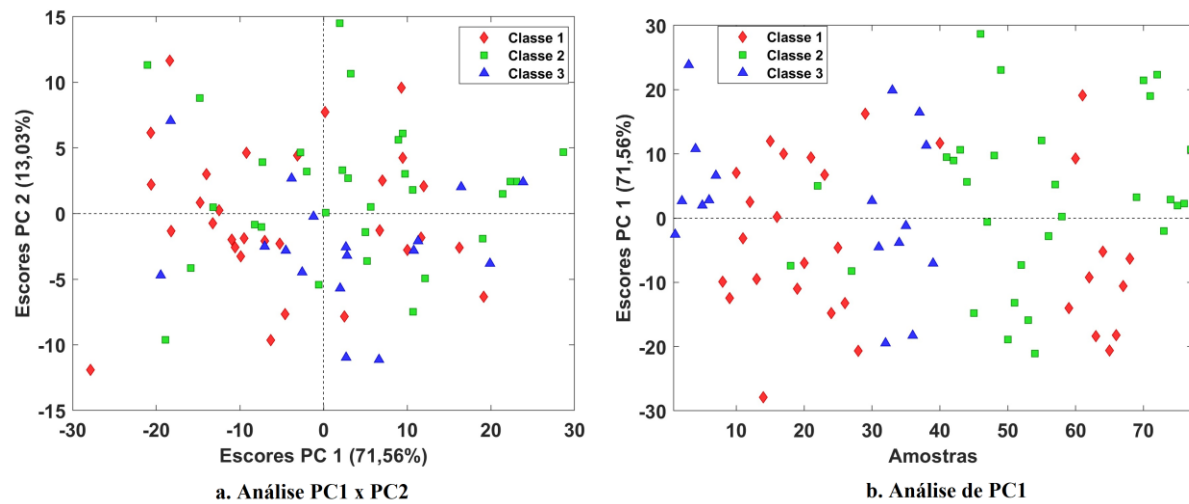
As Figuras 23 (altitude), 24 (latitude) e 25 (longitude) apresentam o modelo PCA com duas componentes principais (a. PC1 x PC2) para um conjunto de dados entre a espectroscopia de Uv-vis e os atributos sensoriais obtidos na análise sensorial dos cafés da Chapada Diamantina, que explicam 84,59% da variância total dos dados. O gráfico de escores para a PC1 (b. Análise de PC1) também está disponível, já que esta componente explica 71,56% da variância cumulativa presente nesse conjunto de dados, em que não verifica-se tendências de separação do conjunto de dados de UV-vis e atributos sensorial dos cafés da safra 2020/2021 correlacionados com a altitude, latitude e longitude, em que conjuntos de dados não apresentam agrupamentos, distribuídos ao longo do lado positivo e negativo da PC1.

Figura 23. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionado com a altitude dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as altitudes estratificadas em ◆ <1000, ■ 1000-1200m, ▲ >1200.



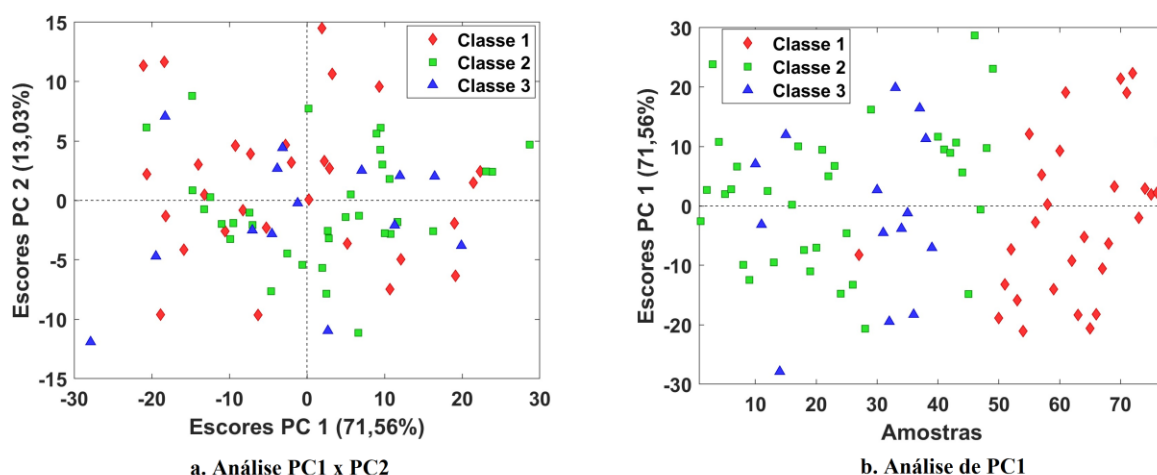
Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 24. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a latitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as latitudes estratificadas em Class 1: ◆ < 8522635, Class 2: ■ 8522635-8642635, Class 3: ▲ >8642635



Fonte: Próprio Autor (2025).

