



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE UnB PLANALTINA (FUP)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS (PPGCA)

MARCOS DAVID GUSMÃO GOMES

**ANÁLISE MULTIELEMENTAR PARA DETERMINAÇÃO DE ORIGEM
GEOGRÁFICA DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL**

Brasília, DF
2025

MARCOS DAVID GUSMÃO GOMES

**ANÁLISE MULTIELEMENTAR PARA DETERMINAÇÃO DE ORIGEM
GEOGRÁFICA DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Faculdade UnB Planaltina (FUP/UnB) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto

Linha de pesquisa: Manejo e Conservação de Recursos Naturais

Área: Estrutura, dinâmica e conservação ambiental

Brasília, DF

2025

MARCOS DAVID GUSMÃO GOMES

**ANÁLISE MULTIELEMENTAR PARA DETERMINAÇÃO DE ORIGEM
GEOGRÁFICA DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633a	Gusmão Gomes, Marcos David Análise Multielementar para Determinação de Origem Geográfica de Madeira na Amazônia Legal / Marcos David Gusmão Gomes; orientador Gabriela Bielefeld Nardoto; co-orientador Fábio José Viana Costa. Brasília, 2025. 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) Universidade de Brasília, 2025. 1. Rastreamento da madeira. 2. Atribuição geográfica. 3. Análise multielementar. I. Bielefeld Nardoto, Gabriela, orient. II. José Viana Costa, Fábio, co-orient. III. Título.
-------	--

MARCOS DAVID GUSMÃO. GOMES

**ANÁLISE MULTIELEMENTAR PARA DETERMINAÇÃO DE ORIGEM
GEOGRÁFICA DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Faculdade UnB Planaltina (FUP/UnB) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profª. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto (Presidente/Orientadora)
Faculdade UnB Planaltina (FUP/UnB)

Prof. Dr. Rodrigo Studart Correa (Membro Titular)
Faculdade UnB Planaltina (FUP/UnB)

Prof. Dr. Alexandre Tadeu Brunello (Membro Titular)
CENA/USP

Prof. Dr. Luís Felipe Salemi (Membro Suplente)
Faculdade UnB Planaltina (FUP/UnB)

Brasília, DF, 15 de julho de 2025.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento é a Deus, o Comandante de todas as coisas.

A conclusão desta dissertação de mestrado marca o fim de uma etapa acadêmica e o encerramento de um ciclo pessoal de muito aprendizado, desafios e crescimento.

Agradeço a minha esposa, pelo suporte e apoio, o que possibilitou o meu foco na conclusão do mestrado. À Helena, minha princesa, que me inspirou e me deu forças para continuar na jornada.

À minha família, base de tudo que sou. Agradeço aos meus pais, Pedro e Laura (*in memoriam*), pelo amor incondicional, pela criação, pelo esforço descomunal para me proporcionar educação formal e pelos valores que me inspiram todos os dias.

À minha orientadora, Profa. Gabriela Bielefeld Nardoto, por sua orientação, disponibilidade constante e pelas valiosas contribuições científicas; a sua confiança e incentivo foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Ao meu coorientador, Fábio Costa, por disponibilizar o seu tempo para me orientar nas práticas laboratoriais e nas análises estatísticas.

À Universidade de Brasília, representada pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, pela oportunidade de formação e pelo ambiente acadêmico de excelência.

Aos colegas do grupo de pesquisa EIS, pela troca de conhecimentos, pelo companheirismo e por compartilharem comigo tantos momentos de trabalho, discussão e apoio mútuo.

Às instituições - em especial à Polícia Federal (PF), à UFMG e ao CENA - e aos profissionais (em especial ao meu coorientador Fábio Costa e a estagiária Beatriz Alencar do INC/PF, e à Profa. Clésia Nascentes e seus estagiários de graduação, mestrado e doutorado, da UFMG) que colaboraram na coleta de dados, análises e fornecimento de informações.

Finalmente, agradeço a todos que porventura eu não tenha citado, mas que participaram de alguma forma no processo de construção desse trabalho.

A todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

A exploração madeireira, especialmente em regiões tropicais, tem gerado impactos ambientais significativos, incluindo a redução da biodiversidade e o aumento das emissões de gases de efeito estufa. O Brasil, como um dos maiores produtores de madeira tropical, enfrenta desafios relacionados à legalidade da origem da madeira, em grande parte devido a fraudes na documentação que atesta a sua procedência. O estudo buscou avaliar a análise multielementar como técnica para determinação da origem geográfica de madeira explorada na Amazônia Legal, sob a influência de fatores ambientais e genéticos na composição química da madeira, discutindo a importância de métodos que vão além da verificação documental, uma vez que a simples emissão de documentos, como o Documento de Origem Florestal (DOF), não garante a autenticidade da madeira, especialmente em cadeias de suprimento não integradas. A metodologia adotada na pesquisa é multidisciplinar, integrando técnicas de dendroquímica e análise multielementar. Amostras de madeira foram coletadas de diferentes espécies em 09 (nove) localidades na Amazônia Brasileira, e a composição química foi analisada para identificar elementos presentes em baixas concentrações (elementos-traço) que podem indicar a origem geográfica. Os resultados obtidos demonstram que a análise multielementar é capaz de discriminar amostras de madeira de diferentes localidades, revelando diferenças significativas nas concentrações de elementos químicos. Elementos como Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb destacaram-se como marcadores com diferenças significativas entre localidades. A pesquisa destaca a relevância da análise multielementar como uma ferramenta promissora para a rastreabilidade e a regulamentação do comércio de produtos florestais. Os achados podem contribuir para políticas públicas voltadas à conservação ambiental e ao manejo sustentável das florestas, ajudando a combater a exploração ilegal de madeira.

Palavras-chave: Análise multielementar. Origem geográfica. Madeira. Amazônia. Conservação ambiental.

ABSTRACT

Timber harvesting, especially in tropical regions, has led to significant environmental impacts, including biodiversity loss and increased greenhouse gas emissions. Brazil, as one of the largest producers of tropical timber, faces challenges regarding the legality of timber origin, largely due to fraud in documentation that certifies its provenance. This study aimed to evaluate multielement analysis as a technique for determining the geographic origin of timber harvested in the Brazilian Amazon, considering the influence of environmental and genetic factors on the chemical composition of wood. It discusses the importance of methods that go beyond document verification, as the mere issuance of documents, such as the Forest Origin Document (DOF), does not guarantee timber authenticity, especially in non-integrated supply chains. The research adopted a multidisciplinary methodology, integrating dendrochemical techniques and multielement analysis. Wood samples from different species were collected across the Amazon, and their chemical composition was analyzed to identify trace elements that may indicate geographic origin. The results show that multielement analysis can discriminate timber samples from different locations, revealing significant differences in the concentrations of chemical elements. Elements such as Cr, Se, B, Zn, Ba, and Pb stood out as markers with significant differences among regions. The study highlights the relevance of multielement analysis as a promising tool for traceability and regulating the trade of forest products. Our findings may contribute to public policies aimed at environmental conservation and sustainable forest management, helping to combat illegal logging.

Keywords: Multi-elemental analysis. Geographical origin. Wood. Amazon Environmental conservation.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nome científico e comum, localidade e número de indivíduos das espécies amostradas	34
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das propriedades químicas: soma de bases, ilustração a; fósforo total, ilustração - ao longo da Bacia Amazônica	20
Figura 2 – Diferentes regiões de uma seção de tronco	21
Figura 3 – Visão geral esquemática dos processos que determinam a composição elementar do alburno (a) e do cerne (b) de árvores tropicais	24
Figura 4 – Localização dos sítios de coleta das amostras das essências florestais utilizadas neste estudo	31
Figura 5 – Classe de solos de ocorrência das amostras de madeira, identificadas por marcadores verdes	32
Figura 6 – Mapa geológico de ocorrência das amostras de madeira, identificadas por marcadores verdes	33
Figura 7 – Protocolo de amostragem de madeira	37
Figura 8 - Box plot da concentração de alumínio (Al, mg/kg) em amostras da porção a 50% do raio do disco de diferentes localidades	43
Figura 9 – Box plot da concentração (mg/kg) de cromo (Cr), em amostras retiradas da porção a 50% do raio do disco, em diferentes localidades	44
Figura 10 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras com valores médios das porções do raio do disco de madeira de cada amostra, de diferentes localidades.....	45
Figura 11 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades	45
Figura 12 – Gráficos de Correlação de Spearman, com valores de R para correlação Sr com Ca (A); e para correlação de Ce com La (B).	46
Figura 13 – Gráfico de Correlação de Spearman, demonstrando forte associação de Sr com Ca e de Ce com La	46
Figura 14 – Análise de Componente Principal para elementos químicos (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) em amostras com valores médios das porções do raio do disco de madeira de cada amostra, de diferentes localidades.....	47
Figura 15 – Análise de Componente Principal para elementos químicos (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades.	48
Figura 16 – Box plot da concentração de ferro (Fe), em mg/kg, em diferentes localidades, para as amostras de Ipê.....	49
Figura 17 – Box plot da concentração de boro (B), em mg/kg, em diferentes localidades.....	50
Figura 18 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de jatobá com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades	53
Figura 19 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de jatobá retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades	53
Figura 20 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de maçaranduba com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades.....	54
Figura 21 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de maçaranduba retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades	54

Figura 22 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de ipê referentes aos valores médios das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades	55
Figura 23 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de ipê retiradas da região a 100% do disco de madeira, de diferentes localidades	55
Figura 24 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Itapiranga retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes espécies	59
Figura 25 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Itapiranga retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies	59
Figura 26 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Flona do Jamari retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies	60
Figura 27 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Flona do Tapajós retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies	61
Figura 28 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira, de diferentes localidades	79
Figura 29 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades	80
Figura 30 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades	81
Figura 31 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes localidades	82
Figura 32 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira, de diferentes localidades	83
Figura 33 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades	84
Figura 34 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	88
Figura 35 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	89
Figura 36 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	90
Figura 37 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	91
Figura 38 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	92
Figura 39 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades	93
Figura 40 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades ..	94
Figura 41 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades ..	95
Figura 42 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades ..	96
Figura 43 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades	97

Figura 44 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades	98
Figura 45 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades.....	99
Figura 46 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	100
Figura 47 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	101
Figura 48 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	102
Figura 49 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	103
Figura 50 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	104
Figura 51 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações climáticas das localidades em que as amostras foram coletadas.	30
Tabela 2 – Condições operacionais utilizadas no ICP-MS.....	38
Tabela 3 – Desvio-padrão das concentrações dos elementos químicos: do valor médio das regiões do raio do disco; e dos valores das regiões a 0% do raio do disco (B), a 25% (C), a 50% (D), a 75% (E) e a 100% (F).....	41
Tabela 4 – Elementos que mais diferiram ($p < 0,05$) entre as localidades, considerando os valores médios das diferentes regiões do disco	44
Tabela 5 – Elementos em que foram constatadas diferenças significativas quando comparadas as localidades da Flona do Tapajós e de Itaituba para diferentes regiões do disco e para os valores médios das regiões do disco de amostra de Ipê.	52
Tabela 6 – Valores das concentrações dos elementos analisados	74
Tabela 7 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (B-1) e para as regiões do disco de 0% (B-2), 25% (B-3), 50% (B-4), 75% (B-5) e 100% (B-6)	78
Tabela 8 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (D-1) e para as regiões do disco de 0% (D-2), 25% (D-3), 50% (D-4), 75% (D-5) e 100% (D-6) de Jatobá	85
Tabela 9 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (E-1) e para as regiões do disco de 0% (E-2), 25% (E-3), 50% (E-4), 75% (E-5) e 100% (E-6) de Maçaranduba	86
Tabela 10 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (F-1) e para as regiões do disco de 0% (F-2), 25% (F-3), 50% (F-4), 75% (F-5) e 100% (F-6) de Ipê.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVO.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	SOLOS AMAZÔNICOS	18
2.2	MADEIRA E A SUA COMPOSIÇÃO ANATÔMICA E QUÍMICA	20
2.3	MICRO E MACRONUTRIENTES EM TECIDOS LENHOSOS	22
2.4	TRANSFERÊNCIA DE ELEMENTOS INORGÂNICOS SOLO-ÁRVORE	24
2.5	DENDROQUÍMICA.....	25
2.6	USO DE CONCENTRAÇÃO ELEMENTAR NA ATRIBUIÇÃO DE ORIGEM GEOGRÁFICA	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	29
3.2	AMOSTRAS	33
3.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	36
3.4	ANÁLISE LABORATORIAL	37
3.4.1	Materiais, soluções analíticas e reagentes	37
3.4.2	Determinação elementar por ICP-MS	38
3.5	ANÁLISE DOS DADOS.....	39
4	RESULTADOS.....	41
4.1	ANÁLISE DA TOTALIDADE DAS AMOSTRAS (119 árvores).....	41
4.2	ANÁLISE DOS DADOS DE LOCALIDADES DIFERENTES POR ESPÉCIE..	48
4.3	ANÁLISE DOS DADOS DE ESPÉCIES DIFERENTES DE UMA MESMA LOCALIDADE	56
5	DISCUSSÃO.....	62
6	CONCLUSÃO	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8	REFERÊNCIAS	69
	Apêndice A – Concentrações de elementos analisados.....	74
	Apêndice B – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados da totalidade das amostras	78
	Apêndice C – Análise de componente principal dos dados da totalidade das amostras	79

Apêndice D – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados diferentes por espécie (Jatobá)	85
Apêndice E – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados de localidades diferentes por espécie (Maçaranduba)	86
Apêndice F – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados de localidades diferentes por espécie (Ipê).....	87
Apêndice G – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Jatobá).....	88
Apêndice H – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Maçaranduba)	94
Apêndice I – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Ipê)	100

1 INTRODUÇÃO

A exploração madeireira de forma irracional tem gerado a diminuição das áreas de florestas naturais e da biodiversidade, além de contribuir para o aumento da emissão de gases de efeito estufa. A floresta amazônica desempenha papel relevante na manutenção da diversidade biológica e na regulação climática, especialmente em relação ao armazenamento de Carbono e ao sequestro de CO₂, além de influenciar a formação de chuvas. Contudo, os valores absolutos de perdas de florestas nativas primárias ainda permanecem elevados e preocupantes, com a atividade madeireira se configurando como importante catalisador da devastação das florestas amazônicas, embora se observe uma leve tendência de queda nas taxas de desmatamento nos últimos anos, de acordo com dados do PRODES (Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia). Essa devastação é exacerbada pelo uso de práticas inadequadas e ilegais na exploração florestal (Lentini *et al.*, 2021).

Apesar da prática predatória observada em algumas áreas com planos de manejo aprovados e em locais não autorizados, a atividade florestal na Amazônia Legal é fundamental para a sustentação das economias de diversas localidades, evidenciando a importância desse setor na geração de receita. Assim, a conciliação entre a produção madeireira em bases sustentáveis e a geração de renda emerge como uma meta a ser perseguida. Dada a relevância dessa atividade, o Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores de madeira, com destaque para os estados do Pará e Mato Grosso no que diz respeito à madeira tropical em tora, posicionando-se atrás da Indonésia, da Índia e do Vietnã (Itto, 2020).

Apesar da implementação do manejo florestal voltado para a produção sustentável, as fraudes continuam a ser desafio significativo no processo produtivo, uma vez que determinar a origem da madeira se revela tarefa complexa, especialmente em cadeias de suprimento não integradas que dependem exclusivamente da comprovação por meio de um documento de origem (Gasson *et al.*, 2021). Na atualidade, no Brasil, o Documento de Origem Florestal (DOF), estabelecido pela Portaria MMA n. 253/2006, é o documento obrigatório para o transporte e armazenamento de produtos florestais provenientes de fontes nativas. O DOF contém informações sobre a procedência desses produtos e pode ser emitido, com a autorização do Instituto do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama), por integrantes dos setores produtivo e empresarial de base florestal, na condição de usuários finais do serviço, e pelos órgãos ambientais que compõem o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA). É importante ressaltar que nos estados do Pará e do Mato Grosso, os

maiores produtores nacionais de madeira, a emissão é feita por meio da Guia Florestal (GF), uma vez que esses estados possuem sistemas próprios, ainda não integrados ao DOF.

A verificação dos dados contidos no DOF utiliza a técnica de identificação macroscópica de madeira, amplamente empregada pelos órgãos responsáveis pela fiscalização de cargas em transporte e/ou em depósito, e na perícia de produtos florestais apreendidos. Essa técnica atua como primeiro filtro para prevenir o transporte e a comercialização de madeira ilegal, especialmente em casos em que a fraude se manifesta por meio da identificação deliberadamente errônea das espécies.

Conforme apontado por Deklerck *et al.* (2020), duas considerações fundamentais para o monitoramento e a regulamentação do comércio ilegal de madeira são: (1) a identificação da espécie que está sendo comercializada; (2) a determinação da proveniência geográfica da madeira.

A discriminação da proveniência da madeira representa um dos usos mais inovadores da ferramenta isotópica para o rastreamento forense, consolidando-se progressivamente como um recurso investigativo no âmbito do sistema judiciário (Martinelli *et al.*, 2020). A fim de corroborar o significativo avanço da pesquisa isotópica, tem-se o recente estudo de Martinelli *et al.* (2025) que revelou variação nas razões $87\text{Sr}/86\text{Sr}$, variando de 0,71096 a 0,81720, demonstrando que essa variabilidade oferece o potencial para uma procedência altamente distinta, o que permite o rastreamento preciso de processos ecológicos e biogeoquímicos em diversos cenários geológicos e ambientais da Amazônia.

Em contrapartida, a aplicação de elementos-traço inorgânicos em estudos voltados à determinação da origem geográfica da madeira ainda é incipiente. Nesse contexto, Rees (2015) realizou uma análise conjunta de isótopos estáveis e elementos inorgânicos, constatando que amostras de madeira provenientes de Gana, Camarões, República Democrática do Congo, Congo e Madagascar apresentaram diferenças significativas entre si. Para isso, foi empregada a técnica estatística multivariada de análise discriminante canônica (CDA), aplicada a dados de razões isotópicas estáveis e de multielementos inorgânicos. O estudo revelou que a análise isolada de variáveis individuais de elementos inorgânicos não se mostrou suficiente para garantir discriminação geográfica eficaz. Em vez disso, a combinação de variedade de variáveis de elementos-traço proporcionou nível significativo de discriminação entre as amostras de madeira.

Conforme afirmado por Creydt *et al.* (2021), diversos fatores exógenos de localização, como o clima e a composição do solo, exercem influência sobre as células vegetais. A análise multielementar para a determinação da origem baseia-se na absorção de elementos químicos por um organismo, a qual é diretamente relacionada à quantidade desses elementos presentes

no solo (Deklerck, 2023). Entretanto, há outros fatores como biodisponibilidade, sistema radicular, metabolismo e processos fisiológicos que influenciam na composição química da árvore. Segundo ŠTULC *et al.* (2024) espera-se alguma diversidade na composição dendroquímica mesmo entre árvores no mesmo sítio, devido tanto às variações no microambiente quanto à diversidade de características fisiológicas e morfológicas das próprias árvores. Por exemplo, uma árvore com crescimento dominante mais rápido exigiria mais nutrientes do que uma árvore com crescimento mais lento.

O solo é uma das características ambientais que mais impacta o crescimento das plantas, uma vez que a disponibilidade de nutrientes minerais afeta diretamente o desenvolvimento das árvores. Entre os atributos do solo, os aspectos físicos e químicos são os que realmente influenciam tanto qualitativa quanto quantitativamente a qualidade da madeira (Bellote; Filho; Dedecek, 2005).

Certos elementos inorgânicos presentes no solo são incorporados aos tecidos das plantas por meio de seus processos fisiológicos. Esses elementos possibilitam a atribuição da origem de determinados produtos, uma vez que refletem a composição de elementos-traço do ambiente em que as plantas se desenvolvem (solo).

Segundo Wille *et al.* (2017), as variações nas composições químicas observadas no lenho das árvores, tanto entre diferentes espécies quanto dentro de uma mesma espécie, apresentam magnitudes elevadas e são predominantemente influenciadas por fatores genéticos e ambientais. A dendroquímica, por sua vez, analisa os elementos químicos retidos na madeira durante o crescimento da planta. Essa retenção pode ocorrer por meio de processos metabólicos, através do sistema solo-água-raiz, ou por meio de interações com a atmosfera externa (Col; Bueno, 2009).

1.1 JUSTIFICATIVA

Em resposta à crescente ameaça e atividade em torno da extração ilegal de madeira, vários países introduziram ou estão em processo de elaboração de legislação destinada a eliminar, ou pelo menos reduzir, o comércio de produtos madeireiros extraídos ilegalmente (Low *et al.*, 2022). Contudo, apenas a instituição de normativos não tem sido suficiente para assegurar a conservação das florestas e a manutenção dos seus serviços ecossistêmicos.

Embora os mecanismos de controle da origem de produtos florestais estejam em constante processo de melhoria, ainda existem lacunas na rastreabilidade da madeira, sobretudo no que diz respeito à origem geográfica. Apenas a documentação de controle da origem dos

produtos florestais, como DOF, não é suficiente para atestar que a madeira foi proveniente do Plano de Manejo Florestal informado, haja vista que grande parte das fraudes de exploração de madeira reside na prática de “esquentar¹” madeira.

Além da fragilidade do controle atual, a falta de métodos para verificar de forma independente a origem da madeira limita a aplicação efetiva da lei e a transparência total da cadeia de suprimentos, tal como a origem da madeira é atualmente verificada por documentos externos e etiquetas (Boeschoten *et al.*, 2023).

Portanto, ferramentas de rastreamento baseadas na composição da madeira podem ser mais efetivas do que o controle documental. A composição multielementar pode fornecer uma impressão digital química para o rastreamento da madeira, apresentando-se como um novo método promissor (Boeschoten *et al.* 2022).

Diante do cenário de exaurimento de espécies de valor comercial, como o Ipê, em determinados polos produtivos da Bacia Amazônica (Norman; Zunino, 2022), observa-se intensa pressão sobre Terras Indígenas e Unidades de Conservação adjacentes às áreas de manejo. Essa situação é agravada pela limitação das ferramentas disponíveis para o rastreamento da madeira. Nesse contexto, a utilização de elementos-traço emerge como ferramenta adicional que pode contribuir significativamente para a elucidação de crimes relacionados à exploração e ao transporte ilegal de madeira, possibilitando a adoção dessa ferramenta por institutos de criminalística e instituições fiscalizatórias (ambientais, policiais, de defesa agropecuária, entre outros) das unidades da Federação no seu cotidiano, e fortalecerá a prova material na persecução penal, com vistas a subsidiar o julgamento em bases científicas, evitando a subjetividade e equívocos.

1.2 OBJETIVO

Desenvolver uma ferramenta para rastreamento de madeira a partir da análise multielementar de espécies arbóreas nativas da Amazônia Legal.

¹ Dar aparência de legalidade a madeiras extraídas de áreas não autorizadas por meio do uso de documentos de autorização de exploração e de transporte gerados a partir de áreas licenciadas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a composição multielementar das amostras de madeira, com foco em elementos-traço, por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS).

- Analisar as variações na concentração de elementos químicos entre as diferentes localidades de origem, considerando a influência de fatores ambientais e edáficos, para verificar o potencial discriminante da análise multielementar na identificação da origem geográfica das amostras de madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLOS AMAZÔNICOS

As florestas tropicais da Bacia Amazônica ocorrem em uma ampla variedade de diferentes tipos de solo, os quais podem surgir de uma vasta gama de materiais de origem, condições climáticas, interações bióticas, formas de relevo, elementos geomórficos e idade do solo (Quesada *et al.*, 2011). Na região norte do Brasil, que contempla quase a totalidade da Amazônia Brasileira, as principais classes de solos são os Argissolos e Latossolos, com percentuais de 37,6% e de 28,2% (Junior *et al.*, 2011), respectivamente, caracterizando-se por serem solos bastante intemperizados.

Ainda no que diz respeito à formação dos solos amazônicos, Quesada *et al.* (2011) assevera que grande parte da diversidade de solos da Amazônia se originou das diferenças consideráveis na história da geologia e da geomorfologia que ocorrem em toda a Bacia. Tais diferenças na história geológica resultaram em níveis contrastantes bem documentados de fertilidade do solo e desenvolvimento pedogenético entre as regiões amazônicas (Radambrasil, 1978).

O intemperismo sobre o material de origem desempenha importante papel no processo de formação dos solos amazônicos. No processo pedogenético, o material de origem, é o estado inicial do sistema solo (Jenny, 1941). Durante o desenvolvimento do solo e do ecossistema, os níveis de nutrientes alteram devido ao intemperismo (Quesada *et al.*, 2010). De modo que, as concentrações de muitos elementos minerais essenciais para o crescimento das plantas, como fósforo, cálcio, magnésio e potássio, podem ser reduzidas pela intemperização, a depender do estágio do intemperismo.

De acordo com Val *et al.* (2021), processos de intemperismo químico (carbonatação, dissolução, hidrólise, oxidação-redução) são acelerados nos climas quentes e úmidos das florestas tropicais da Amazônia de baixa altitude, enquanto o intemperismo físico é mais ativo nos altos Andes. Os referidos autores explicam que o intemperismo físico ocorre por meio de processos geomórficos que quebram as partículas do solo em tamanhos menores, ao passo que a maior parte do intemperismo químico dos solos amazônicos envolve reações com a água.

Quesada *et al.* (2010) apontam que, assim como a fertilidade, as propriedades físicas do solo estão intrinsecamente relacionadas à geomorfologia e à idade do solo. Solos altamente alterados, comumente encontrados em superfícies de intemperismo antigo, geralmente, têm profundidades de vários metros acima do material de origem e geralmente têm muito boas

condições físicas (isto é, profundo, bem agregado e bem drenado). Ainda de acordo com os autores, em contrapartida, solos mais jovens, porém mais férteis da Amazônia, ocorrem em superfícies de intemperismo mais recentes e têm suas propriedades físicas intimamente relacionadas com o seu menor desenvolvimento pedogenético. À medida que os solos evoluem, sua composição mineral começa a depender mais do ambiente de intemperização do que da composição do seu material de origem (Kämpf, Curi; Marques, 2009).

Em solos jovens, o pH tende a ser mais elevado devido à liberação de cátions básicos, que mantêm os níveis de alumínio (Al) em concentrações desprezíveis. Considerando que todos os outros fatores de influência permanecem constantes, à medida que os solos envelhecem, o Al se estabiliza na forma mineral, e a sua hidrólise passa a afetar o pH. No entanto, quando os minerais que contêm Al predominam na matriz mineral, esse elemento se torna o principal produto do intemperismo, resultando em um pH mais baixo, mesmo em solos jovens. Dessa forma, o material de origem, o desenvolvimento pedogênico e o grupo mineral exercem influências significativas sobre o pH do solo (Quesada *et al.*, 2010).

Portanto, a base do atual gradiente de tendência oeste-leste na região amazônica, que se reflete na geomorfologia, litologia e geoquímica, e explica taxas contrastantes de intemperismo e composição de nutrientes em toda a Amazônia, foi formada pelas mudanças geológicas (Val *et al.*, 2021).

Em estudo elaborado por Quesada *et al.* (2010), observou-se na Amazônia uma gama de diversos solos, onde nas áreas ocidentais, perto da cordilheira dos Andes e nos limites ao sul e ao norte, os solos tendem a ser distribuídos entre os níveis pedogenéticos mais baixos (por exemplo, Cambissolos), enquanto as áreas centrais e orientais da Amazônia têm solos mais intensamente intemperizados, como Latossolos e Argissolos; o que dá origem a grande variação das propriedades químicas, conforme se observa na Figura 1 (ilustrações a e b), que mostra a distribuição dos indicadores de fertilidade do solo (soma de bases, Figura 1 (ilustração a): fósforo total, e física do solo ao longo da Bacia Amazônica, com as propriedades do solo variando previsivelmente ao longo de um gradiente de desenvolvimento pedogênico.

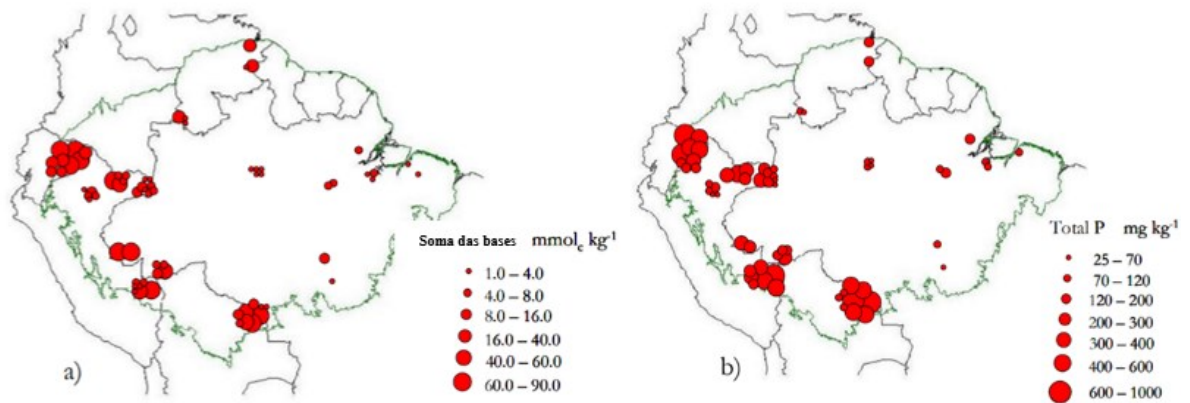


Figura 1 – Distribuição das propriedades químicas: soma de bases, ilustração a; fósforo total, ilustração - ao longo da Bacia Amazônica

Fonte: Quesada *et al.* (2010), adaptado.

Além do interesse nos aspectos de formação e composição química, o solo tem sido investigado para verificar a sua função na composição e dinâmica de espécies arbóreas na Amazônia. Em toda a Bacia Amazônica existem dois gradientes bem registrados de disponibilidade de recursos, sendo que o gradiente de fertilidade do solo se estende de nordeste a sudoeste (Quesada *et al.*, 2010), refletindo na dinâmica das árvores da floresta amazônica, com as florestas crescendo nos solos geralmente mais férteis da Amazônia ocidental, tendo madeiras menos densas (Baker *et al.*, 2004).

Nesse sentido, Fyllas *et al.* (2009) explica que a clara mudança no componente genético das características foliares associadas a solos mais férteis ou menos férteis implica que a fertilidade do solo exerce um papel fundamental na modulação da composição de comunidades em toda a Amazônia. Para os autores, as espécies de solo mais ricos tendem a possuir massa foliar por área intrinsecamente mais baixa, e intrinsecamente possuem maiores concentrações de nutrientes foliares em comparação com espécies em solos menos férteis. Apesar dessa consistência, diferentes padrões de escala foram observados entre locais de baixa e alta fertilidade.

2.2 MADEIRA E A SUA COMPOSIÇÃO ANATÔMICA E QUÍMICA

Entre os materiais de origem biológica, a madeira é sem dúvida o mais conhecido e utilizado, o lenho de uma árvore contém grande quantidade de substâncias que são utilizadas como matérias primas em quase todos os campos da tecnologia. A madeira é um material heterogêneo, sendo sua variabilidade estrutural e química refletida numa ampla gama de

propriedades físicas, tais como: densidade; permeabilidade; comportamento quanto à capilaridade; condutividade térmica; difusão da água de impregnação, entre outras (Klock; Andrade, 2013).

Do ponto de vista anatômico, a madeira quando observada na seção transversal do tronco apresenta casca, albarno, cerne e medula, considerando a disposição de fora para dentro, conforme se observa na Figura 2.



Figura 2 – Diferentes regiões de uma seção de tronco

Fonte: Instituto Florestal/SP (2020).

Nota: A = medula; B = cerne; C = albarno; D = casca.

Dessas estruturas as que têm papel de destaque na translocação de minerais do sistema solo-planta são os xilemas primários e secundários, localizados entre a camada do câmbio e o centro da árvore. A função de ambos é o transporte e distribuição de água e solutos (seiva do xilema) das raízes para outras partes mais altas da árvore (Marschner, 1983).

O albarno é a região que se segue ao câmbio vascular, geralmente de cor clara, constituída de células fisiologicamente ativas, não obstruídas, por onde circula as substâncias nutritivas da planta, em fluxo ascendente (Florsheim *et al.*, 2020).

Por outro lado, há uma parte mais interna do caule, constituída por tecido fisiologicamente morto, denominada cerne. A madeira dessa região vai, gradativamente, perdendo a atividade vital e adquirindo, frequentemente, coloração mais escura devido à deposição de taninos, gomas, óleos, resinas e outros materiais resultantes da transformação das substâncias de reserva contidas nas células do parênquima do albarno interno antes de sua morte e posterior transformação em cerne (Coradin; Camargos, 2002).

A proporção desses dois tecidos na madeira se altera ao longo do ciclo de vida da árvore. Em certa idade, a madeira interna do tronco da maioria das árvores começa a se transformar em um cerne completamente morto e a sua proporção no tronco se torna sucessivamente maior à medida que a árvore cresce; ou seja, a camada de alburno vai sendo convertida em cerne à medida que a árvore envelhece. As células mortas do parênquima produzem depósitos orgânicos como resina, substâncias fenólicas, pigmentos etc. (Sjostrom, 1993).

Tão importante quanto a anatomia é a química da madeira para compreender a sua composição. Basicamente, a madeira é formada pela combinação química da água, retirada do solo, com o gás carbônico do ar, retido pelas folhas, sob a ação dos raios solares (Gonzaga, 2006).

A célula da madeira consiste principalmente de compostos orgânicos, como celulose, hemicelulose e lignina (Sjostrom, 1993). No entanto, também existem elementos inorgânicos presentes na madeira, embora em menor quantidade. Um número considerável de constituintes minerais é necessário para o crescimento das plantas. Tais constituintes retirados do solo são encontrados na madeira. A composição do material encontrado na madeira depende das condições ambientais sob as quais a árvore cresce e da localização do mineral na planta. Os constituintes minerais compreendem principalmente potássio e cálcio, que constituem até 50% dos cátions na cinza da madeira; também são encontrados magnésio, manganês, sódio, fósforo e cloro, assim como sílica – encontrada em espécies de florestas tropicais. Os ânions mais comuns são os carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos (Klock; Andrade, 2013).

2.3 MICRO E MACRONUTRIENTES EM TECIDOS LENHOSOS

A relação entre solo e elementos inorgânicos na madeira pode ser entendida através do processo de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas. O solo é o meio que atua como reservatório de minerais necessários às plantas, incluindo árvores que produzem madeira (Faquin, 2005). Alguns elementos inorgânicos são essenciais para o crescimento e funcionamento das plantas e desempenham um papel vital na composição e na estrutura da madeira.

Além do Carbono (C), Oxigênio (O) e Hidrogênio (H), que compõem os compostos orgânicos, treze elementos minerais são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas. Esses elementos são classificados em dois grupos com base em aspectos quantitativos: (1) macronutrientes, que incluem Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S); (2) micronutrientes, que englobam Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo) e Zinco (Zn). É

importante ressaltar que as plantas absorvem do solo todos os elementos químicos que se encontram na forma disponível, sem muita distinção. Assim, além dos elementos essenciais (macronutrientes e micronutrientes), as plantas também absorvem outros elementos não essenciais que podem ter efeitos benéficos para o desenvolvimento de determinadas espécies (Faquin, 2005).

Ainda existem os elementos classificados como metais pesados, que podem causar danos às plantas quando presentes em concentrações elevadas. É importante lembrar que muitos desses metais também são considerados micronutrientes, como Cobalto (Co), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni) e Zinco (Zn). Tanto os micronutrientes quanto os metais pesados tóxicos fazem parte da fração mineralógica do solo, podendo ser absorvidos pelas raízes ou folhas das plantas, que não fazem distinção entre eles – as plantas absorvem, do ambiente, elementos que podem, eventualmente, envenená-las. Exemplos de metais pesados tóxicos para as plantas incluem Arsênio (As), Cádmiio (Cd), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Antimônio (Sb), Bário (Ba), Berílio (Be), Tálcio (Tl), Estanho (Sn) e Titânio (Ti) (Malavolta *et al.*, 2006).

A principal fonte desses elementos para a planta é o solo, que é originado a partir do intemperismo das rochas que, por sua vez, são compostas por minerais (Rodrigues, 2018). Dessa forma, a presença e concentração de elementos inorgânicos no solo dependem de vários fatores, incluindo a composição da rocha-mãe.

As características pedológicas de uma área se refletem na composição elementar do solo. Nas fases iniciais do intemperismo e dos processos pedogênicos, a composição de elementos-traço do solo será herdada do material de origem. No entanto, com o tempo, o estado dos oligoelementos do solo tornar-se-á diferente devido à influência de outros fatores, como a vegetação (Kabata-Pendias, 2001).

Ainda quanto à influência das variáveis ambientais na composição elementar das plantas, Fyllas *et al.* (2009) ao analisar componente ambiental de variação de característica, descobriram que a fertilidade do solo é o preditor mais importante, influenciando todas as concentrações foliares de nutrientes.

As concentrações de oligoelementos nas plantas estão geralmente positivamente correlacionadas com a abundância desses elementos nos solos e até mesmo com as abundâncias nas rochas subjacentes. Kabata-Pendias (2001) afirma que as plantas revelam uma capacidade variável e, às vezes, específica de absorver os elementos-traço do solo,

representada pela relação entre um elemento nas plantas e sua concentração no solo, o chamado Coeficiente de Absorção Biológica (CAB).

Portanto, a concentração e composição desses elementos-traço nos tecidos lenhosos podem refletir as condições do solo e, assim, fornecer impressão digital química específica do local (Boeschoten *et al.*, 2022).

2.4 TRANSFERÊNCIA DE ELEMENTOS INORGÂNICOS SOLO-ÁRVORE

As árvores absorvem elementos inorgânicos do solo predominantemente via seus sistemas radiculares. Esses elementos incluem macronutrientes como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), além de micronutrientes, como Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe).

Vitousek (1984) aponta que do reservatório do solo, os elementos minerais são então levados pelas raízes e transportados através do alburno. Boeschoten *et al.* (2022) levantaram a hipótese de que a composição elementar do alburno reflete principalmente os reservatórios do solo (Figura 3). Esses elementos contribuem para a composição química da madeira, afetando sua resistência mecânica, densidade e durabilidade.

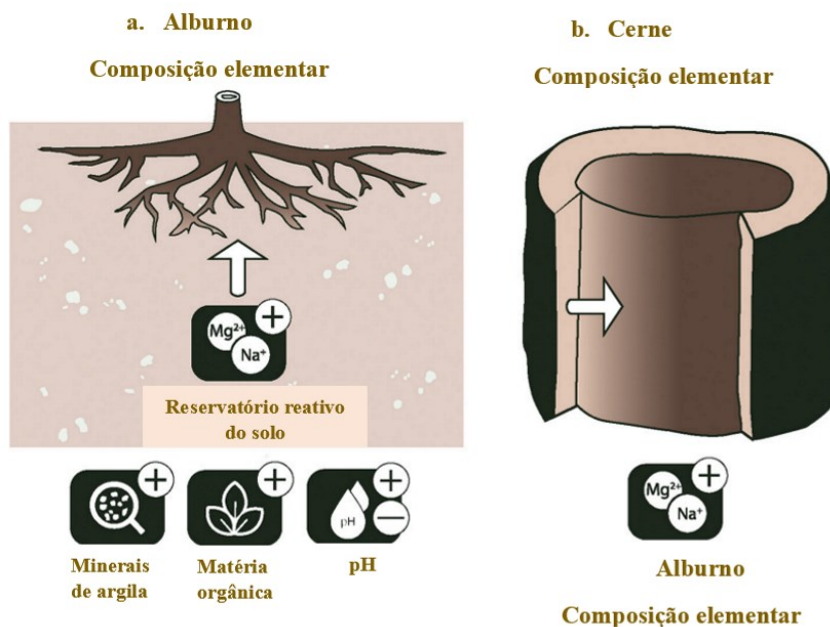


Figura 3 – Visão geral esquemática dos processos que determinam a composição elementar do alburno (a) e do cerne (b) de árvores tropicais

Fonte: Boeschoten *et al.* (2022), adaptado.

Em geral, as plantas absorvem facilmente os elementos-traço que estão na solução do solo, tanto na forma iônica livre quanto na forma complexa (Kabata-Pendias, 2004). A

absorção desses elementos ocorre principalmente através do sistema radicular da árvore, com os minerais dissolvidos entrando pela epiderme, passando pelo córtex radicular e finalmente atingindo o estelo (cilindro vascular) e o xilema (Rees, 2015).

Depois da absorção, ocorre extensa translocação de compostos químicos durante a conversão do alburno em cerne, implicando diferentes concentrações elementares dentro desses tecidos da árvore (Meerts, 2002). Smith *et al.* (2014) explicam que durante esse processo, elementos fisiologicamente relevantes podem ser realocados por meio de reciclagem do alburno interno, que é transformado em cerne, para o alburno externo. A translocação possibilita o acúmulo de compostos secundários no cerne (células mortas) enquanto as concentrações de elementos essenciais se acumulam no alburno (Meerts, 2002). Por outro lado, a árvore acumula em maior concentração elementos não essenciais, próximo da sua região central, haja que a concentração de sítios de ligação catiônica (pectatos) diminui de maneira previsível da medula em direção ao câmbio (Herbauts *et al.*, 2002; Momoshima; Bondietti, 1990).

Processos fisiológicos de alocação de elementos no tronco e a proporção de diferentes tipos de células podem afetar a composição elementar do cerne (Hietz *et al.*, 2015), a parte comercializada da árvore para a maioria das espécies madeireiras de valor comercial. Esses processos podem reduzir diferenças na composição elementar entre árvores e, assim, obscurecer possíveis impressões elementares individuais ou específicas do local na madeira (Boeschoten *et al.*, 2022). Até agora, os condutores da variação espacial na composição elementar da madeira permanecem pouco compreendidos; Kagawa (2007) constatou em estudo anterior que não houve correlação significativa entre as concentrações de elementos inorgânicos e a longitude/latitude dos habitats, ao passo que um estudo conduzido por Durand *et al.* (1999) mostrou associações das concentrações elementares da madeira com o tipo de rocha-mãe.

2.5 DENDROQUÍMICA

Dendroquímica é a análise química e interpretação com precisão de anéis de árvores datados para reconstruir o momento das mudanças no ambiente químico externo. A interpretação dos padrões dendroquímicos começa com a compreensão da estrutura e da função da madeira (Smith *et al.*, 2014).

A aplicação da dendroquímica no monitoramento ambiental é promissora e, com uma compreensão mais detalhada da ciclagem de nutrientes e metais nas árvores, os estudos

dendroquímicos continuarão a fornecer informações úteis sobre cargas históricas de poluição e mudanças na química do solo (Watmough, 2011).

Os elementos absorvidos se deslocam radialmente entre os tecidos do lenho da árvore, de acordo com o seu potencial de mobilidade. Nesse sentido, Cutter e Guyette (1993) categorizaram o potencial de mobilidade radial no xilema, com base na solubilidade, na razão carga iônica/raio iônico e na natureza essencial em: altamente móveis (As, P, K, Na, Mg, N, S, Cl e B); moderadamente móveis (Ca, Sr, Mn, Zn, Rb, Cu e Mo); e de baixa mobilidade (Fe, Mo, Ni, Sn, Sb, Ba, Al, Pb e Cd).

Observa-se que além da química do solo, a composição elementar do cerne é também determinada por processos fisiológicos do caule, como a transição de albúrnio para cerne (Boeschoten *et al.*, 2022).

A movimentação radial dos elementos químicos, sobretudo os altamente móveis, resulta em concentrações diferentes desses elementos entre o albúrnio e o cerne. Isso foi confirmado por Wille *et al.* (2017) ao encontrar maior concentração de potássio na parte externa de fatias de madeira em relação à região mais perto da medula enquanto para os elementos Cálcio (Ca), Enxofre (S) e Silício (Si) foi constatada maior concentração nas partes internas das fatias.