Figura 25. Análise das componentes principais para duas PCs com os dados obtidos por UV-Vis e atributos sensoriais correlacionados com a longitude (UTM) dos cafés provenientes da Chapada Diamantina, sendo as longitudes estratificadas em Class 1: $\blacklozenge$ <218010, Class 2: $\blacksquare$ 218010-258009, Class 3: $\blacktriangle$ >258010.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Diferente das análises realizadas por UV-vis demonstradas acima que não apresentaram tendências de agrupamentos no café natural. Assim, sensorialmente é perceptível diferenças dentro da região analisada, como demonstrada na tabela 2 com as médias das notas finais, no entanto, quimicamente essas diferenças sensoriais não são perceptíveis provavelmente devido à correlação das variáveis sensoriais.

Assim como já discutido para os cafés descascados, o café e seus atributos sensoriais é essencialmente um produto do *terroir* onde são cultivados e produzidos (Borém *et al.*, 2019), assim a composição química dos grãos crus, bem como o acúmulo de compostos não voláteis, como cafeína, trigonelina, ácidos clorogênicos (AGC) e sacarose, são altamente influenciados pela origem geográfica e pelas condições ambientais de cultivo (Taveira *et al.*, 2014, Kwon *et al.*, 2015). Contudo, as diferenças químicas que há nos grãos de café entre o café descascado (processado via úmida) e o café natural (processado via seca) estão relacionadas principalmente ao método de processamento pós-colheita que influenciam diretamente a composição dos grãos e nem sempre são perceptíveis pela técnica de UV-vis como demonstrado nesse estudo.

A técnica de UV-vis encontrou diferenças químicas nos cafés descascado e não observou distinção química em cafés natural dentro das variações geográficas de altitude, latitude e longitude. Essa distinção entre amostras de café descascado e natural é relatado em diversos outros estudos através de outras técnicas espectroscópicas que também realizaram uma caracterização química (Tieghi *et al.*, 2024; Borém *et al.*, 2023; Abreu *et al.*, 2019). Além disso, Tieghi *et al.* (2024) e, em seus estudos observaram que os cafés descascados apresentaram 5,8% mais derivados de CGA em comparação com os não processados, que corrobora com esse estudo, pois nos cafés descascados observou-se maior adstringência e amargor, resultando em notas sensoriais finais menores comparadas ao café natural, que pode ser explicado pois durante a torrefação, sabe-se que parte dos CGAs se decompõe para formar ácidos quínico e cafeico, que estão associados à adstringência, amargor e acidez (Ogutu *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÃO

O presente estudo contribuiu para compreender a complexa interação entre a origem geográfica, processamento pós-colheita, características químicas e os atributos sensoriais resultantes dos grãos de café especial na Chapada Diamantina, Bahia. As descobertas ressaltam a dupla influência da origem e dos métodos de processamento pós-colheita na qualidade química e sensorial do grão. A técnica de espectrometria de absorção do UV-vis foi eficiente e tem potencial para auxiliar na compreensão de análises sensoriais e as características químicas dos grãos de café que são reflexos de fatores geográficos altitude, latitude e longitude. Além disso, essa técnica demonstra como os cafés de processamento distintos possuem características químicas próprias que resultam em atributos sensoriais distintos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG, CNPq e INCT-CAFÉ pelos auxílios financeiros, à UFMG por disponibilizar laboratórios de química e à UESB e Associação Aliança dos Cafeicultores da Chapada Diamantina pelo fornecimento da matéria-prima (café em grão cru).

REFERÊNCIAS

ADNAN, A. *et al.* Reliable discrimination of green coffee beans species: A comparison of UV-Vis-based determination of caffeine and chlorogenic acid with non-targeted near-infrared spectroscopy. *Foods*, v. 9, n. 6, p. 788, 2020.

ALPIZAR, E.; BERTRAND, B. (2004). Incidence of elevation on chemical composition and beverage quality of coffee in Central America. In 20th International Conference on Coffee Science (pp. 322–327). Bangalore:ASIC.

BELAY, A.; GHOLAP, A. V. Characterization and determination of chlorogenic acids (CGA) in coffee beans by UV-Vis spectroscopy. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, v. 3, n. 11, p. 234-240, 2009.