Rodriguez, Carvalho e Filho (2018) também obtiveram resultados que comprovam as diferentes concentrações ao longo do raio, indicando diminuição na concentração de cálcio (Ca), manganês (Mn), ferro (Fe) e fósforo (P) nos anéis de crescimento anuais na direção da medula para a casca. Em contrapartida, foi observada maior concentração de potássio (K) e enxofre (S) nos anéis próximos à medula e à casca.

As comparações das diferenças de concentração entre o albúrnio e o cerne, expressas como a discrepância radial, também revelaram que as concentrações elementares foram maiores no albúrnio para três dos dez principais elementos essenciais (Cu, K e P) quando comparado ao cerne, em resultados obtidos por Boeschoten *et al.* (2022).

2.6 USO DE CONCENTRAÇÃO ELEMENTAR NA ATRIBUIÇÃO DE ORIGEM GEOGRÁFICA

Nos últimos anos, diversas soluções possíveis de rastreamento foram apresentadas, desde imagens de satélite a aplicativos de rastreamento e tecnologia *blockchain*, em face da crescente demanda por rastreabilidade e controle da cadeia produtiva de produtos florestais.

Embora promissoras e úteis, resolvem apenas uma parte do problema da cadeia de suprimentos, e as práticas fraudulentas ainda são possíveis (Deklerck, 2023).

A rastreabilidade da madeira é percebida como um elemento-chave das abordagens de governança e gestão para o manejo sustentável dos recursos florestais e o combate à exploração madeireira ilegal (Tonouéwa *et al.*, 2024).

A alta taxa de extração ilegal em regiões tropicais, especialmente na Amazônia, tem impulsionado o desenvolvimento de métodos científicos para a determinação da origem geográfica da madeira, baseados em parentesco genético e espectrometria de massas (Deklerck, 2023).

As técnicas de espectrometria de massas para a origem da madeira baseiam-se na influência do ambiente na composição química, compostos principais ou mesmo oligoelementos, de materiais vegetais. Essa composição química fornece uma "impressão digital química", que pode então ser usada para verificar a origem da extração, dada às variações nas concentrações dos elementos resultantes de diferenças no solo e no substrato rochoso (Horacek *et al.*, 2022).

Entre as técnicas de espectrometria de massas, destaca-se o uso da concentração elementar, ou perfil elementar, obtida através do ICP-MS (espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente), como uma ferramenta analítica promissora e complementar aos sistemas documentais e de certificação.

A técnica do ICP-MS, embora seja destrutiva e mais demorada, por exemplo quando comparada à técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, possibilita detectar elementos-traço em concentrações muito baixas, ampliando o número de elementos analisados e o limite de detecção e, conseqüentemente, favorecendo a discriminação geográfica com alto grau de acurácia. Portanto, o uso do ICP-MS permite a análise de muitas variáveis elementares, possibilitando comparação robusta com bibliotecas de referência estabelecidas para identificar a origem (Rees, 2015).

A assinatura química refere-se ao perfil elementar ou isotópico presente na madeira, que pode refletir características específicas do ambiente em que a árvore se desenvolveu, como tipo de solo, clima, composição da água e interações biogeoquímicas locais. Essas assinaturas podem variar significativamente entre diferentes regiões geográficas, possibilitando a discriminação espacial da origem da madeira, mesmo dentro de uma mesma espécie. Nesse contexto, análises de perfil químico de espécies de Ipê revelaram diferenças significativas entre espécies e tecidos de madeira, indicando que o perfil multielementar tem grande potencial como ferramenta forense (Moreira *et al.*, 2024).

Estudos recentes demonstram a aplicabilidade desse método em diferentes tipologias florestais, com um gradiente amplo de variabilidade edáfica e climática, permitindo diferenciações químicas marcantes. Por exemplo, o trabalho de Aguzzoni *et al.* (2024) revelou variação surpreendentemente consistente nos perfis multielementares ao aplicar análises elementares e isotópica de Sr (estrôncio), oferecendo novos *insights* sobre a utilização de marcadores químicos em estudos de procedência.

Pesquisas como as de Rees (2015) e Moreira *et al.* (2024) destacam a integração de assinaturas químicas com métodos estatísticos multivariados, como Análise de Correlação Canônica, a Análise de Componentes Principais (PCA) e modelos de classificação supervisionada (como Random Forest), ampliando a confiabilidade na determinação da origem.

Contudo, desafios ainda persistem, como a necessidade de bancos de dados geoquímicos regionais mais abrangentes, a padronização metodológica e a consideração da variabilidade intraespécie e intraplanta, o que pode influenciar os resultados se não houver um controle experimental rigoroso.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

As amostras utilizadas foram provenientes de espécies madeireiras das seguintes localidades:

- I Estação Experimental ZF-2 do INPA ($2^{\circ}38'00''\text{S}/60^{\circ}09'00''\text{W}$), no município de Manaus, AM;
- II Lago do Capanã Grande ($06^{\circ}01'23.92''\text{S}/61^{\circ}56'52.32''\text{W}$), no município de Manicoré, AM;
- III Comunidade Amazonino ($00^{\circ}08'55.12''\text{S}/67^{\circ}00'31.56''\text{W}$), em São Gabriel da Cachoeira, AM;
- IV Planos de Manejo Florestal-PMFs nos municípios de Itacoatiara, AM ($02^{\circ}54'41.40''\text{S}/58^{\circ}53'44.16''\text{W}$) e Itapiranga, AM ($02^{\circ}29'38.31''\text{S}/59^{\circ}07'19.41''\text{W}$);
- V PMF da Flona do Jamari no município de Itapoã do Oeste, RO ($09^{\circ}18'17.53''\text{S}/62^{\circ}58'39.58''\text{W}$ e $09^{\circ}10'1.24''\text{S}/63^{\circ}0'43.43''\text{W}$);
- VI PMF da Flona do Tapajós nos municípios de Belterra, PA ($03^{\circ}23'53.56''\text{S}/54^{\circ}58'26.19''\text{W}$) e Rurópolis ($03^{\circ}59'31.48''\text{S}/54^{\circ}54'28.57''\text{W}$);
- VII Área de floresta no município de Comodoro, MT ($13^{\circ}13'48.12''\text{S}/60^{\circ}16'1.35''\text{W}$);
- VIII Área de floresta no município de Querência, MT ($13^{\circ}4'44.61''\text{S}/52^{\circ}23'9.76''\text{W}$);
- IX Planos de Manejo Florestal nos municípios Itaituba, PA ($05^{\circ}57'21.53''\text{S}/55^{\circ}07'33.96''\text{W}$ e $06^{\circ}02'8.16''\text{S}/55^{\circ}14'50.28''\text{W}$) e Novo Progresso, PA ($07^{\circ}13'38.57''\text{S}/55^{\circ}26'16.44''\text{W}$), conforme Figura 4.

As tipologias florestais das áreas de estudo abrangem Floresta Ombrófila Densa Submontana com Dossel Emergente (PMFs Itaituba), Floresta Ombrófila Aberta Submontana (Flona do Jamari), Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Cipós (PMF Novo Progresso), Campinarana/Floresta Ombrófila (São Gabriel da Cachoeira), Floresta Ombrófila/Floresta Estacional (Comodoro), Floresta Ombrófila/Floresta Estacional com Atividades Agrárias (Querência), Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (Lago do Capanã Grande, Flona do Tapajós, ZF2, PMFs de Itapiranga e de Itacoatiara) classificadas de acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012).

Quanto ao clima, segundo a classificação de Koppen, a Flona do Jamari, a localidade de Comodoro e os planos de manejo florestais de Itaituba e de Novo Progresso enquadram-se no tipo Am (clima tropical monção). Por outro lado, as localidades da Flona do Tapajós,

da ZF2, da Comunidade Amazonino, do Lago do Capanã Grande e dos planos de manejo florestais de Itacoatiara e de Itapiranga são definidos como tipo Af (clima tropical úmido). Já a localidade de Querência é classificada como tipo Aw (clima tropical com estação seca de inverno), com clima marcadamente sazonal. Abaixo seguem na tabela 1 características climáticas (precipitação e temperatura) da área de estudo.

Tabela 1 – Informações climáticas das localidades em que as amostras foram coletadas.

Fonte: INMET e ANA/SNIRH

Local	Coordenas geográficas		Temperatura (°C)	Precipitação (mm)
	Latitude	Longitude		
Comunidade Amazonino	00°08'55.12"S	67°00'31.56"W	26,7	2800
ZF2	2°38'00"S	60°09'00"W	27,4	2300
PMF de Itapiranga	02°29'38.31"S	59°07'19.41"W	26,5	2200
PMF de Itacoatiara	02°54'41.40"S	58°53'44.16"W	26,5	2300
Lago do Capanã Grande	06°01'23.92"S	61°56'52.32"W	26,6	2300
Flona do Tapajós	03°59'31.48"S	54°54'28.57"W	26,7	2100
	03°23'53.56"S	54°58'26.19"W		1800
PMFs Itaituba	05°57'21.53"S	55°07'33.96"W	26,6	2100
	06°02'8.16"S	55°14'50.28"W		
PMF Novo Progresso	07°13'38.57"S	55°26'16.44"W	26,2	2100
Flona do Jamari	09°18'17.53"S	62°58'39.58"W	26,1	2200-2300
	09°10'1.24"S	63° 0'43.43"W		2300
Comodoro	13°13'48.12"S	60°16'1.35"W	23,3	1900
Querência	13°4'44.61"S	52°23'9.76"W	25,9	1700

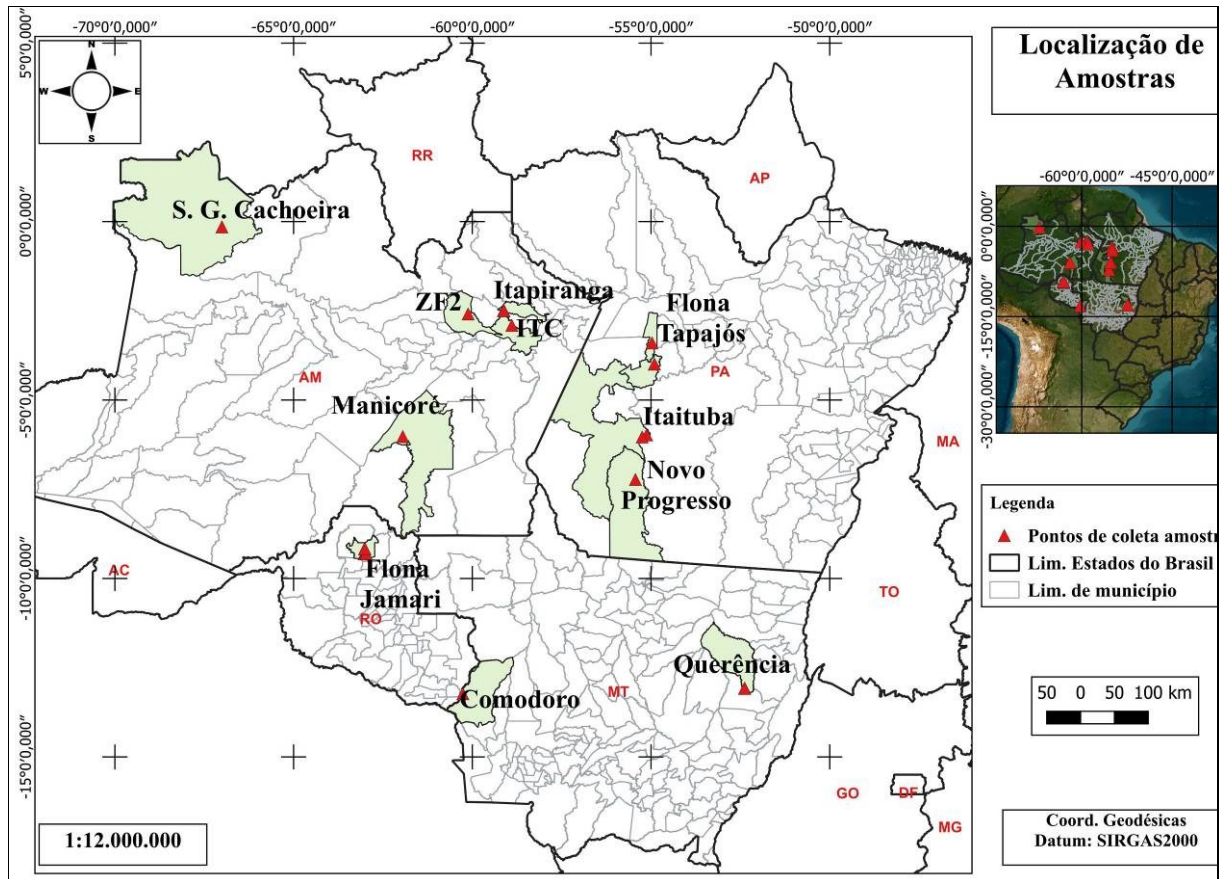


Figura 4 – Localização dos sítios de coleta das amostras das essências florestais utilizadas neste estudo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

As amostras obtidas nas supracitadas localidades estavam distribuídas nas seguintes classes de solos, segundo classificação do Pronasolos: PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PMFs de Novo Progresso e de Itaituba, Flona do Tapajós e Comodoro); LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Querência); e LAd - Latossolo Amarelo Distrófico (ZF2, Lago do Capanã Grande, São Gabriel da Cachoeira, Flonas Jamari e Tapajós, e PMFs de Itacoatira e de Itapiranga); conforme ilustrado na Figura 5.

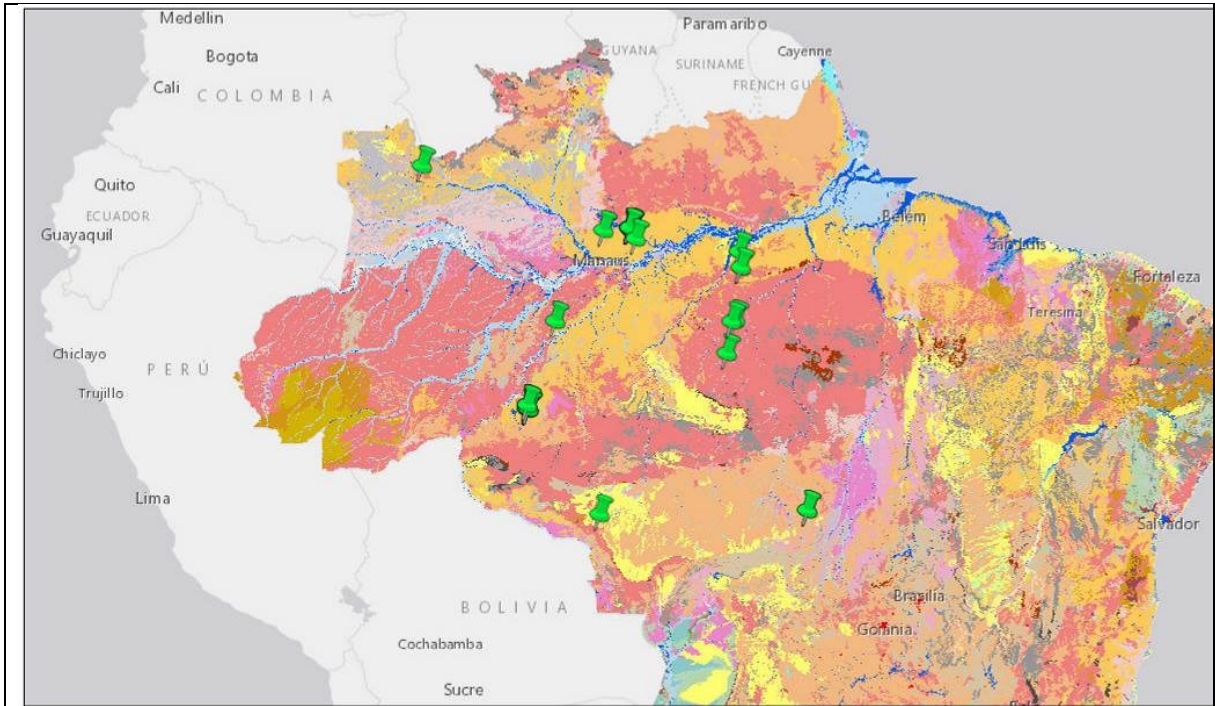


Figura 5 – Classe de solos de ocorrência das amostras de madeira, identificadas por marcadores verdes

Fonte: Pronasolos (2025).

As amostras obtidas estavam distribuídas nas seguintes unidades geológicas, segundo classificação do Pronasolos: Formação Iça (Lago do Capanã Grande e São Gabriel da Cachoeira); Formações Serra da Providência e Jamari (Flona do Jamari); Formação Colorado (Comodoro); Formação Ronuro (Querência); Formação Parauari (PMF de Novo Progresso); Formação Maloquinha (PMF de Itaituba); Formação Alter do Chão (Flona do Tapajós, ZF2 e PMFs de Itacoatira e de Itapiranga) e Formação Monte Alegre (Flona do Tapajós), conforme ilustrado na Figura 56.

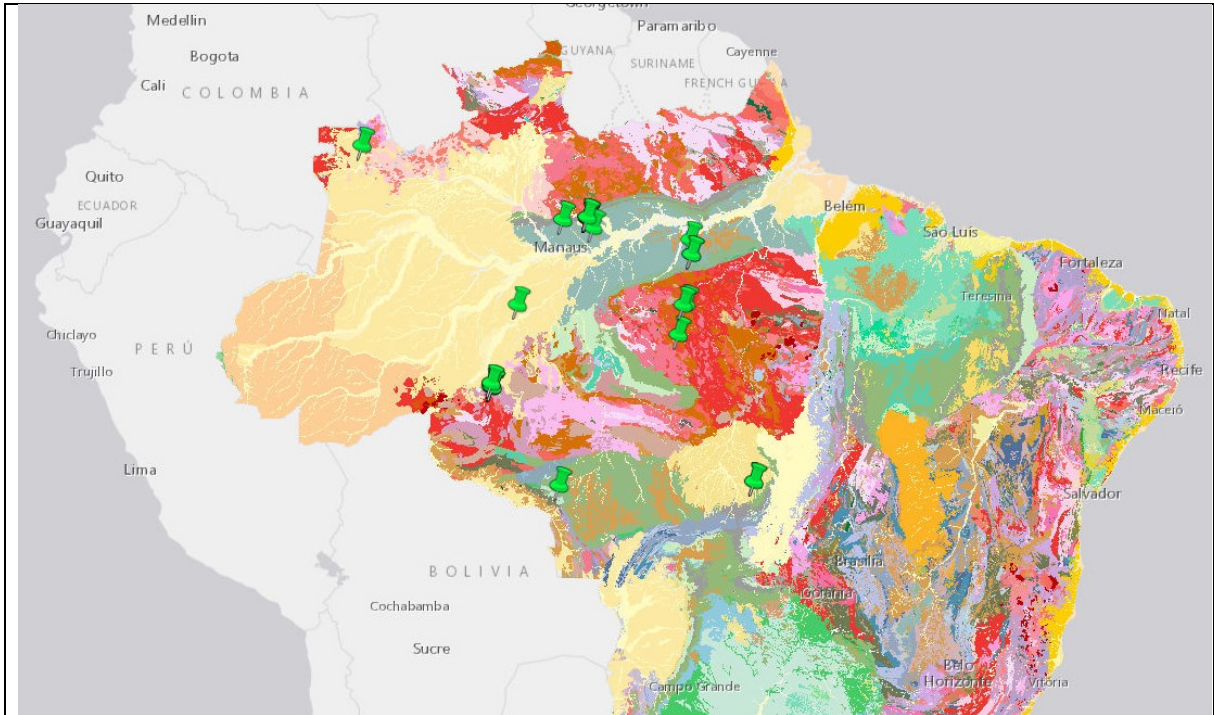


Figura 6 – Mapa geológico de ocorrência das amostras de madeira, identificadas por marcadores verdes

Fonte: Pronasolos (2025).

3.2 AMOSTRAS

Para as análises foram utilizadas essências florestais madeireiras, provenientes da Amazônia Legal, previamente coletadas no âmbito do projeto aprovado no Edital n. 16/2020 – Programa de Cooperação Acadêmica em Segurança Pública e Ciências Forenses (PROCAD), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) intitulado “Rastreamento de origem e georreferenciamento de vestígios criminais com base em traçadores isotópicos e elementares”, que teve como coordenador o Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli (CENA/USP) e a coordenadora adjunta a Profa. Dra. Gabriela Bielefeld Nardoto.

De início, as amostras foram identificadas por meio das suas características anatômicas macroscópicas. As análises abrangeram amostras de 119 indivíduos contemplados pelas espécies Pequiá-marfim (*Aspidosperma desmanthum* Benth. ex Müll.Arg.), Carapanauba (*Aspidosperma excelsum* Benth), Sucupira (*Bowdichia spp*), Pau-rainha (*Brosimum rubescens* Taub.), Pequi (*Caryocar spp.*), Cedromara (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke), Guariuba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.), Embireira (*Couratari stellata* A. C. Sm.), Angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.), Matamatá (*Eschweilera sp.*), Ipê (*Handroanthus sp.*), Jatobá (*Hymenaea*

courbaril L.), Jutáí mirim (*Hymenaea spp.*), Angelim-pedra (*Hymenolobium modestum* Ducke), Angelim (*Hymenolobium sp.*), Ucuúba-punã (*Iryanthera laevis* Markgr.), Ucuúba (*Iryanthera sp.*), Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Chevalier), Itauba (*Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez), Itauba (*Mezilaurus spp.*), Piazinho (*Micrandropsis scleroxylon* W.A.Rodrigues), Miraoba folha grande (*Mouriri brachyanthera* Ducke), Caju², Canela (*Nectandra spp.*), Louro-gamela (*Ocotea rubra* Mez), Tento (*Ormosia paraensis* Ducke.), Roxinho (*Peltogyne paniculata* Benth.), Breu-branco (*Protium hebetatum* Daly), Breu (*Protium sp.*), Mandioqueira (*Qualea paraensis* Ducke), Cardeiro (*Scleronema micranthum* Ducke), Cuiarana (*Terminalia tetraphylla* (aublet) Howard)), breu sucuruba branco (*Trattinnickia burseraefolia* mart.), breu sucurubinha (*Trattinnickia glaziovii* swart.), breu sucuruba (*trattinnickia rhoifolia* willd.) e Ucuuba da terra firme (*Virola sebifera* Aubl), que estavam distribuídas nas proporções descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Nome científico e comum, localidade e número de indivíduos das espécies amostradas

Nome Científico	Nome Comum	Localidade/Estado	N. de indivíduos
<i>Aspidosperma desmanthum</i> Benth. ex Müll.Arg.	Pequiá-marfim.	Itapiranga, AM.	3
<i>Aspidosperma excelsum</i> Benth.	Carapanauba	Querência, MT (Tanguro).	1
<i>Bowdichia spp.</i>	Sucupira.	Comodoro, MT	1
<i>Brosimum rubescens</i> Taub.	Muirapiranga/ Pau-rainha.	ZF2	1
		Flona do Jamari, RO.	1
<i>Caryocar spp.</i>	Pequi.	Comodoro, MT.	1
<i>Cedrelinga catenaeformis</i> Ducke.	Cedromara.	Flona do Jamari, RO.	6
<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.	Guariuba.	Itacoatiara.	3
		Itapiranga, AM.	1
		Flona do Jamari, RO.	1
<i>Couratari stellata</i> A. C. Sm.	Embireira.	Flona do Jamari, RO.	1
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke.	Angelim-vermelho.	Itapiranga, AM.	3
		Itacoatiara.	3
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Cumaru.	Itapiranga, AM.	1
		Flona do Tapajós, PA.	2

Continua

² Nome científico não encontrado.

Continuação

Nome Científico	Nome Comum	Localidade/Estado	N. de indivíduos
<i>Eschweilera sp.</i>	Matamatá.	São Gabriel da Cachoeira.	1
<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê.	Flona do Tapajós, PA.	9
		Itaituba.	6
		Novo Progresso.	1
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá.	Flona do Jamari, RO.	5
		Flona do Tapajós, PA.	1
		Itacoatiara, AM.	3
		Itaituba, PA.	4
		Itapiranga, AM.	3
		Novo Progresso, PA.	1
		ZF2, AM.	1
<i>Hymenaea spp.</i>	Jutaí mirim.	Flona do Tapajós, PA.	3
<i>Hymenolobium modestum</i> Ducke.	Angelim-pedra.	Itapiranga, AM.	3
<i>Hymenolobium sp.</i>	Angelim.	ZF2, AM.	1
		Itacoatiara, AM.	3
<i>Iryanthera laevis</i> Markgr.	Ucuúba-punã.	Manicoré.	2
<i>Iryanthera sp.</i>	Ucuúba.	São Gabriel da Cachoeira.	2
		Manicoré.	2
<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier.	Maçaranduba.	Itacoatiara.	3
		Itaituba.	3
		Itapiranga, AM.	3
		Novo Progresso.	1
		ZF2.	1
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez.	Itaúba.	Itapiranga, AM.	3
<i>Mezilaurus spp.</i>	Itaúba.	Comodoro, MT.	1
<i>Micrandropsis scleroxylon</i> W.A.Rodrigues.	Piãozinho.	ZF2, AM.	1
<i>Mouriri brachyanthera</i> Ducke.	Miraoba folha grande.	Querência, MT (Tanguro).	1
<i>Não identificado.</i>	Caju.	ZF2, AM.	1
<i>Nectandra spp.</i>	Canela.	Comodoro, MT.	1

Continua

Continuação

Nome Científico	Nome Comum	Localidade/Estado	N. de indivíduos
<i>Ocotea rubra</i> Mez.	Louro-gamela.	Itapiranga, AM.	3
<i>Ormosia paraensis</i> Ducke.	Tento.	Querência, MT (Tanguro).	1
<i>Peltogyne paniculata</i> Benth.	Roxinho.	Flona do Jamari, RO.	3
<i>Protium hebetatum</i> Daly.	Breu-branco.	Manicoré.	1
		São Gabriel da Cachoeira.	2
<i>Protium sp.</i>	Breu.	ZF2, AM.	1
<i>Qualea paraensis</i> Ducke	Mandioqueira.	Itapiranga, AM	2
<i>Scleronema micranthum</i> Ducke.	Cardeiro.	ZF2, AM.	1
<i>Terminalia tetraphylla</i> (aublet) howard.	Cuiarana.	Querência, MT (Tanguro).	2
<i>Trattinnickia burseraefolia</i> mart.	breu sucuruba branco.	Querência, MT(Tanguro).	1
<i>Trattinnickia glaziovii</i> swart.	breu sucurubinha.	Querência, MT (Tanguro).	1
<i>trattinnickia rhoifolia</i> willd.	breu sucuruba.	Querência, MT (Tanguro).	1
<i>Virola sebifera</i> Aubl.	Ucuuba da terra firme.	Querência, MT (Tanguro).	1

Fonte: elaboração própria (2025).

3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram retiradas cinco subamostras ao longo do raio de disco (alburno, cerne e medula) a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da lâmina cortada (Figura 7), de cada um dos indivíduos arbóreos selecionados, com o auxílio de serra circular de bancada, modelo 2704, marca Makita. Em seguida, as subamostras foram reduzidas a fragmentos, acondicionadas em tubos de 20 ml. Cada subamostra possuía as dimensões de 1,5 cm de largura por 2,2 mm de espessura.

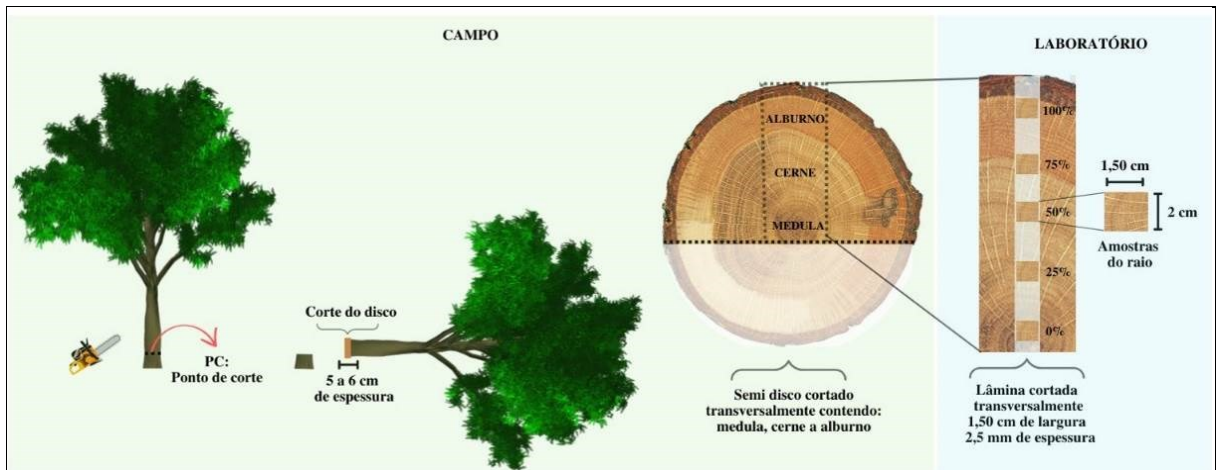


Figura 7 – Protocolo de amostragem de madeira

Fonte: Projeto Capes/Procad (2020). Rastreamento de origem e georreferenciamento de vestígios criminais com base em traçadores isotópicos e elementares. Coordenador: Luiz Antonio Martinelli.

Na sequência, as amostras de madeira foram moídas por 2 min e frequência de 30 hz em moinho de vibração MM 400, marca RETSCH, para homogeneização e melhor representatividade da amostra. O corte e a moagem das amostras foram feitos no laboratório de identificação vegetal, no Instituto Nacional de Criminalística, em Brasília, DF.

Alíquotas entre 0,023 g a 0,027 g das amostras moídas de madeira foram digeridas em 300 μL de HNO_3 14,0 mol L^{-1} em um tubo, tipo eppendorf. As amostras foram aquecidas em banho maria, sobre chapa de aquecimento, a 80 $^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos. Após resfriamento, foram adicionados aos tubos 100 μL de peróxido de hidrogênio e aquecido novamente a 80 $^{\circ}\text{C}$ por 10 minutos. Após resfriamento, os digeridos foram aferidos para 4 mL e posteriormente analisados por ICP-MS após uma diluição de 10 vezes realizada utilizando água ultrapura.

3.4 ANÁLISE LABORATORIAL

As etapas de digestão das amostras, da preparação das diluições e da determinação elementar via ICP-MS foram realizadas sob a supervisão e orientação da Profa. Dra. Clésia Cristina Nascentes, no Laboratório de Química analítica, do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

3.4.1 Materiais, soluções analíticas e reagentes

As vidrarias e frascos utilizados foram descontaminados em banho de ácido nítrico 10% v v^{-1} por 12 h e lavados com água deionizada. Todos os experimentos foram preparados

utilizando peróxido de hidrogênio 30% v v⁻¹ (Merck, Alemanha) e ácido nítrico (Merck, Diadema, SP, Brasil) destilados em um sistema de subdestilação e água ultrapura (resistividade maior que 18,2 MΩ cm) obtida a partir de um sistema Milli-Q® Plus Total Water System (Millipore, Billerica, MA, EUA). As soluções analíticas de calibração foram preparadas a partir de diluições de alíquotas de soluções estoque monoelementares contendo 1000 mg L⁻¹ de Mg, B, Al, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Zn, Se, Ba, La, Ce e Pb (Fluka, São Paulo, Brasil) em HNO₃ 0,14 mol L⁻¹, bem como para o padrão interno Y utilizado. Ítrio foi adicionado como padrão interno (Y) na concentração de 250 µg L⁻¹ em todas as amostras, brancos e curva analítica. O material de referência certificado (MRC) NIST 1573a. SRM 1573a – Tomato Leaves foi utilizado na validação da metodologia aplicada.

3.4.2 Determinação elementar por ICP-MS

A determinação dos elementos Mg, B, Al, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Zn, Se, Ba, La, Ce e Pb foi realizada utilizando um espectrômetro de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS 7700, Agilent Technology, Tóquio, Japão) operado em modo cela de colisão utilizando gás hélio (99,995%). Os resultados do elemento Li não foram considerados devido à predominância de valores nulos resultantes da não detecção dele nas amostras analisadas. A Tabela 2 apresenta a descrição dos parâmetros operacionais utilizados no ICP-MS.

Tabela 2 – Condições operacionais utilizadas no ICP-MS

Parâmetro instrumental	ICP-MS
Potência de radiofrequência (kW)	1,55
Vazão do gás do plasma (L min ⁻¹)	15
Vazão do gás auxiliar (L min ⁻¹)	1,00
Vazão de nebulização (L min ⁻¹)	1,05
Profundidade de amostragem (mm)	8,0
Vazão de He na célula de colisão (mL min ⁻¹)	4,5
Tempo de integração (s)	3,0
Nebulizador	Micro-Mist
Câmara de nebulização – Câmara de pulverização	Scott type – double pass

Fonte: elaboração própria (2025).

3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Em razão da subdivisão das amostras com base nas regiões do raio, foram analisadas estatisticamente as concentrações dos elementos nas cinco regiões (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), de forma individualizada, e o valor médio de todas as regiões³. Essa abordagem visou a investigar a presença de diferenças significativas e determinar qual dos dados (individual ou média) proporciona maior discriminação da origem das amostras. Para garantir a independência da amostra, médias das regiões dos discos foram utilizadas.

Foi realizado o cálculo de medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio-padrão).

Por se tratar de inúmeras variáveis dependentes correlacionadas, foi utilizada a Manova. A aplicação desse teste evita o erro de tipo I. A fim de verificar a normalidade da distribuição dos dados, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, dada a não normalidade dos dados, utilizou-se o Teste de Kruskal-Wallis (não-paramétrico) para comparar a existência de diferenças estatísticas entre as classes amostrais. Ao ser confirmada a presença de diferença significativa, foi usado o Teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (pós-teste não paramétrico) para definir as diferenças significativas entre os grupos. Foi utilizada análise de componente principal (PCA) para explicar os dados reduzindo as variáveis e possibilitando identificar grupos distintos. Utilizou-se o teste de Spearman, em nível de 5% de probabilidade de erro, para verificar a correlação entre os elementos.

Os referidos testes estatísticos foram aplicados considerando os seguintes cenários: análise global dos dados (todas as localidades e espécies), análise dos dados de localidades diferentes por espécie (foram selecionadas as espécies com maior número de ocorrência nos locais de proveniência das amostras⁴) e análise dos dados de espécies diferentes por localidade (foram selecionadas as localidades com maior número de indivíduos⁵). Para os elementos que se destacaram com os maiores números de diferenças significativas, no cenário da análise global dos dados, foram aplicadas PCA's, em que as amostras da Flona do Tapajós foram divididas em dois grupos - amostras de ipê e amostras de outras espécies em virtude da ocorrência em classes de solos diferentes.

Os cálculos estatísticos dos testes de Shapiro-Wilk, de Kruskal-Wallis e de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner foram feitos por meio do Software livre JAMOVI 2.3.21. Para a

³ Somatório de valores de elementos das porções a 0%, a 25%, a 50%, a 75% e a 100% do disco, dividido por 5.

⁴ Número de amostras maior ou igual a 10, com ocorrência em pelo menos três localidades.

⁵ Número de amostras de 15 ou mais indivíduos, com ocorrência em pelo menos três espécies por localidade.

PCA, utilizou-se o Software PAST 4.12b. Os testes aplicados consideraram nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS

Os valores das concentrações dos elementos analisados encontram-se na Tabela 36 - Apêndice A. Foram observadas 131 subamostras com ausência de frações de massa para os elementos B (5), Al (3), Mn (1), Fe (2), Co (34), Ni (8), Cu (5), Zn (5), Se (27), La (21), Ce (14) e Pb (6), destacando-se o Co que não está presente na totalidade de amostras de duas localidades: Comodoro e ZF2.

4.1 ANÁLISE DA TOTALIDADE DAS AMOSTRAS (119 árvores)

Quanto à análise descritiva, observou-se grande variabilidade dos valores das regiões (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) do raio do disco, e até mesmo nos valores do tratamento da média das regiões do raio do disco, evidenciada pelo desvio-padrão das concentrações dos elementos analisados (Tabela 3 – de A a F). Ademais, detectou-se grande quantidade de *outliers*.

Tabela 3 – Desvio-padrão das concentrações dos elementos químicos: do valor médio das regiões do raio do disco; e dos valores das regiões a 0% do raio do disco (B), a 25% (C), a 50% (D), a 75% (E) e a 100% (F)

Estadística Descritiva		B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb
(A)	Desvio-padrão																		
	ZF2	6.41	239	5.68	346	459	0.978	9.74	4.95	0.00	0.277	0.762	8.60	0.185	5.26	0.550	5.18e-4	0.00141	0.0619
	Itaituba	8.55	136	29.6	614	1233	3.64	29.3	52.1	0.0141	0.178	1.50	3.88	0.352	15.2	4.85	0.0727	0.134	4.85
	Comodoro	1.11	276	3.26	170	815	0.155	18.2	4.41	0.00	0.752	7.64	2.38	0.248	9.71	1.15	0.0308	0.128	0.107
	N. Progresso	2.87	126	3.01	384	143	0.815	6.99	14.6	0.0182	0.0250	1.17	0.956	0.119	15.3	1.67	0.00321	0.0134	1.67
	Manicoré	3.29	112	20.0	509	240	2.50	24.1	16.4	0.00838	0.512	0.805	2.16	0.162	2.90	6.11	0.00814	0.153	6.11
	ITPG	2.94	143	1726	300	603	0.312	13.3	52.1	0.0679	0.998	4.97	25.2	0.317	7.12	0.371	1.30	0.780	0.182
	ITC	3.02	176	20.4	220	261	2.73	8.40	26.9	0.0190	1.19	0.564	17.9	0.259	3.66	0.110	0.00822	0.0391	0.110
	flona tapajós	1.04	88.0	11.8	244	461	0.210	19.7	141	0.235	1.17	40.7	1.75	0.358	15.0	23.4	1.56	2.12	1.30
	Querência	1.40	144	71.1	632	295	0.301	14.7	37.1	1.68	0.754	28.9	1.95	0.446	3.85	2.02	0.0792	0.0764	0.0759
	flona jamari	1.46	163	18.5	386	730	0.287	27.7	65.0	0.0331	1.86	7.79	7.25	0.761	7.07	1.24	0.616	0.674	0.211
	S. G. Cachoeira	3.66	178	12.0	359	398	1.76	12.1	15.7	0.0122	0.0839	0.437	4.70	0.198	5.71	1.79	0.00994	0.0310	1.79
	(B)	Desvio-padrão																	
ZF2		8.18	260	10.7	444	633	1.15	16.8	9.25	0.00	0.446	2.70	30.6	0.577	7.31	0.345	7.07e-4	0.00366	0.0563
ITC		12.4	142	28.5	302	209	0.191	6.19	12.7	0.0255	0.332	0.678	33.6	0.827	2.66	0.127	0.00564	0.0668	0.0605
ITPG		4.72	172	4967	338	403	0.479	7.41	22.9	0.0687	3.44	5.46	46.9	0.594	3.98	0.195	0.0841	0.184	0.214
Itaituba		11.5	155	15.0	538	1514	7.89	35.0	108	0.0344	0.392	2.42	5.60	0.677	21.4	5.19	0.0516	0.167	3.54
N. Progresso		1.94	287	5.63	653	54.1	1.90	5.83	13.5	0.0154	0.300	1.95	1.74	0.500	7.28	2.27	0.00289	0.0248	2.38
S. G. Cachoeira		11.8	229	8.15	495	235	2.03	18.1	13.4	0.0144	0.122	0.590	6.27	0.330	4.16	1.93	0.0194	0.0150	0.243
Manicoré		6.42	197	9.32	686	510	2.84	33.6	12.6	0.00336	0.297	0.586	6.37	0.427	5.31	10.2	0.00295	0.103	0.408
Flona Tapajós		3.44	128	11.2	131	867	0.385	22.0	210	0.314	1.05	63.7	4.89	0.729	21.1	33.8	3.24	4.18	1.53
Comodoro		1.16	443	7.38	20.5	781	0.354	24.8	9.64	0.00	0.0538	0.953	3.66	1.41	7.24	0.756	0.0546	0.268	0.118
Querência		2.70	222	98.0	1218	340	0.268	26.8	83.5	1.55	0.601	53.1	4.00	0.965	4.54	3.30	0.0869	0.133	0.0602
Flona Jamari		2.83	182	18.0	619	1016	0.404	38.0	24.9	0.0686	0.288	3.33	0.708	0.599	11.0	1.45	0.396	0.846	0.148