BELAY, A.; TURE, K.; REDI, M.; ASFAW, A. Measurement of caffeine in coffee beans with UV/vis spectrometer. *Food Chemistry*, v. 108, n. 1, p. 310-315, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.024>.

BERTRAND, B., BOULANGER, R., DUSSERT, S., RIBEYRE, F., BERTHIOT, L., DESCROIX, F., & JOET, T. (2012). Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food Chemistry*, 135(4), 2575–2583.

BORÉM, F. M.; ABREU, G. F.; FERREIRA, A. G.; SANTOS, M. S.; ALVES, T. C.; ALVES, A. P. C. (2023). ¹H NMR spectroscopy applied to identify chemical aging markers in green coffee (*Coffea arabica* L.). *Food Chemistry*, 405, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134667>.

BORÉM, M. F. *et al.* Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*, e12552, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1111/joss.12552>

BORÉM, M. F. *et al.* The relationship between organic acids, sucrose and the quality of specialty coffees. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 8, p. 709-717, 2016.

BORÉM, M. F. *et al.* Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic Packaging. *Journal of Stored Products Research*, v. 52, p. 1-6, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspr.2012.08.004>

BSCA - BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION (a). Piatã (BA) volta a produzir o melhor café especial do Brasil. Disponível em: <
<https://brazilcoffeenation.com.br/Not%C3%ADcias/Piata-BA-produz-melhor-cafe-do-Brasil>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

CALDEIRA, G. R. F. *et al.* Authentication of Specialty Coffees from the Fluminense Northwest and Caparaó Regions (Brazil) Using UV-Vis Spectroscopy and Synthetic Samples Partial Least Square Discriminant Analysis (SS-PLS-DA). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 35, p. e-20230144, 2024. <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20230144>

CANZI, F. A. *et al.* Effect of pollination on the composition of raw arabica coffee (*Coffea arabica* L.): antioxidant capacity, bioactive compounds, and volatiles precursors. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 103, n. 11, p. 5578-5587, 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12635>

CARNEIRO, S. M.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; ALVES, R. C. Neuroprotective properties of coffee: An update. *Trends in Food Science & Technology*, v. 113, p. 167–179, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.052>

CARVALHO, V. D. de; CHALFOUN, S. M.; CHAGAS, S. J. R. Relação entre classificação do café pela bebida e composição físico-química, química e microflora do grão beneficiado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 15., 1989, Maringá. Resumos... Rio de Janeiro: IBC-GERCA, 1989. p. 25-26.

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, 2017.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. *Rev Virtual Quim* 9 : 107-134 (2017).

FIGUEIREDO, L. P.; BORÉM, F. M.; RIBEIRO, F.C.; GIOMO, G. S.; TAVEIRA, J. H. DA S.; MALTA, M. R. Fatty acid profiles and parameters of quality of specialty coffees produced in different Brazilian regions. *Afr. J. Agric. Res.*, v. 10, p. 3484-3493, 2015.

FIGUEIREDO, L. P., BORÉM, F. M., CIRILLO, M. A., RIBEIRO, F. C., GIOMO, G. S., & SALVA, T. J. G. (2013). The potential for high quality bourbon coffees from different environments. *The Journal of Agricultural Science*, 5(10), 87–98.

GETACHEW, M. *et al.* The relationship between elevation, soil temperatures, soil chemical characteristics, and green coffee bean quality and biochemistry in southwest Ethiopia. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 42, p. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00801-8>.

GIOMO, G. S.; BORÉM, F. M. Cafés especiais no Brasil: opção pela qualidade. *Inf. Agropecu.*, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 7-16, 2011.

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Indicação Geográfica. Lista das IGs registradas. Ministério da Agricultura e Pecuária. Brasília – DF. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/indicacao-geografica>>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

KOSHIRO, Y.; JACKSON, M. C.; KATAHIRA, R.; WANG, M.-L.; NAGAI, C.; ASHIHARA, H. Biosynthesis of Chlorogenic Acids in Growing and Ripening Fruits of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* Plants. *Z. Nat. C* 2007, 62, 731–742.

KWON, D. J. *et al.* Assessment of green coffee bean metabolites dependent on coffee quality using a ¹H NMR-based metabolomics approach. *Food Research International*, v. 67, p. 175–182, 2015. 10.1016/j.foodres.2014.11.010.

MONTEIRO, C. M., TRUGO, C. L. Determinação de compostos bioativos em amostras comerciais de café torrado. *Química Nova*, v. 28, n. 4, p. 637–641, 2005.