Continua

Continuação

Estadística Descritiva

	Localidades	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb	
(C)	Desvio-padrão	ZF2	11.3	268	1.75	208	302	2.66	9.65	9.32	0.00	0.185	0.527	10.8	0.582	2.47	0.273	0.00141	0.00220	0.0530
		ITC	3.53	134	90.7	213	240	11.4	7.28	79.0	0.0324	3.21	0.614	19.7	0.668	3.54	0.0948	0.0150	0.125	0.0492
		ITPG	6.18	155	790	1446	746	0.692	16.2	219	0.0645	0.531	4.20	34.1	1.02	5.65	1.19	2.08	1.39	0.494
		Itaituba	10.2	160	145	469	1219	4.46	35.0	174	0.0263	0.371	3.11	5.17	0.591	13.2	5.12	0.0592	0.268	2.10
		N. Progresso	7.49	164	0.752	324	256	1.38	6.03	14.4	0.0353	0.262	1.00	5.59	0.778	14.8	2.35	0.00737	0.0170	7.71
		S. G. Cachoeira	2.33	228	8.10	420	398	2.57	13.3	20.0	0.0128	0.291	0.701	6.51	0.710	5.58	1.99	0.0140	0.00676	0.285
		Manicoré	5.50	141	31.1	701	163	2.63	26.1	12.8	0.0115	0.136	0.504	2.65	0.443	2.47	7.54	0.00614	0.0266	0.277
		Flona Tapajós	2.16	120	26.2	128	546	0.268	20.9	277	0.269	3.58	79.3	4.35	1.25	18.5	30.7	1.71	2.60	1.68
		Comodoro	0.906	177	4.85	50.9	449	0.0949	14.6	0.832	0.00	0.114	1.01	0.803	0.00	6.24	0.920	0.0459	0.0486	0.0473
		Querência	2.21	178	107	825	143	0.416	15.6	49.3	2.37	1.61	40.3	2.07	0.936	2.65	4.31	0.464	0.162	0.313
	Flona Jamari	1.85	268	35.7	1501	744	0.348	28.6	42.9	0.0858	7.53	3.81	23.9	2.87	7.87	2.16	2.87	2.51	0.358	
(D)	Desvio-padrão	ZF2	10.9	307	5.00	393	429	0.589	11.3	5.92	0.00	0.147	0.386	6.87	0.847	4.12	0.311	0.00	0.00106	0.156
		ITC	5.84	157	37.5	149	308	0.144	11.1	10.1	0.0206	0.247	0.716	13.9	0.581	3.94	0.320	0.0146	0.0544	0.0959
		ITPG	4.43	152	834	133	289	0.337	8.51	137	0.0658	1.68	6.46	30.4	0.854	3.47	0.825	0.0851	0.133	0.106
		Itaituba	5.79	137	11.1	445	1160	7.42	28.7	72.4	0.0222	0.342	1.06	3.89	0.550	12.3	5.39	0.0878	0.104	0.748
		N. Progresso	0.0681	103	0.675	262	198	1.68	24.4	21.6	0.0320	0.0980	0.580	2.63	0.562	11.8	1.24	0.00351	0.00651	0.737
		S. G. Cachoeira	2.87	180	8.02	321	537	2.59	12.6	13.8	0.00864	0.111	0.442	6.21	0.375	6.93	1.49	0.00421	0.00896	0.568
		Manicoré	6.34	101	16.5	424	148	3.89	25.4	22.6	0.0124	2.58	1.62	6.64	0.950	1.73	4.46	0.0105	0.0105	0.671
		Flona Tapajós	1.03	82.6	8.89	88.3	466	0.117	20.0	57.4	0.210	0.733	28.9	1.70	1.49	17.0	26.1	1.11	1.17	1.44
		Comodoro	5.40	290	1.31	321	764	0.296	17.5	2.73	0.00	0.0778	3.94	2.02	0.900	8.25	1.04	0.157	0.677	0.0660
		Querência	4.76	218	70.3	608	224	0.351	13.0	21.5	1.78	0.781	19.8	1.42	0.195	2.10	1.77	0.142	0.177	0.0462
	Flona Jamari	3.34	224	12.4	293	1230	0.373	30.9	228	0.0442	1.57	16.0	25.9	0.00	11.0	1.16	1.47	0.837	0.851	
(E)	Desvio-padrão	ZF2	14.2	191	10.2	379	597	1.32	8.14	7.99	0.00	1.20	0.355	10.4	0.648	5.27	0.326	0.00106	0.00377	0.144
		ITC	5.06	281	21.7	245	457	8.25	12.7	119	0.0401	3.73	1.49	17.8	0.760	6.76	0.0780	0.00532	0.0335	0.0465
		ITPG	3.30	179	811	150	589	0.241	13.2	11.4	0.0672	1.09	4.08	20.9	0.389	6.85	0.920	0.0408	0.0629	0.435
		Itaituba	12.4	195	19.5	1097	1299	2.55	31.3	20.0	0.0137	0.186	1.14	6.57	0.693	13.3	5.00	0.130	0.151	1.37
		N. Progresso	2.11	114	1.73	283	481	1.77	18.7	50.7	0.0409	0.0980	0.783	5.89	0.558	27.2	1.50	0.00404	0.0140	1.70
		S. G. Cachoeira	2.99	144	20.6	226	425	2.79	12.6	16.4	0.0178	0.321	0.858	4.07	0.490	6.66	2.25	0.00744	0.0193	0.248
		Manicoré	0.459	84.9	22.4	447	148	3.03	22.3	23.4	0.0210	0.194	2.68	5.35	0.453	2.31	4.08	0.0101	0.0273	0.202
		Flona Tapajós	2.33	91.0	10.3	595	439	0.212	20.9	23.2	0.230	0.888	14.0	2.40	0.443	10.7	18.2	1.29	1.74	1.29
		Comodoro	1.70	295	2.06	230	565	0.250	15.5	2.70	0.00	0.0585	0.443	2.37	0.268	8.35	1.49	0.338	0.101	0.279
		Querência	0.143	137	28.7	538	189	0.666	15.6	16.7	1.49	0.679	15.7	0.506	1.94	2.67	0.682	0.142	0.0486	0.0482
	Flona Jamari	2.71	157	14.7	517	681	0.468	25.8	36.0	0.0227	3.15	16.2	4.08	0.857	5.70	1.03	0.113	0.452	0.214	
(F)	Desvio-padrão	ZF2	17.8	251	11.5	705	1512	1.53	21.0	8.65	0.00	0.135	0.539	8.37	0.733	20.1	2.11	7.07e-4	0.00181	0.0607
		ITC	4.19	272	25.1	604	417	0.216	8.62	44.1	0.0190	4.62	0.608	44.1	0.787	4.89	0.0876	0.00562	0.105	0.0862
		ITPG	7.66	183	1510	564	1797	0.897	30.9	15.9	0.211	1.19	12.6	45.6	0.503	24.8	0.386	4.46	2.55	0.243
		Itaituba	17.3	155	19.8	1233	1413	2.72	26.2	20.4	0.0137	0.159	1.10	5.43	0.630	21.5	4.49	0.0704	0.0905	0.857
		N. Progresso	6.91	72.2	1.73	1589	209	0.767	5.59	22.9	0.0178	0.104	1.92	3.90	0.350	16.6	1.05	0.00153	0.00681	0.258
		S. G. Cachoeira	5.01	131	22.1	427	450	4.10	8.26	39.2	0.0154	0.204	0.418	2.18	0.580	5.83	1.60	0.00861	0.133	0.296
		Manicoré	4.17	276	57.6	599	523	1.13	20.0	12.1	0.00756	0.174	0.759	5.80	0.376	4.97	7.64	0.0167	0.756	0.839
		Flona Tapajós	1.35	147	15.7	566	409	0.580	19.7	287	0.225	0.670	28.3	3.55	0.848	10.5	12.5	0.861	1.35	0.764
		Comodoro	0.913	227	13.6	562	1775	0.253	24.4	9.05	0.00	3.64	32.4	5.49	0.00	21.8	1.56	0.310	0.335	0.312
		Querência	1.24	103	54.7	480	1002	0.249	23.7	16.5	1.19	0.830	15.9	5.39	0.773	12.6	0.878	0.201	0.0685	0.223
	Flona Jamari	3.93	172	33.2	704	771	0.335	25.8	57.5	0.0469	0.522	6.88	6.17	1.12	6.24	3.99	0.104	0.176	0.228	

Fonte: elaboração própria, utilizando o *software* Jamovi (2025).

Com relação à verificação da normalidade, foi observado por meio do teste de Shapiro-Wilk que as amostras analisadas de todas as regiões e da média das regiões não possuem distribuição normal ($p < .001$).

O teste de Kruskal-Wallis revelou que: para a média das regiões, houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para todos os elementos; para a região de 0% do raio disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para o elemento Al (0,230⁶); para a região de 25% do raio do disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para o elemento Al (0,080); para a região de 50% do raio do disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para o elemento Al (0,062); para a região de 75% do raio do disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Al (0,174) e Ni (0,061); e para a região de 100% do raio do disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Mg (0,238), Al (0,350), K (0,083), Ca (0,055) e Mn (0,072). Todos os resultados mencionados estão detalhados na Tabela 7 do Apêndice B.

O elemento Al não apresentou diferença significativa entre as localidades em todas as porções do raio do disco, porém com *outliers* superiores, sugerindo que o referido metal não apresenta potencial para discriminar a proveniência geográfica das amostras (figura 8).

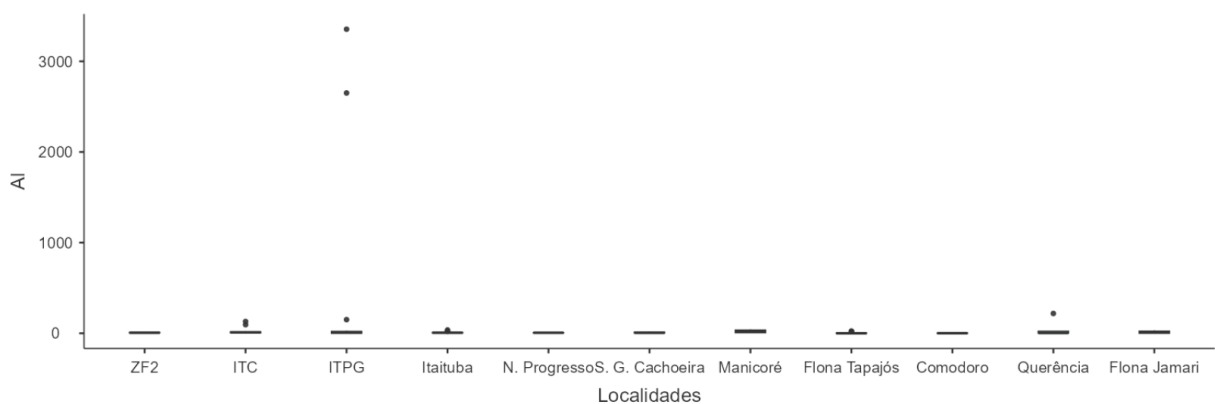


Figura 8 – Box plot da concentração de alumínio (Al, mg/kg) em amostras da porção a 50% do raio do disco de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

Ao aplicar o Teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, os elementos que se destacaram com os maiores números de diferenças significativas entre os grupos foram Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb (figura 9 e Tabela 4).

⁶ Valores de “p”.

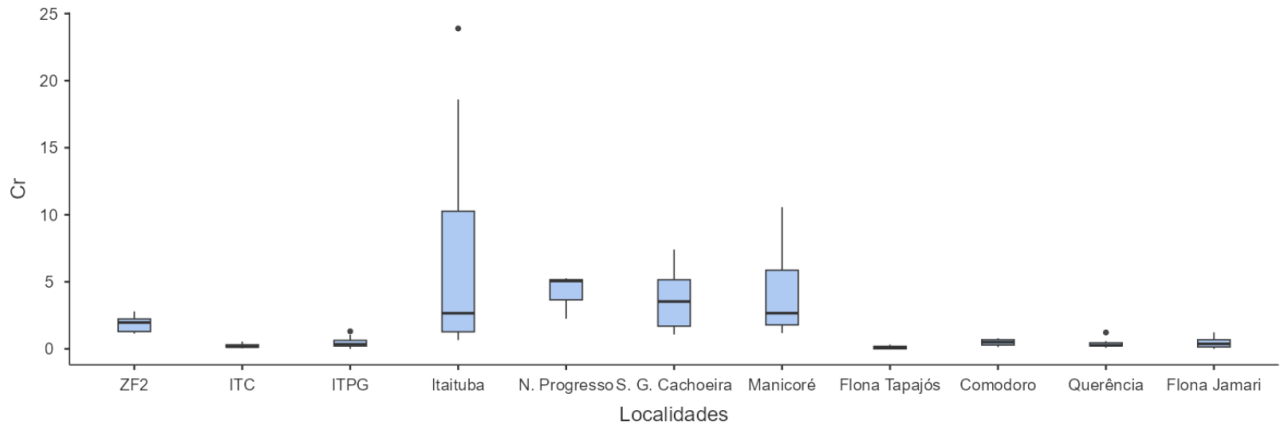


Figura 9 – Box plot da concentração (mg/kg) de cromo (Cr), em amostras retiradas da porção a 50% do raio do disco, em diferentes localidades.

Tabela 4 – Elementos que mais diferiram ($p < 0,05$) entre as localidades, considerando os valores médios das diferentes regiões do disco

Regiões do Disco	Elementos com Diferença Significativa
0%	Cr (13), Se (9), B (8), Zn (8), Ba (8) e Pb (8)
25%	Cr (13), Se (8), Ba (8) e B (7)
50%	Cr (19), Se (17), K (13), Zn (10), La (8) e Pb (7)
75%	Cr (15), Zn (9), Se (9), Ba (8) e Pb (8)
100%	Cr (15), Se (11), B (7), Zn (5), Ba (5) e Pb (5)
Valores médios das regiões	Cr (15), B (12), Se (12), Pb (11) e Zn (10)

Fonte: elaboração própria (2025).

Nota: *valor entre parênteses representa total de diferenças significativas observadas par a par.

A fim de discriminar as amostras em relação às diferentes regiões de origem, foi realizada a análise exploratória PCA com os valores médios de cada amostra e de cada região dos discos, quais sejam 0%, 25%, 50%, 75%, 100% conforme figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33 (Apêndice C), respectivamente. As PCAs que forneceram as melhores informações discriminatórias das amostras de determinadas localidades foram a dos valores médios das porções do disco (Figura 10) e a 50% da região do disco (Figura 11).

Embora os percentuais dos componentes 1 e 2 que explicam a variância das amostras sejam baixos, foi possível observar a formação de grupos distintos, que permitiu atribuir determinadas amostras a uma localidade específica. Na Figura 10, nota-se clara distinção entre as amostras: da localidade de Itacoatiara e Itaituba; da localidade de Flona do Tapajós e Itaituba; da localidade de Itacoatiara e Manicoré; e da Flona do Tapajós e Manicoré.

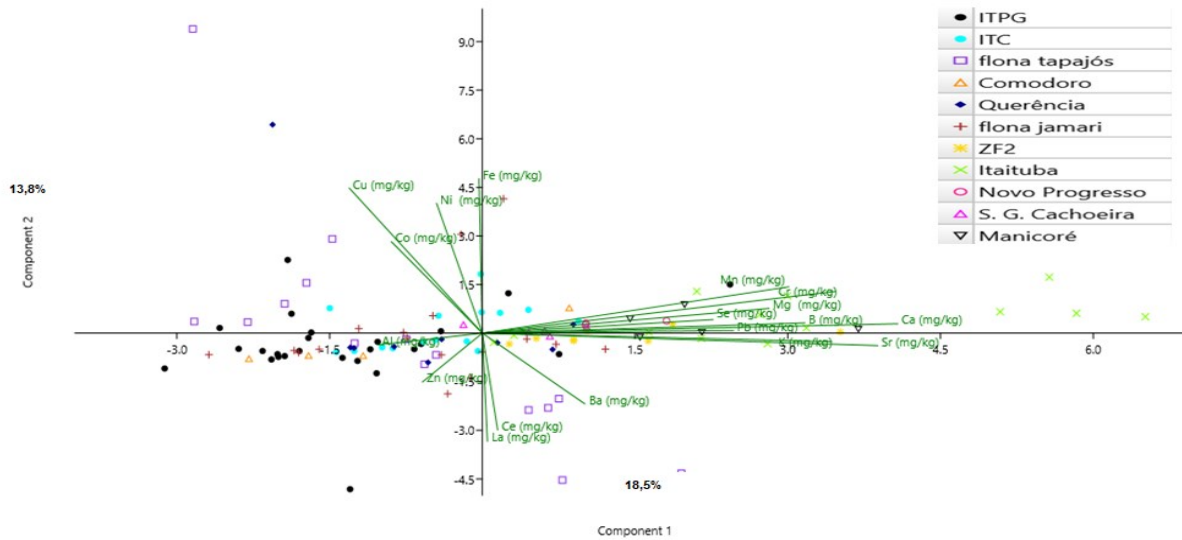


Figura 10 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras com valores médios das porções do raio do disco de madeira de cada amostra, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

Das análises individualizadas das regiões do disco, as amostras que apresentaram as melhores discriminações de localidades foram as da região de 50% do disco, apesar de perda considerável de variância explicada em relação às outras porções do disco. Na Figura 11, pode-se observar que quatro grupos de regiões diferiram entre si: entre Manicoré e Itacoatiara; entre Flona do Tapajós e Itaituba; entre Flona do Tapajós e Itacoatiara; e entre Flona do Tapajós e Manicoré.

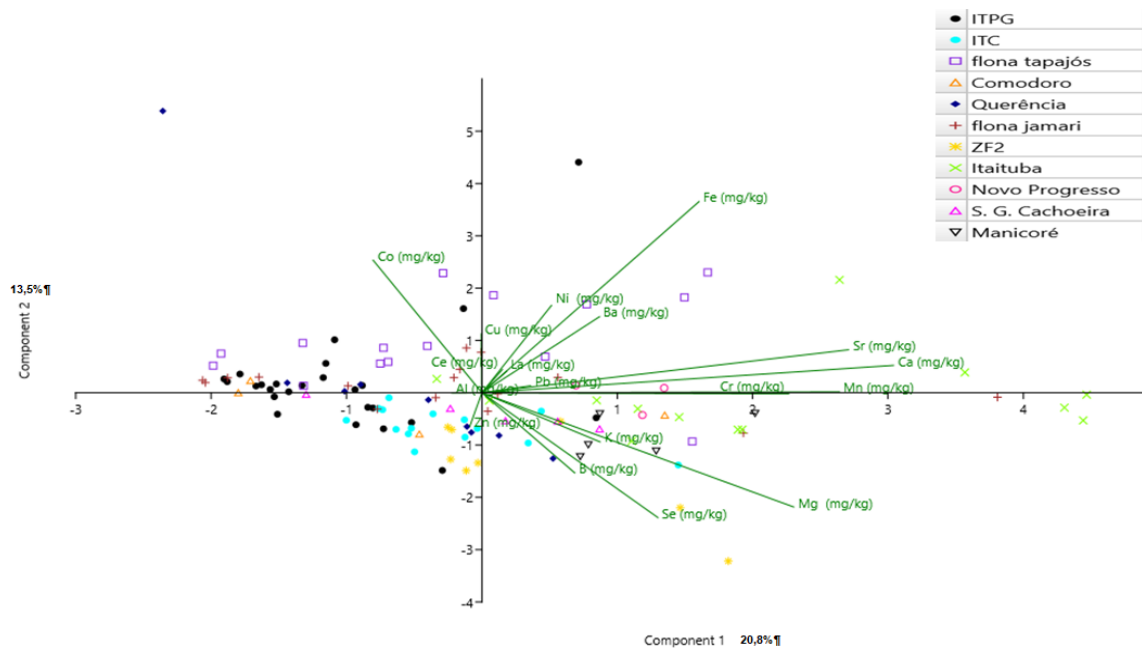


Figura 11 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

Ainda, buscando interpretar a predominância de elementos correlacionáveis, aplicou-se a Correlação de Spearman para investigar o grau de associação entre os teores dos elementos. As correlações que apresentam valores positivos e significativos foram Sr (Estrôncio) X Ca (Cálcio) e Ce (Césio) e La (Lantânio), demonstrando que quanto maiores os teores de Sr e Ce, maiores as concentrações de Ca e La, respectivamente e vice-versa (Figuras 12 – A e B, e 13).

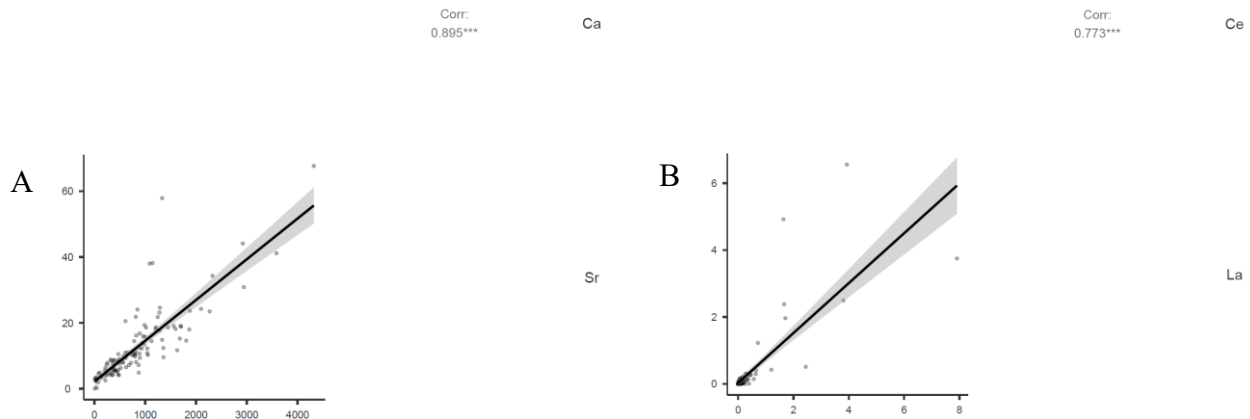


Figura 12 – Gráficos de Correlação de Spearman, com valores de R para correlação Sr com Ca (A); e para correlação de Ce com La (B).

Fonte: elaboração própria (2025).

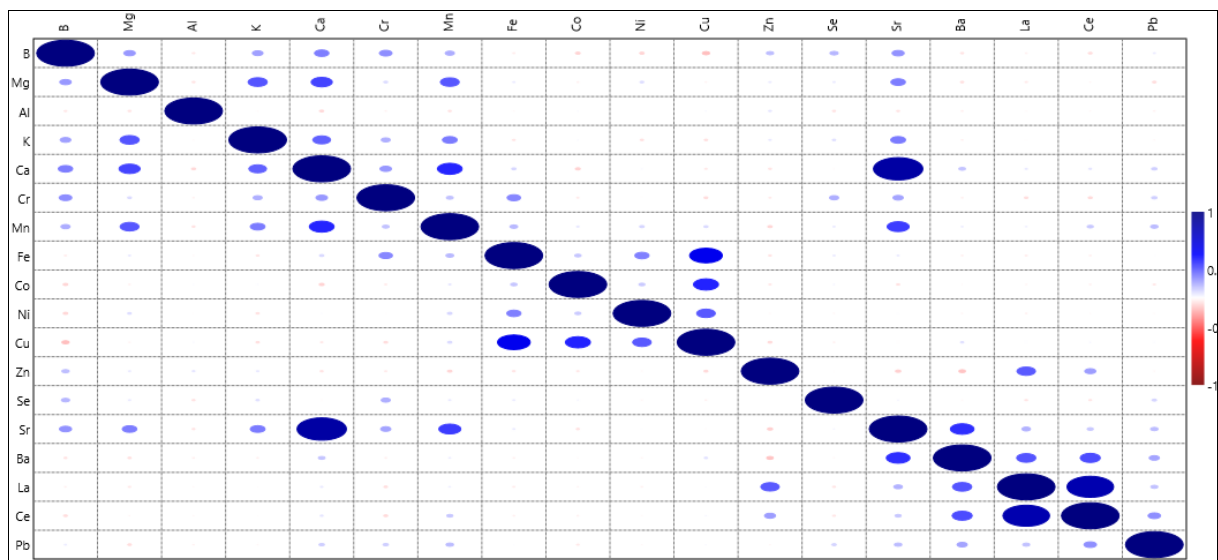


Figura 13 – Gráfico de Correlação de Spearman, demonstrando forte associação de Sr com Ca e de Ce com La

Fonte: elaboração própria (2025).

Considerando os elementos químicos observados (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) que mais diferiram entre as localidades, foram processadas PCA's, que revelaram maior poder de discriminação nas amostras da média dos valores das porções do disco (Figura 14) e nas amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira (Figura 15), com aumento dos percentuais de variância explicada, acima de 50%. Na Figura 14, foi possível constatar a

separação em grupos distintos entre as localidades de ZF2 e Flona do Tapajós (dos dois grupos - amostras de ipê e amostras de outras espécies), de Flona Tapajós e Itaituba, de Itapiranga e ZF2, de Itacoatiara e Flona do Tapajós (dos dois grupos - amostras de ipê e amostras de outras espécies), de Flona do Jamari e ZF2, de Itaituba e Itapiranga, e de Flona do Tapajós (amostras de ipê) e Itapiranga

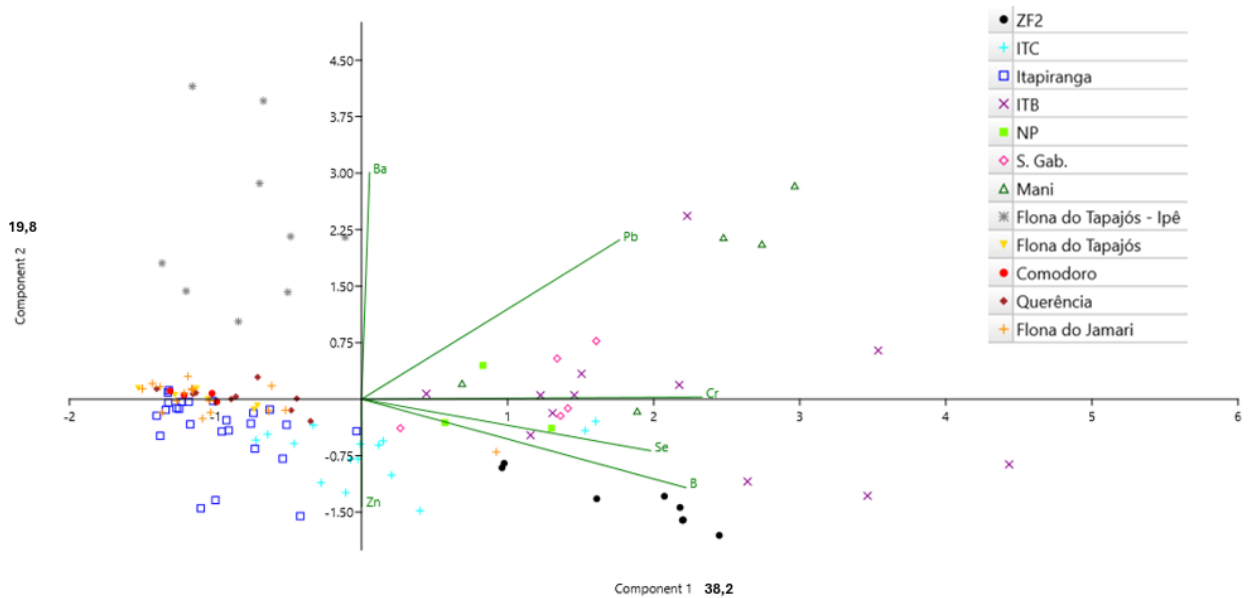


Figura 14 – Análise de Componente Principal para elementos químicos (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) em amostras com valores médios das porções do raio do disco de madeira de cada amostra, de diferentes localidades.

Fonte: elaboração própria (2025).

A PCA das amostras da porção de 50% do disco (figura 15), embora tenha gerado maior número de grupos parcialmente sobrepostos em relação à PCA da média dos valores das porções do disco, possibilitou discriminar as seguintes localidades: Flona do Tapajós (amostras de ipê) em relação a Itacoatiara; Flona do Tapajós (amostras de ipê) em relação à ZF2; Flona do Jamari em relação à ZF2; Flona do Tapajós (amostras de ipê) em relação à Querência; Querência em relação a Itaituba; e Flona do Tapajós (amostras de ipê) em relação a Itaituba.

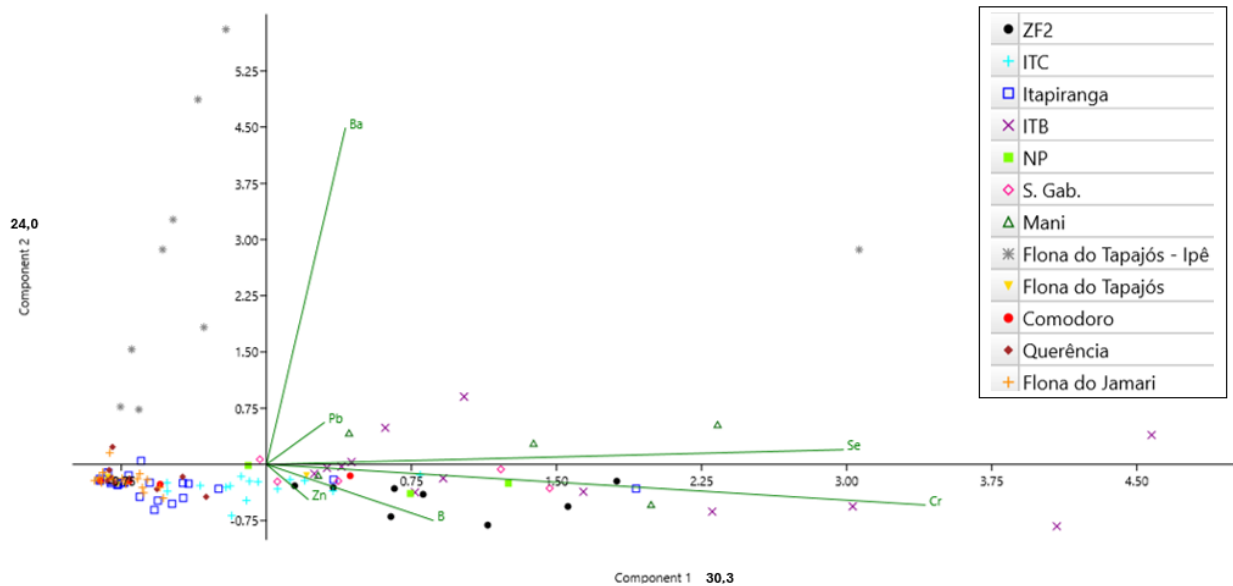


Figura 15 – Análise de Componente Principal para elementos químicos (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades.

Fonte: elaboração própria (2025).

4.2 ANÁLISE DOS DADOS DE LOCALIDADES DIFERENTES POR ESPÉCIE

As espécies com maior número de amostras analisadas foram: Jatobá, com 18 indivíduos ocorrendo em sete localidades; Ipê, com 16 indivíduos ocorrendo em três localidades; e Maçaranduba, com 11 indivíduos ocorrendo em cinco localidades, conforme Quadro 1.

A estatística descritiva revelou variações significativas em elementos como Fe, Ca e Mn entre as localidades, com alguns elementos apresentando valores extremos (*outliers*), para as espécies Jatobá, Maçaranduba e Ipê, indicando heterogeneidade ambiental (figura 16).

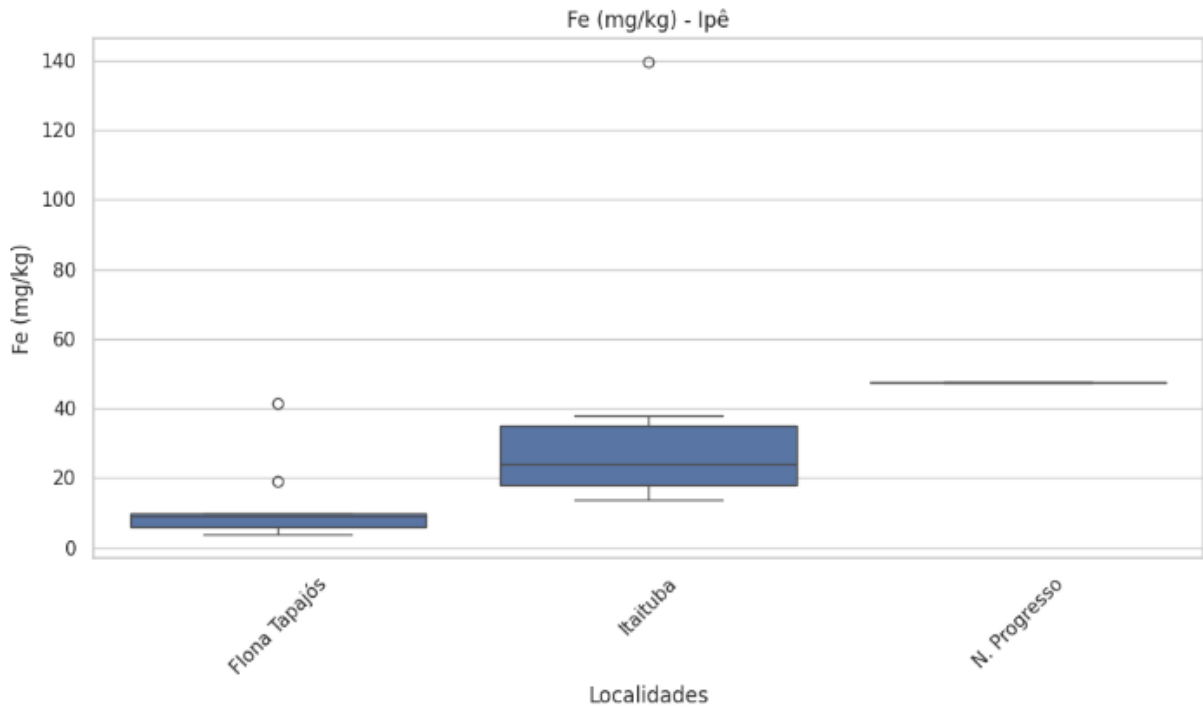


Figura 16 – Box plot da concentração de ferro (Fe), em mg/kg, em diferentes localidades, para as amostras de Ipê.

Fonte: elaboração própria (2025).

Em seguida para verificação da distribuição dos dados e escolha do teste apropriado de significância, aplicou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk das amostras das espécies Jatobá e Maçaranduba, constatando que os dados analisados não possuem distribuição normal ($p < .001$). Quanto ao Ipê, embora tenha sido constatada que a maioria das amostras analisadas apresentam distribuição normal, o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis foi aplicado em todas as amostras, inclusive as que apresentaram distribuição normal.

Para o teste de Kruskal Wallis, alguns elementos apresentaram diferenças significativas, para os dados de todas as regiões do disco e para o valor médio das regiões. Os resultados do Teste de Kruskal-Wallis para as espécies Jatobá, Maçaranduba e Ipê são apresentados na Tabela 8 (de D-1 a D-6), do Apêndice D, na Tabela 9 (de E-1 a E-6), do Apêndice E, e na Tabela 10 (de F-1 a F-6), do Apêndice F, respectivamente.

Para a espécie Jatobá, verificou-se que:

- I para a média das regiões houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Al (0,032⁷), Cr (0,019), Co (0,043) e Se (0,018).

⁷ Valores de “p”.

- II para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Ca (0,025), Cr (0,042), Fe (0,035), Co (0,021), Ni (0,025), Zn (0,049), Se (0,017), Sr (0,032) e La (0,011).
- III para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos K (0,046) e Se (0,016).
- IV para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para o elemento Se (0,021).
- V para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos B (0,026), Al (0,018), Mn (0,049), Co (0,013), Se (0,017) e La (0,016).
- VI para a região de 100% do disco das amostras não houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para o elemento Al (0,022).

Para a Maçaranduba constatou-se diferença estatisticamente significativa entre as localidades apenas para o elemento B das amostras a 75% região do disco, conforme box plot na figura 17.

B

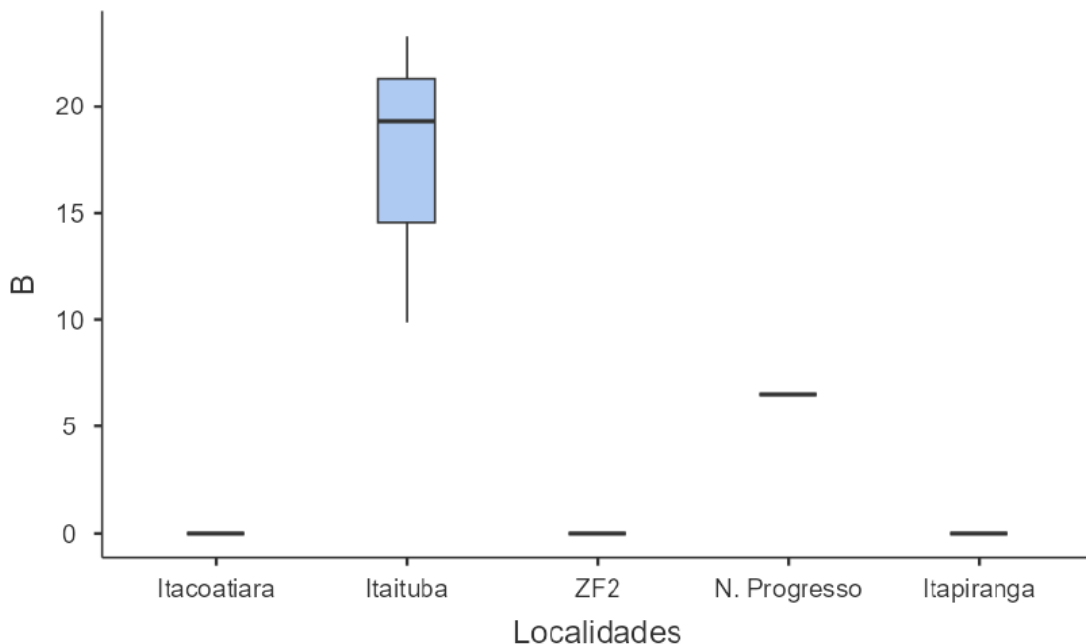


Figura 17 – Box plot da concentração de boro (B), em mg/kg, em diferentes localidades.

Fonte: elaboração própria (2025).

Já para o Ipê, foram observadas diferenças significativas, depois do teste de Kruskal Wallis, para alguns elementos em todas as regiões do disco e para o valor médio das regiões, de acordo com os seguintes resultados:

- I para a média das regiões houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos B (0,004), Cr (0,004), Fe (0,027), Cu (0,034), Se (0,034), Ba (0,010), La (0,023), Ce (0,023) e Pb (0,019).
- II para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos B (0,018), Cr (0,003), Fe (0,026), Se (0,048) e Ba (0,007).
- III para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Cr (0,006) e Ba (0,014).
- IV para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos K (0,022), Cr (0,004), Cu (0,005), Se (0,031), Ba (0,018), La (0,037) e Ce (0,023).
- V para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos Cr (0,008), Fe (0,014), Cu (0,049), Zn (0,009) e Ba (0,010).
- VI para a região de 100% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as localidades para os elementos B (0,030), Cr (0,004), Se (0,017), Ba (0,004) e Ce (0,027).

Porém, ao aplicar o teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (Teste de Comparação) nos resultados com diferença significativa para as espécies Jatobá e Maçaranduba, para verificar em quais dos grupos existem diferenças significativas, constatou-se que em nenhuma comparação com a localidade houve diferença significativa.

Em algumas situações, é possível que o teste global indique que há diferença entre os grupos, porém, na comparação par a par, nenhuma seja significativa, já que esses são testes independentes (Capp; Nienov, 2020).

Por outro lado, o teste *post hoc* de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, quando aplicado às amostras do Ipê, demonstrou diferença entre as amostras das localidades da Flona do Tapajós e de Itaituba para todas as regiões do disco e para o valor médio das regiões.

Da análise das comparações múltiplas (par a par), constatou-se que as amostras com valores médios das regiões apresentaram o maior número de diferenças significativas, abrangendo os seguintes elementos: B, Cr, Fe, Cu, Se, Ba, La, Ce e Pb. Os resultados condensados das comparações são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Elementos em que foram constatadas diferenças significativas quando comparadas as localidades da Flona do Tapajós e de Itaituba para diferentes regiões do disco e para os valores médios das regiões do disco de amostra de Ipê.

Regiões do Disco	Elementos com Diferença Significativa
0%	B, Ba, Fe e Cr
25%	Cr e Ba
50%	K, Cr, Cu, Se, Ba e Ce
75%	Cr, Fe, Cu e Zn
100%	B, Cr, Se, Ba e Ce
Valores médios das regiões	B, Cr, Fe, Cu, Se, Ba, La, Ce e Pb

Fonte: elaboração própria (2025).

Nas comparações par a par entre Flona do Tapajós e Novo Progresso, e Itaituba e Novo Progresso não foram observadas diferenças significativas, ao nível de significância preestabelecida ($p < 0,05$).

Aplicou-se a Análise de Componente Principal nas amostras de Jatobá, Maçaranduba e Ipê, nas diferentes regiões do raio do disco (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) e nos valores médios das regiões do raio do disco. As PCAs referentes à espécie Jatobá foram ilustradas nas figuras 34 (0%), 35 (25%), 36 (50%), 37 (75%), 38 (100%) e 39 (valores médios), do Apêndice G.

Para a espécie Maçaranduba, as PCAs foram demonstradas nas figuras 40 (0%), 41 (25%), 42 (50%), 43 (75%), 44 (100%) e 45 (valores médios), do Apêndice H. No que se refere à espécie Ipê, as figuras 46 (0%), 47 (25%), 48 (50%), 49 (75%), 50 (100%) e 51 (valores médios) do Apêndice I, mostram os resultados das PCAs.

A média das regiões do raio do disco (Figura 18) e a região do raio do disco a 25% (Figura 19) da espécie Jatobá forneceram discriminações entre localidades, o que possibilitou a distinção de regiões geográficas das amostras. Nas PCAs envolvendo as duas situações, foi possível observar a separação espacial das amostras das localidades de Itacoatiara e Itaituba, e de Flona do Jamari e Itaituba.

Na PCA das amostras da região do raio do disco a 25%, os elementos mais relevantes para discriminação geográfica da localidade de Itaituba em relação à Itacoatiara foram Ca, Sr, Cr e Ba. Por outro lado, os elementos La, Zn e Ce contribuíram para a separação das amostras da localidade de Itacoatiara em relação a Itaituba.

Assim como já observado na PCA da média das regiões para todas as espécies analisadas, também se constatou forte correlação positiva entre Ca e Sr para o Jatobá. Em contrapartida, esses elementos apresentam correlação negativa quanto aos elementos Cu e Ni, indicando que solos ricos nesses metais são pobres em Ca e Sr.

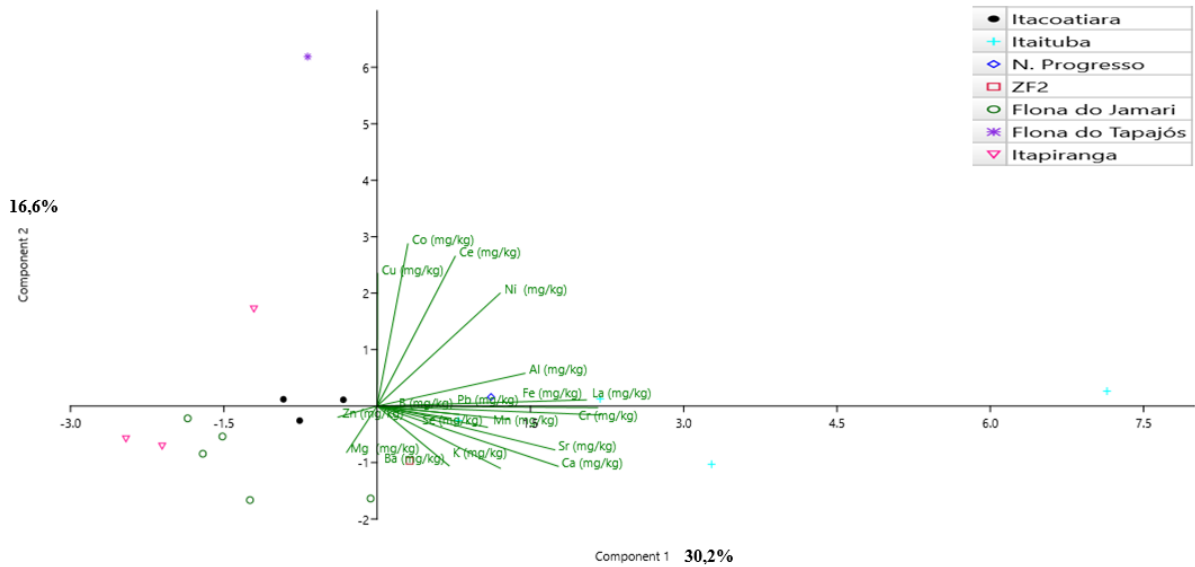


Figura 18 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de jatobá com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades
Fonte: elaboração própria (2025).

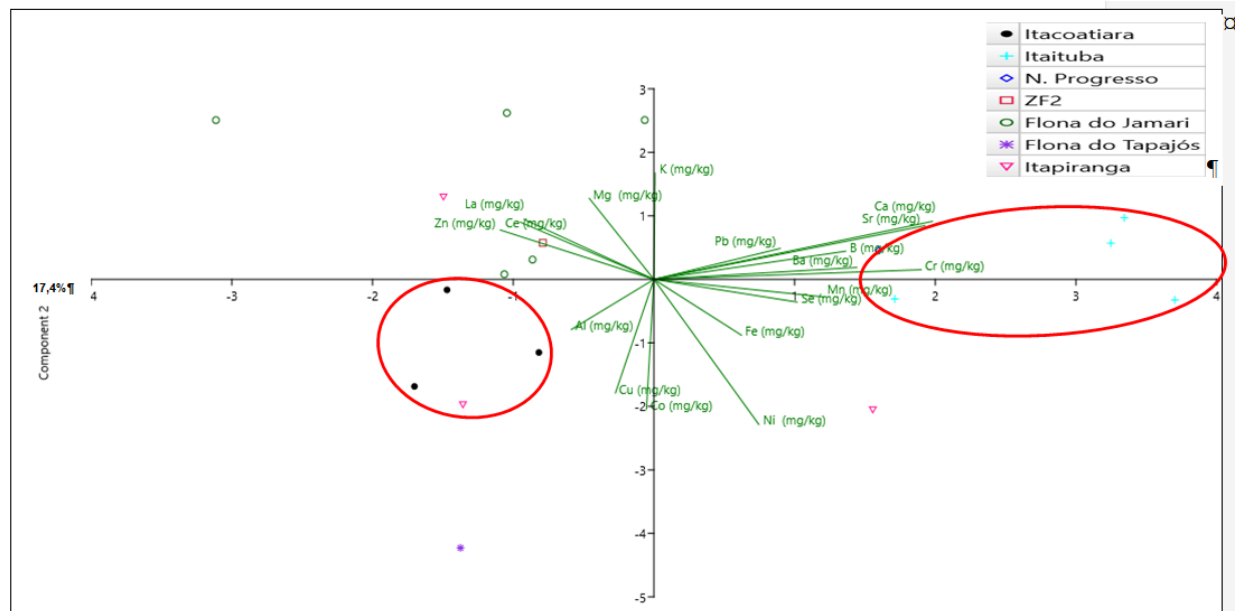


Figura 19 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de jatobá retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades
Fonte: elaboração própria (2025).

Assim como nas PCAs do jatobá, para as discriminações entre localidades da espécie maçaranduba, a média das regiões (Figura 20) e a região do disco a 25% (Figura 21) possibilitaram a distinção de regiões geográficas das amostras.