MOREIRA, I. *et al.* Efeito do solvente na extração de ácidos clorogênicos, cafeína e trigonelina em *coffea arábica*. *Química Nova*, v. 37, n. 1, p. 39–43, 2014.

OGUTU, C.; CHERONO, S.; NTINI, C.; WANG, L.; HAN, Y. Comprehensive analysis of quality characteristics in main commercial coffee varieties and wild Arabica in Kenya. *Food Chemistry: X*, 14, p. 100294, 2022. [10.1016/j.fochx.2022.100294](https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100294)

PETRI, N.; RICCO, A.S.; PEREIRA JUNIOR, M. A geodiversidade da Chapada Diamantina (BA) e o potencial de desenvolvimento do geoturismo: desafios e possibilidades. XII SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia - UGB - União da Geomorfologia Brasileira. Crato – Ceará, 2018.

RAMOS, M. F.; RIBEIRO, D. E.; CIRILLO, M. A; BORÉM, F. M. Discriminação da qualidade sensorial do *Coffea arabica* L. (cv. Yellow Bourbon) produzido em diferentes altitudes utilizando árvores de decisão obtidas pelo método CHAID. *Journal of the Science of*

the Food and Agriculture, v. 96, p. 3543–3551, 2016. [https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1002/jsfa.7539](https://doi.org/ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1002/jsfa.7539)

RIBEIRO, D. E. *et al.* Interaction of genotype, environment and processing in the chemical composition expression and sensorial quality of Arabica coffee. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 27, p. 2412-2422, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.10832

SANTOS, H. D.; ALVARENGA, Y. A.; BOFFO, E. F. (2020) ¹H NMR metabolic fingerprinting of Chapada Diamantina/Bahia (Brazil) coffees as a tool to assessing their qualities. *Microchemical Journal*, v. 152, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104293>.

SILVA, C. F. *et al.* Microbial diversity during maturation and natural processing of coffee cherries of *Coffea arabica* in Brazil. *International Journal of Food Microbiology*, v. 60, p. 251-260, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00315-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00315-9)

SILVA, G.B.da; AZEVEDO, P.V. Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina ” no Estado da Bahia para o cultivo de Cítrus. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, n. 1, p.133i-139, 2000.

SILVEIRA, A. S. Atributos sensoriais dos cafés cultivados em diferentes altitudes e faces de exposição na região das Matas de Minas. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, 2015.

SMRKE, S.; KROSLAKOVA, I.; GLOESS, A.N.; YERETZIAN, C. Differentiation of degrees of ripeness of Catuai and Tipica green coffee by chromatographical and statistical techniques. *Food Chem.* 2015, 174, 637–642.

SOUTO, U. T. C. P. *et al.* Identification of adulteration in ground roasted coffees using UV–Vis spectroscopy and SPA-LDA. *LWT - Food Science and Technology*, v. 63, n. 2, p. 1037-1041, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.003>.

SUHANDY, D.; YULIA, M. Peaberry coffee discrimination using UV-visible spectroscopy combined with SIMCA and PLS-DA. *International Journal Of Food Properties*, v. 20, n. S1, p. 331–S339, 2017. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1296861>

TAVEIRA, J. H. S. *et al.* Potential markers of coffee genotypes grown in different Brazilian regions: A metabolomics approach. *Food Research International*, v. 61, p. 75-82, 2014. [10.1016/j.foodres.2014.02.048](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.048).

TIEGHI, H. *et al.* Effects of geographical origin and post-harvesting processing on the bioactive compounds and sensory quality of Brazilian specialty coffee beans. *Food Research International*, v. 186, 114346, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114346>.

TOLESSA, K., D'HEER, J., DUCHATEAU, L., & BOECKX, P. (2016). Influence of growing altitude, shade and harvest period on quality and biochemical composition of Ethiopian specialty coffee. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2849–2857.

WANG, J.; JUN, S.; BITTENBENDER, H. C.; GAUTZ, L.; LI, Q. X. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy for kona coffee authentication. *Journal of Food Science*, 74, 5, 385–391. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01173.x>

XAVIER, M. F. F.; CELESTINO, S. M. C. Caracterização químico-física e química dos grãos crus de quatro cultivares de café irrigado obtidos por via seca, fermentação natural e fermentação enzimática. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, 17 p., 2015.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO (ZEE). Parecer sobre o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do Estado da Bahia, referente ao Território Chapada Diamantina. Bahia, 45p. 2020.