A PCA da média das regiões apresentou melhor resultado do que a PCA da região a 25% do disco, haja vista que permitiu a distinção clara de três localidades geográficas

(Itapiranga, Itacoatiara e Itaituba); enquanto as amostras da região a 25% do disco possibilitaram a discriminação de duas localidades, a saber, Itacoatiara e Itapiranga.

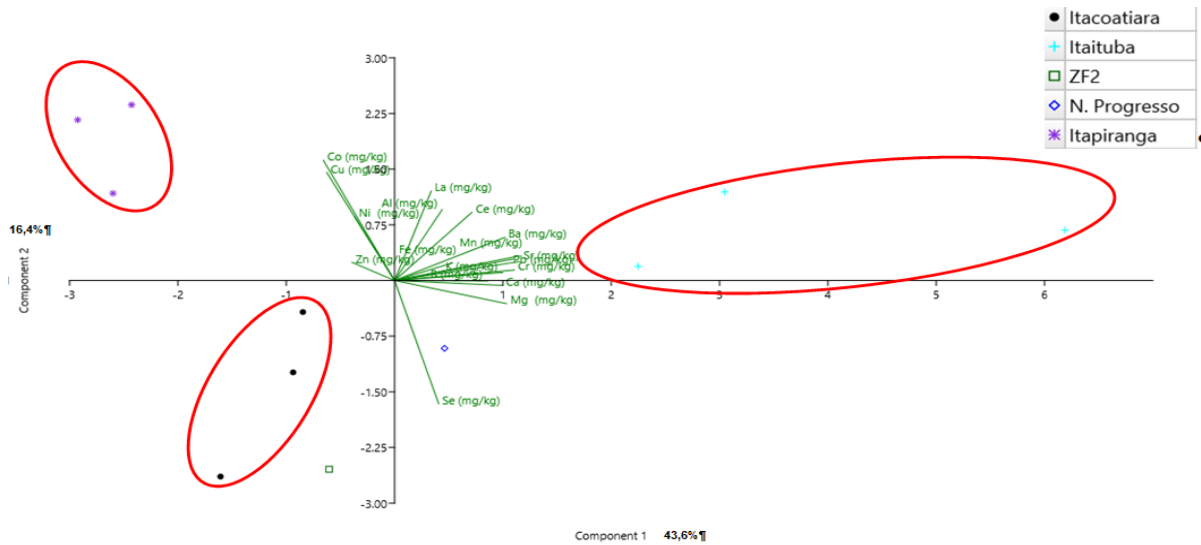


Figura 20 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de maçaranduba com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

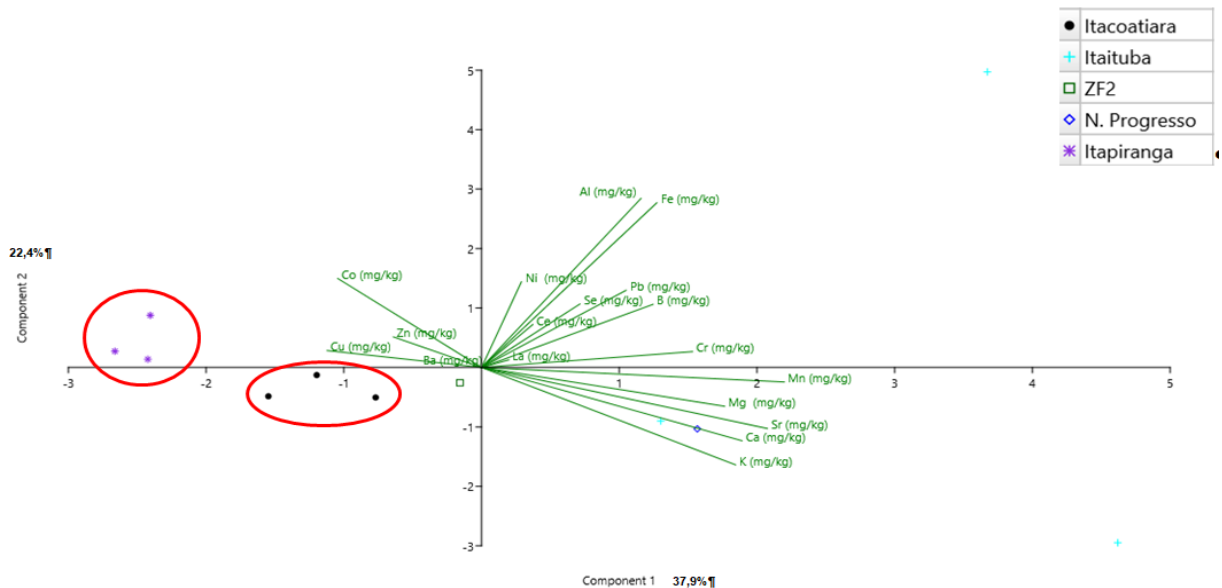


Figura 21 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de maçaranduba retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

Para a espécie Ipê, observou-se que houve diferenciação geográfica entre as localidades de Itaituba e Flona do Tapajós nas amostras referentes aos valores médios das regiões dos discos (Figura 21) e às regiões de 75% (Figura 49 do Apêndice I) e 100% do

disco (Figura 21). Salienta-se que a única amostra de ipê de Novo Progresso apresentou distinção em relação às amostras da Flona do Tapajós, embora seja insuficiente para concluir acerca da discriminação geográfica dessas regiões, visto que ao analisar amostras (todas as espécies) de Novo Progresso em relação à Flona do Tapajós não foi clara a separação dos locais.

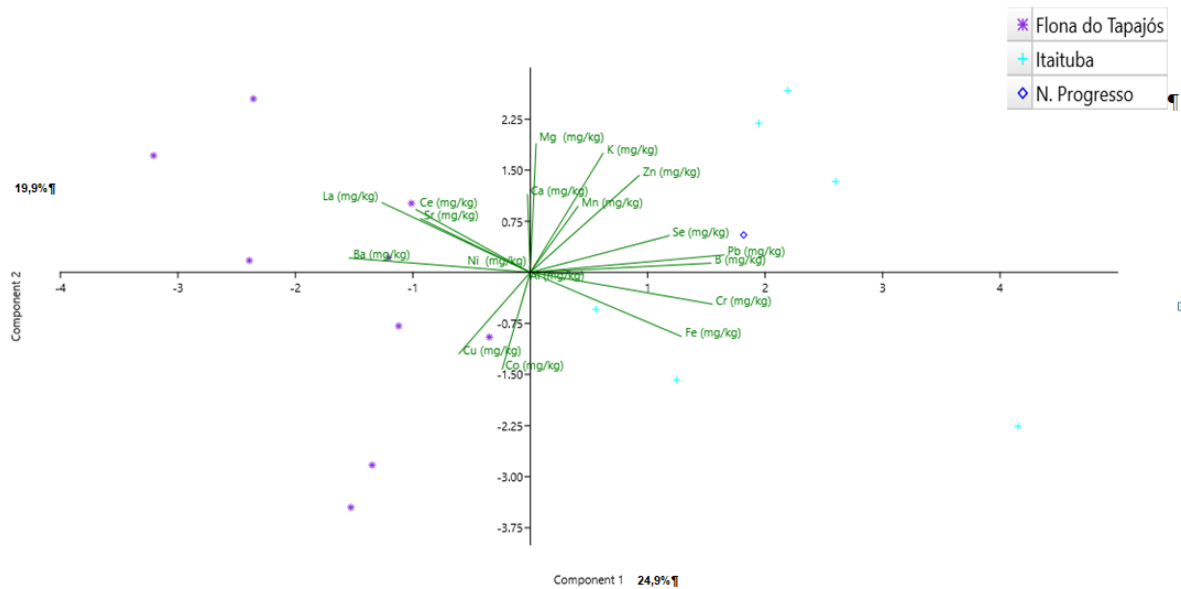


Figura 22 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de ipê referentes aos valores médios das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

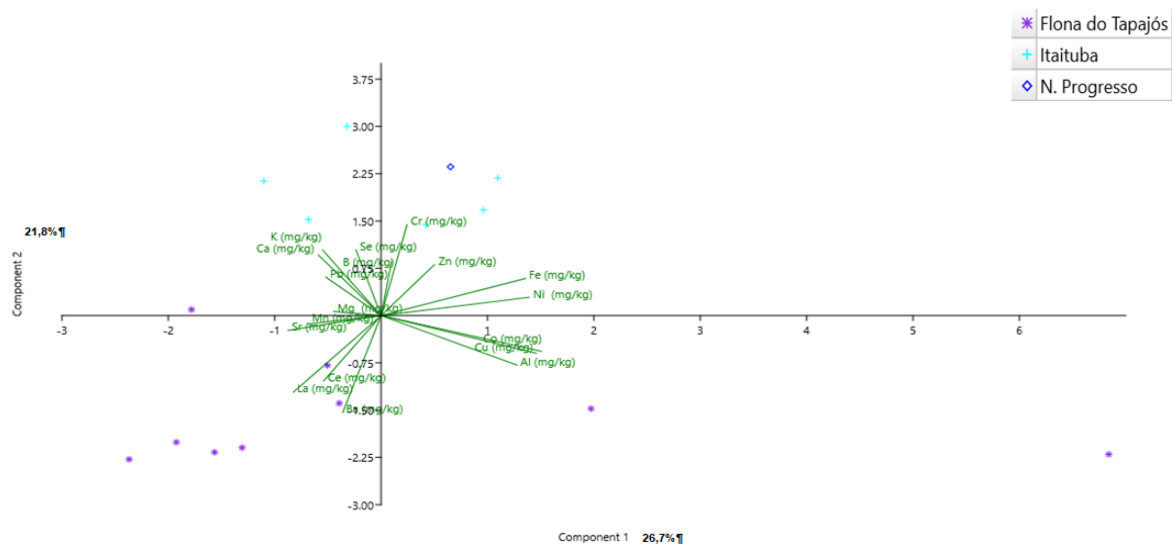


Figura 23 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras de ipê retiradas da região a 100% do disco de madeira, de diferentes localidades

Fonte: elaboração própria (2025).

4.3 ANÁLISE DOS DADOS DE ESPÉCIES DIFERENTES DE UMA MESMA LOCALIDADE

As localidades com maior número de amostras analisadas foram: Itapiranga com 25 indivíduos, referentes a dez espécies; Flona do Jamari com 17 indivíduos, referentes a seis espécies; Flona do Tapajós com 15 indivíduos, referentes a quatro espécies; e Itacoatiara com 15 indivíduos, referentes a cinco espécies, conforme se observa no Quadro 1.

Com relação à estatística descritiva, constatou-se que a maioria das variáveis apresenta grande variação - altos desvios padrão em relação à média, sugerindo heterogeneidade química entre as amostras. Muitos elementos têm valores mínimos igual a 0, o que pode indicar: Limite de detecção do método analítico; e/ou ausência real do elemento em alguns indivíduos.

A normalidade das amostras foi testada por meio da aplicação de teste de Shapiro-Wilk, em que se verificou que alguns dos dados analisados possuem distribuição normal nas localidades em análise. Mesmo assim, o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis foi aplicado em todas as amostras, inclusive as que apresentaram distribuição normal.

Para o teste de Kruskal Wallis, alguns elementos apresentaram diferenças significativas, para os dados de todas as regiões do disco e para o valor médio das regiões das amostras de Itapiranga, conforme detalhamento a seguir:

- I para a média das regiões houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,034), Al (0,022) e Mn (0,013).
- II para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos K (0,030), Co (0,006) e Cu (0,022).
- III para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,030), Al (0,021), K (0,018) e Mn (0,015).
- IV para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,032), Al (0,026), K (0,024), Mn (0,011), Co (0,021), Ni (0,043) e Cu (0,046).
- V para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,020), Ca (0,020), Mn (0,009) e Co (0,014).
- VI para a região de 100% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Al (0,031), Mn (0,021) e Cu (0,040).

A verificação da significância estatística entre as amostras da Flona do Jamari, por meio de Kruskal Wallis, revelou que os seguintes elementos apresentaram diferenças significativas, para os dados das regiões de 0%, 25%, 50% e 75% do disco:

- I para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Ni (0,019) e La (0,037).
- II para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mn (0,040) e Ni (0,038).
- III para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para o elemento Mn (0,044).
- IV para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Al (0,049) e Mn (0,029).

Nos dados da Flona do Tapajós, ao aplicar o teste de Kruskal-Wallis, foram observadas diferenças significativas dos seguintes elementos para os dados das regiões de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do disco e para o valor médio das regiões das amostras:

- I para a média das regiões houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos K (0,047), Ca (0,013), Co (0,021), Ni (0,035), Sr (0,023), Ba (0,016), Ce (0,045) e Pb (0,039).
- II para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,036), Ca (0,021), Co (0,009), Cu (0,013) e Ba (0,016).
- III para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Ca (0,013), Co (0,013), Sr (0,030), Ba (0,016), Ce (0,023) e Pb (0,017).
- IV para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Ca (0,013), Co (0,013), Sr (0,021), Ba (0,017), La (0,027), Ce (0,020) e Pb (0,013).
- V para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Ca (0,013), Fe (0,036), Co (0,017), Ni (0,020), Cu (0,016), Sr (0,030), Ba (0,014) e Pb (0,040).
- VI para a região de 100% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,023), K (0,038), Fe (0,047), Ni (0,015) e Ba (0,016).

No que se refere às amostras de Itacoatiara, para os dados de todas as regiões do disco e para o valor médio das regiões das amostras, constataram-se diferenças significativas dos seguintes elementos:

- I para a média das regiões houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mg (0,027) e Zn (0,026).
- II para a região de 0% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Mn (0,030) e Cu (0,028).
- III para a região de 25% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Fe (0,026) e Cu (0,029).
- IV para a região de 50% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para os elementos Cu (0,016) e Co (0,031).
- V para a região de 75% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para o elemento Mg (0,045).
- VI para a região de 100% do disco das amostras houve diferença estatisticamente significativa entre as espécies para o elemento Zn (0,038).

Ao definir a ocorrência de diferença significativa via teste de Kruskal-Wallis, foi utilizado o Teste de Comparação de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, a fim de verificar em quais dos grupos existem diferenças significativas. O Teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner foi utilizado apenas nos grupos que apresentaram diferenças significativas. Constatou-se que em nenhuma comparação espécie a espécie das localidades de Itapiranga, Flona do Jamari e Itacoatiara houve diferença significativa. Entretanto, na comparação par a par das espécies da Flona do Tapajós, observou-se diferença significativa entre Ipê e Jutai Mirim para as amostras da média dos valores das regiões e para as amostras das regiões a 0%, 25%, 50% e 75% do disco.

Assim como nos cenários anteriores, as amostras das localidades de Itapiranga, Flona do Jamari, Flona do Tapajós e Itacoatiara, nas diferentes regiões dos discos (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) e nos valores médios das regiões, foram submetidas à Análise de Componente Principal, obtendo discriminações mais relevantes para poucas espécies de amostras das Flona's do Jamari e do Tapajós, e de Itapiranga, em porções específicas do disco.

As PCAs dos dados da localidade de Itapiranga apresentaram percentuais baixos de explicação da variância das amostras, destacando o percentual de 47,5% referente ao somatório das componentes dos eixos 1 e 2 da PCA das amostras da região de 100% do disco.

À exceção de Mandioqueira (região de 25% do disco) e de Maçaranduba (regiões de 25% e 75% do disco) conforme Figuras 24 e 25, os resultados obtidos não forneceram

discriminações entre as espécies, agrupando-as em regiões distintas, o que impossibilitou a separação espacial das amostras.

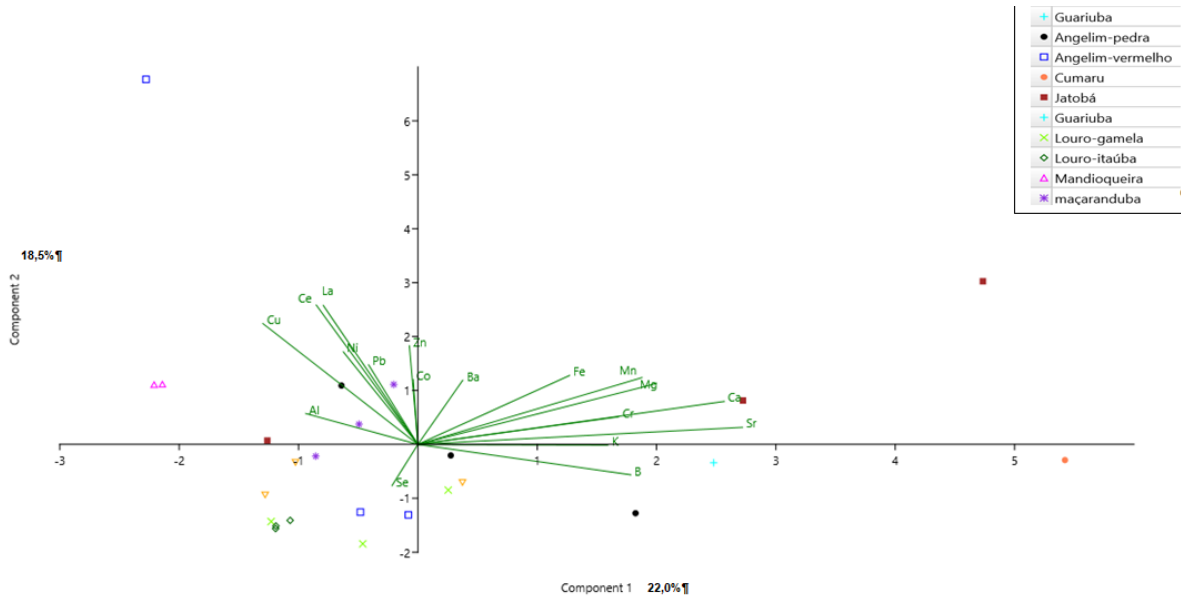


Figura 24 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Itapiranga retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes espécies

Fonte: elaboração própria (2025).

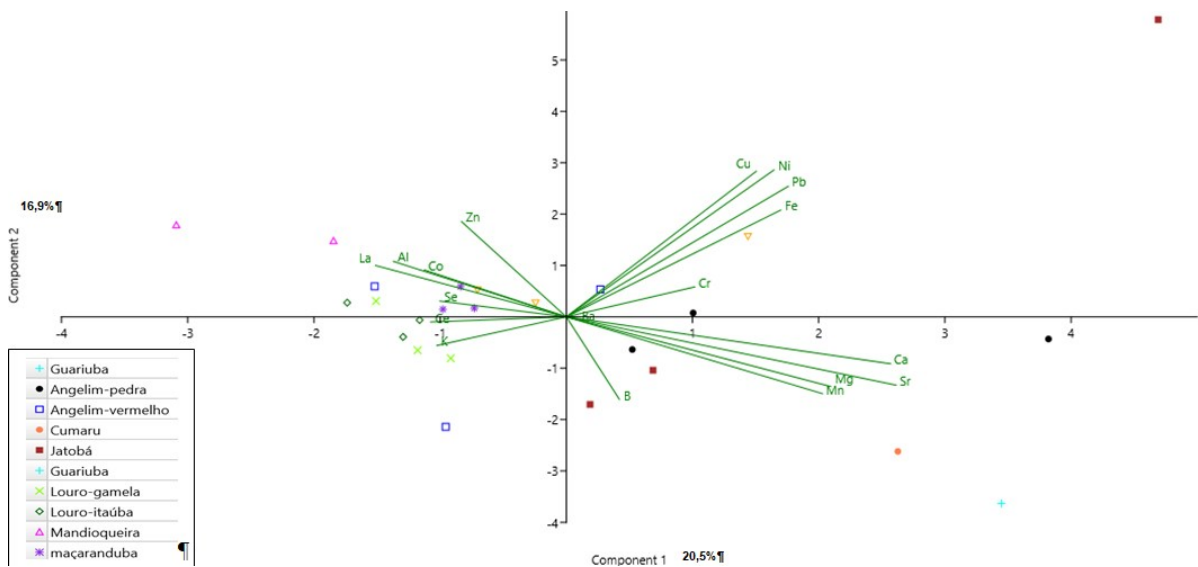


Figura 25 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Itapiranga retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies

Fonte: elaboração própria (2025).

Apesar dos percentuais baixos de explicação da variância das amostras da localidade de Flona do Jamari obtidos nas PCAs, os componentes principais que apresentaram mais informações foram os das amostras da região a 75% do raio do disco, cujo percentual foi de 49,7%.

As PCAs das amostras da média das regiões do disco e das amostras das regiões a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do disco não possibilitaram o agrupamento de espécies em regiões distintas. A exceção foi a PCA da região de 75% do disco, na qual se observou agrupamento parcial de amostras de Jatobá à esquerda, sem a influência específica de algum elemento (Figura 26).

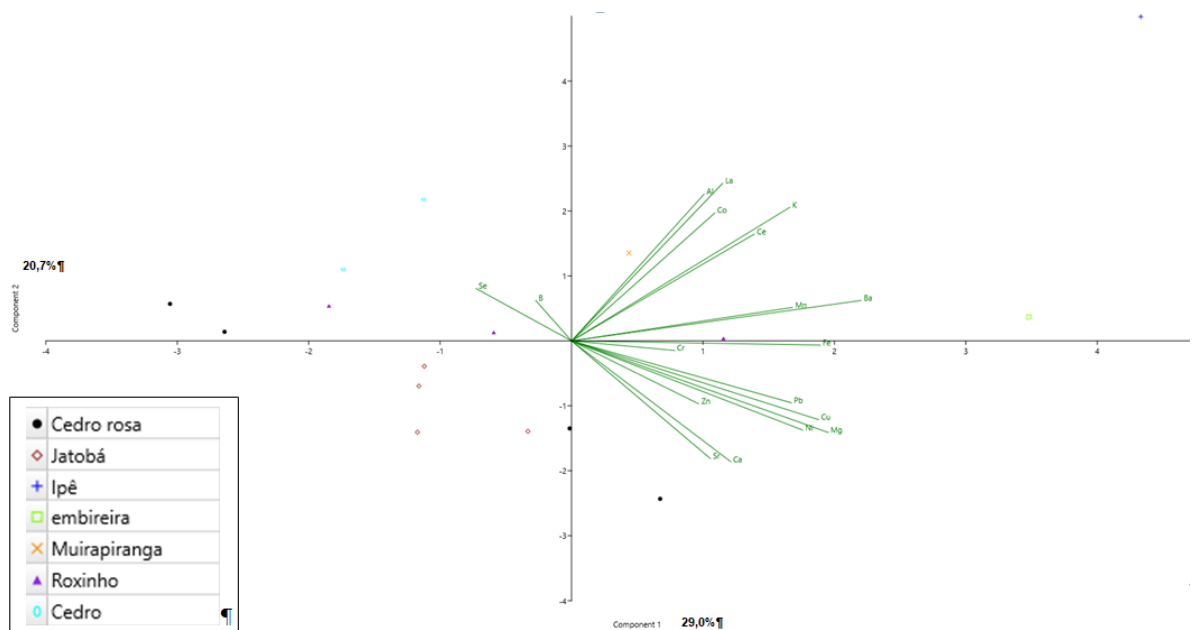


Figura 26 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Flona do Jamari retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies

Fonte: elaboração própria (2025).

No que diz respeito à PCA oriunda dos dados da Flona do Tapajós, observou-se uma explicação da variância com percentual acima de 50% nas PCAs das amostras das regiões a 25%, 75% e a 100% do raio do disco, cujos percentuais foram de 52,3%, de 54,0% e de 54,9%, respectivamente.

Das regiões do raio do disco com percentuais de explicação acima de 50%, somente a PCA da região a 75% permitiu a separação de dois grupos das espécies Jutáí Mirim e Cumaru (Figura 27). O agrupamento de amostras da primeira espécie foi influenciado pelos elementos Co, Cu, Ni e Fe que apresentavam forte correlação positiva. Por outro, a espécie Cumaru teve o Al como o elemento que mais contribuiu para a separação de suas amostras em grupo distinto.

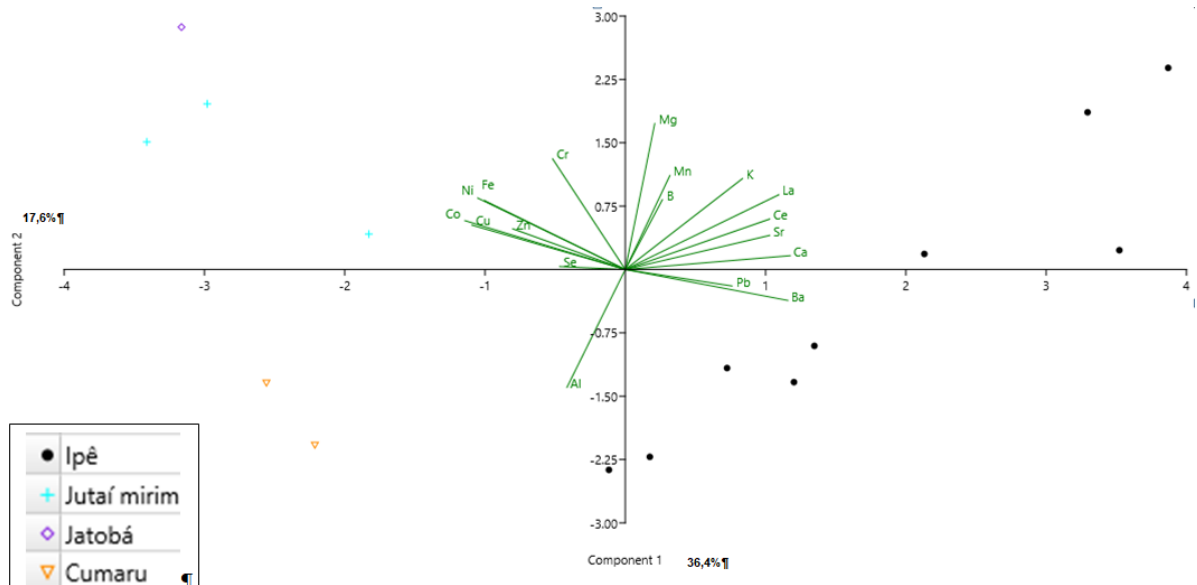


Figura 27 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras da localidade de Flona do Tapajós retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes espécies

Fonte: elaboração própria (2025).

Ao final, foram processadas PCAs com os dados das amostras de Itacoatiara, que apresentaram componentes 1 e 2 com percentuais de explicação abaixo de 50%, à exceção da PCA das amostras da região a 0% do raio do disco, cuja porcentagem foi de 53,1%. Em todas as PCAs não houve separação das espécies em regiões distintas.

5 DISCUSSÃO

A análise de Componente Principal das concentrações de múltiplos elementos mostrou que as concentrações de elementos-traço na madeira variam significativamente entre as localizações geográficas examinadas. O estudo dos elementos-traço selecionados com base nos que mais diferiram entre as localidades pode fornecer uma visão sobre a relação das árvores amostradas com a geologia e o solo local, em alinhamento com os resultados de outros estudos de rastreamento de madeira que revelaram que a composição elementar foi principalmente associada ao tipo de solo e à química do solo.

Os resultados revelaram que a análise multielementar apresentou robustez na diferenciação geográfica de amostras de madeira oriundas de diversas localidades amazônicas, especialmente quando utilizada a média das regiões do disco ou as amostras da região a 50% do raio.

Na PCA da média das regiões do disco, foram observadas as discriminações das regiões de Itacoatiara *versus* Itaituba, de Flona do Tapajós *versus* Itaituba, de Flona do Tapajós *versus* Manicoré e de Itacoatiara *versus* Manicoré. Sendo que as amostras desse último par em comparação ocorrem na mesma classe de solo, o Latossolo Amarelo Distrófico, embora as unidades geológicas (Formação Içá e Formação Alter do Chão) sejam distintas. A formação de grupos distintos na PCA evidencia essa capacidade discriminatória, corroborando os achados de Rees (2015), que revelaram clara distinção entre amostras de algumas localidades diferentes e indicaram a utilidade do perfil multielementar na identificação da origem de madeira tropical.

Apesar de os locais, onde a maioria das amostras (60%) foi coletada na Flona do Tapajós, estarem em solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, assim como as da localidade de Itaituba, aqueles pontos estão a 1,5 km de área de solo classificado como Latossolo Amarelo Distrófico. Porém, as formações geológicas dessas localidades são distintas, o que pode explicar a discriminação dos locais. Ademais, as distâncias entre os sítios discriminados foram longas, variando de 220-640 km, o que resulta em maiores gradientes de solo, mesmo dentro de uma mesma classe. A diferença entre amostras mesmo em classes de solo similares, como entre Itacoatiara e Manicoré, também aponta para a influência de gradientes edáficos locais e variações geoquímicas finas, como sugerido por Boeschoten *et al.* (2022).

Na PCA dos valores médios das regiões os elementos Ba, Ce, La e Zn foram os maiores responsáveis por diferenciar a localidade da Flona do Tapajós de Itaituba. Por outro lado, as amostras de Itaituba foram discriminadas pelas concentrações de Ca, Sr, Mn, Mg e

Cr. A correlação observada entre Sr e Ca está de acordo com Kabata-Pendias (2001), que destaca a similaridade geoquímica entre esses elementos, frequentemente associados a solos com maior grau de intemperismo.

As características geoquímicas e bioquímicas do Sr são semelhantes às do Ca e durante o processo de intemperismo as suas formas quelatadas desempenham importante papel na sua ciclagem, que está intimamente associada ao ciclo de Ca; portanto, Sr é muitas vezes associado ao Ca. A relação Sr para Ca parece ser relativamente estável na biosfera e, portanto, é comumente usada para a identificação de concentrações acumuladas de Sr em um ambiente particular (Kabata-Pendias, 2001).

Observou-se os mesmos grupos diferenciados da PCA da média das regiões do disco, à exceção da comparação entre Itacoatiara e Itaituba, para a PCA da região a 50% do disco. Nessa PCA, a localidade da Flona do Tapajós foi diferenciada da localidade de Itacoatiara. O principal elemento responsável por diferenciar a localidade da Flona do Tapajós de Itacoatiara foi o Zn. Constatou-se a similaridade do padrão de discriminação de Itaituba observado na PCA dos valores médios das regiões, com a participação dos mesmos elementos químicos, exceto o Mg.

Os grupos de amostras de Itacoatiara, de Itapiranga, de Flona do Jamari e de Comodoro não foram claramente discriminados entre si, possivelmente como resultado de uma dominância introduzida por concentrações elevadas de oligoelementos observados nas amostras de Flona do Tapajós (presentes no solo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico), de Manicoré e de Itaituba, conforme sugere Rees (2015) ao observar que grupos de amostras de Camarões, República Democrática do Congo e Gana não foram discriminados uns dos outros de forma nítida, em razão de possível predomínio de concentrações elevadas de oligoelementos observadas nas amostras congolenses.

Em PCA's elaboradas com os elementos (Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb) que mais diferiram entre as localidades, observou-se um aumento expressivo na variância explicada (>50%), com formação de grupos mais definidos e menor sobreposição entre amostras de diferentes localidades. Esses resultados são consistentes com estudo anterior, que demonstra que a pré-seleção de variáveis com alto poder discriminante, após a realização de testes estatísticos preliminares e considerando sua relevância teórica, potencializa a eficácia da PCA (Nikezić *et al.*, 2024).

As concentrações elementares das três espécies analisadas individualmente (espécies X localidades) permitiram distinguir as regiões de origem entre si quando aplicada a análise de componente principal (PCA), destacando-se a PCA da média dos valores das regiões do disco, separando três localidades de Jatobá e três de Maçaranduba em grupos distintos. A

região a 25% do disco propiciou melhor discriminação de localidades de Maçaranduba e Jatobá, com a separação em dois grupos.

Na discriminação de localidades de ocorrência da espécie Maçaranduba, tanto a PCA da média dos valores quanto a PCA da região a 25% tiveram como elementos determinantes para a separação de Itapiranga em relação às outras localidades o Cobre (Cu) e o Cobalto.

Embora nas PCAs da espécie maçaranduba tenha sido constatada a distinção das amostras da localidade de Itacoatiara em relação à Itapiranga para a média das regiões e para a região do disco a 25%, os solos de ambas as áreas pertencem a uma mesma classe. Isso pode ser explicado pelo fato de a composição química da madeira não refletir apenas o tipo de solo em que ocorre, mas também a dinâmica geoquímica local e as interações ambientais. Deklerck *et al.* (2020) demonstraram que foi possível separar o país de origem (República Democrática do Congo ou Costa do Marfim) para indivíduos de *Terminalia superba*, que ocorriam em solos bastante semelhantes. Os elementos que influenciaram a separação das amostras de Maçaranduba de Itapiranga em relação as de Itacoatiara, nos dois cenários, foram Co e Cu. Pode-se explicar essa maior concentração na região de Itapiranga, apesar de ser a mesma classe de solo, porque no local há inclusões de Cambissolo Háplico, que é um solo menos intemperizado, com maiores teores de Co e Cu. Conforme Suppi *et. al* (2018), solos jovens, a exemplo do Cambissolo, possuem teores de Co e Mn superiores aos de solos intemperizados como os Latossolos, mesmo que ambos sejam derivados do mesmo material de origem.

Entretanto, quando da análise do cenário que envolve todas as amostras (espécies e localidades) não houve separação clara entre as amostras das localidades de Itapiranga e Itacoatiara, possivelmente em razão da grande quantidade de dados de diversas espécies analisadas na PCA. Ao restringir a análise a uma única espécie, foram observados agrupamentos distintos, indicando também que algum (uns) fator (es) inerente(s) à espécie é (são) determinante (s) para a discriminação geográfica das regiões.

Ainda em se tratando de amostras de localidades diferentes, mas com a mesma classe de solo, observou-se a formação de grupos distintos na PCA da espécie ipê, representada por Flona do Tapajós e Itaituba. A variação intra e interespecies em sítios com solos similares pode ocorrer. Em estudo recente, Moreira *et al.* (2024) observaram que as diferenças interespecies observadas entre as espécies de ipê analisadas são consistentes com estudos que mostram variações significativas na composição química de espécies coocorrentes, devido a diferenças genéticas e ecológicas. Outra possível explicação para a distinção de amostras de ipê em uma mesma classe de solo é o gradiente de variação na classe do Argissolo Vermelho-Amarelo com inclusões de Neossolo Quartzarênico e Plintossolo Pétrico no local de ocorrência das amostras

de Itaituba, corroborando os altos teores de Al e Fe presentes nesta última classe de solo que contribuíram para a separação de grupos das duas localidades em questão.

No que tange à espécie Jatobá, considerando os valores da média dos valores do disco e a região a 25% do disco, a separação das amostras de Itaituba em relação às amostras de Itacoatiara e de Flona do Jamari foi causada pelas concentrações de Cromo (Cr), Estrôncio (Sr), Cálcio (Ca) e Bário (Ba), pois aquelas amostras apresentam maiores teores desses elementos.

Com o intuito de verificar se existe a possibilidade de separação de amostras de diferentes espécies em uma mesma localidade, foi aplicada a análise de componente principal. Como a composição elementar do solo se reflete no alburno e no cerne das árvores (Boeschoten *et al.*, 2022), espera-se que não haja discriminação clara entre as amostras, haja vista que ocorrem na mesma classe de solo e, portanto, tendem a possuir assinatura química similar.

No geral, para todas as localidades analisadas (Itapiranga, Flona do Jamari, Flona do Tapajós e Itacoatiara), houve preponderância na dispersão das espécies, inviabilizando a formação de grupos distintos. Entretanto, para algumas espécies e em algumas regiões do disco, as PCAs resultaram na discriminação de amostras, que pode ter sido influenciada por fatores específicos da espécie que também desempenham papel na composição multielementar da madeira (Aguzzoni *et al.*, 2025). Nesse sentido, outros autores buscaram melhor compreender esses fatores, a exemplo de Yang *et al.* (2017) que estudaram a influência da taxonomia na determinação da concentração de elementos inorgânicos em plantas, sugerindo que deve ser totalmente considerada para interpretar a variação na nutrição da vegetação; Enquanto, Palacio *et al.* (2022) concluíram nos seus estudos que a filogenia é um forte determinante da composição elementar da planta objeto do seu estudo.

Vê-se que a variabilidade da composição elementar nas madeiras das espécies analisadas é influenciada, na sua maioria, pelas características específicas do solo, haja vista que determinados elementos que predominam no ambiente contribuem para a diferenciação das espécies de madeira. Esses elementos são encontrados naturalmente na crosta terrestre e são disponibilizados por meio de processos de intemperismo, que afetam a sua distribuição na madeira. Tal constatação pode ser corroborada por outros estudos, a exemplo de Boeschoten *et al.* (2022), que observaram que a composição elementar do solo, alburno e cerne estão significativamente associados, fornecendo assim a base para a verificação da origem da madeira.

As regiões intermediárias do disco (25% a 75%) e, especialmente, o valor médio das cinco regiões amostradas, são as mais eficazes na discriminação geográfica. As regiões de 0% (próxima à medula) e 100% (casca) mostraram menor capacidade discriminatória, o que tem relevância prática, dado que essas regiões são frequentemente ausentes em madeira processada

(serrada). Esses padrões são compatíveis com a dinâmica da transição entre alburno e cerne e o acúmulo diferencial de elementos, conforme descrito por Meerts (2002) e Smith *et al.* (2014).

Elementos como Cu, Co, Zn, Ca e B que possuíam menores teores no cerne (entre 25% e 75% do raio dos disco) e que contribuíram para a distinção das localidades, são frequentemente mobilizados e redistribuídos durante o crescimento da árvore e a formação do cerne. À medida que o alburno se transforma em cerne ocorre a translocação de compostos, similar ao da senescência das folhas, quando os aminoácidos e elementos minerais translocáveis e com maior mobilidade são removidos do alburno senescente para o mais jovem, ativo fisiologicamente (Legoas, 2015). Moreira *et al.* (2024) afirmaram que essas variações indicam características específicas dentro e entre os indivíduos que contribuem para a variabilidade total dos dados, corroborando que tanto as espécies quanto os tecidos lenhosos diferem entre si.

6 CONCLUSÃO

Os resultados reforçam que a química do solo é fator importante e determinante da composição elementar da madeira, imprimindo assinatura química peculiar ao local onde a árvore se desenvolve. Os achados ainda demonstram que a combinação dessa assinatura química com a quimiometria (PCA) aumenta a eficácia da análise, possibilitando a discriminação de localidades, em escala regional, o que pode resultar na atribuição de origem geográfica ou no descarte de uma região sob suspeita.

De forma majoritária, as descobertas evidenciaram que a capacidade de distinguir regiões geográficas com base em perfis químicos está associada à influência dos solos locais, embora possa ser modulada por fatores genéticos e fisiológicos das espécies arbóreas, a exemplo da análise de amostras de diferentes espécies com ocorrência em um mesmo tipo de solo, em que houve separação por regiões de grupos de algumas espécies. Essa alteração de padrão deve ser objeto de investigação para buscar explicar o porquê da variação espacial (separação em grupo) das espécies em que se constatou esse comportamento.

Elementos como Cr, Se, B, Zn, Ba e Pb sobressaíram-se como marcadores com diferenças significativas entre localidades, com destaque para as análises baseadas nos valores das regiões intermediárias do disco (25% a 75%) e, especialmente, o valor médio das cinco regiões do disco amostradas, as quais foram as mais eficazes na discriminação geográfica, podendo servir como um ponto de partida para a implementação futura de protocolos de voltados à aplicação da metodologia em processos de verificação de origem.

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) permitiu visualizar agrupamentos espaciais coerentes, validando a hipótese de que o perfil multielementar pode ser utilizado como uma “impressão digital geoquímica” da madeira.

Logo, os resultados obtidos demonstram que a análise multielementar tem elevado potencial como ferramenta de rastreamento da origem de madeira na Amazônia Legal.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da análise multielementar para rastreabilidade da madeira na Amazônia mostra-se promissora para complementar os sistemas documentais como o DOF. Os achados reforçam o potencial forense do perfil multielementar da madeira para o controle da exploração ilegal e para o fortalecimento de ações de fiscalização ambiental.

A existência de perfis químicos distintos em regiões geográficas e a possibilidade de identificar amostras fora de conformidade sugerem seu uso potencial na verificação forense de procedência. No entanto, limitações como a necessidade de bancos de dados geoquímicos robustos, variabilidade intraespécie e influências ambientais exigem cautela e refinamento metodológico, como apontado por Deklerck (2023) e Moreira *et al.* (2024). Portanto, a consolidação desse método no contexto pericial e de fiscalização depende da sua integração com outras abordagens, como análise isotópica e genética, da ampliação das bibliotecas de referência e da padronização analítica.

8 REFERÊNCIAS

- AGUZZONI, A. *et al.* Enhancing timber traceability via multielement and strontium isotope ratio: An example from the Eastern Alps. **bioRxiv**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2024.09.13.612829>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- AGUZZONI, A. *et al.* Tracing timber origin: Geographic provenancing at regional scale with multielement and strontium isotope ratio analyses. *Forest Ecology and Management*, Volume 579, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122494>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- BAKER, T. R. *et al.* Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. **Global Change Biol.**, 10, 545–562, 2004.
- BELLOTE, A. F. J; FILHO, M. T.; DEDECEK, R. A. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2005. 94 p.
- BOESCHOTEN, L. E. *et al.* Clay and soil organic matter drive wood multi-elemental composition of a tropical tree species: Implications for timber tracing. **Science of the Total Environment**, v. 849, n. August, 2022.
- BOESCHOTEN, L. E. *et al.* A new method for the timber tracing toolbox: applying multi-element analysis to determine wood origin. **Environmental Research Letters**, Volume 18, Number 5, 2023.
- CAPP, Edison; NIENOV, Otto Henrique. **Bioestatística quantitativa aplicada**. 2020.
- COL, J. A.; BUENO, M. I. M. S. Energy dispersive X-ray fluorescence applied to mapping of tree stems in Campinas, São Paulo. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 9, p. 2407-2411, 2009.
- CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação. **Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos**, v. 28, 2002.
- CREYDT, M. *et al.* Wood profiling by non-targeted high-resolution mass spectrometry: Part 1, Metabolite profiling in *Cedrela* wood for the determination of the geographical origin. **Erro! Indicador não definido.**, p. 1641, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2021.461993>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- CUTTER, B. E.; GUYETTE, R. P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. **Journal of Environmental Quality**. 22, 611–619, 1993. Disponível em: <https://doi:10.2134/jeq1993.00472425002200030028x>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- DEKLERCK, V. *et al.* Chemical Fingerprinting of Wood Sampled along a Pith-to-Bark Gradient for Individual Comparison and Provenance Identification. **Forests** 2020, 11, 107. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f11010107>. Acesso em: 25 jun. 2025
- DEKLERCK, V. Timber origin verification using mass spectrometry: challenges, opportunities, and way forward. **Forensic Science International: Animals and**

Environments. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fsiae.2022.100057>. Acesso em: 29 maio 2025.

DURAND, S. R. *et al.* Trees, chemistry, and prehistory in the american southwest. **J. Archaeol. Sci.** 26 (2), 185-203, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0315>. Acesso em: 20 jun. 2025

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

FLORSHEIM, S. M. B.; *et al.* **Identificação macroscópica de madeiras comerciais do estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo, 2020.

FYLLAS, N. M. *et al.* Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate, **Biogeosciences**, 6, 2677–2708, 2009.

GASSON, P. E. *et al.* WorldForestID: Addressing the need for standardized wood reference collections to support authentication analysis technologies; a way forward for checking the origin and identity of traded timber. **Plants People Planet**, v. 3, n. 2, p. 130–141, 26 mar. 2021.

GONZAGA, A. L. Madeira: Uso e Conservação. **Cadernos Técnicos – 6**. Brasília, DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006. 246 p.

HERBAUTS, J. *et al.* Radial variations in cation exchange capacity and base saturation rate in the wood of pedunculate oak and european beech. **Canadian Journal of Forest Research**. 32 (10), 1829–1837, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/x02-097>. Acesso em: 26 jun. 2025.

HIETZ, P. *et al.* High-resolution densitometry and elemental analysis of tropical wood. **Trees** 29 (2), 487–497, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1126-7>. Acesso em: 26 jun. 2025.

LEGOAS, R. C. **Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de Eucalyptus grandis sob duas condições de regime hídrico**. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.11.2016.TDE-08032016-134053>. Acesso em: 28 jun. 2025

HORACEK, M. *et al.* Editorial: Identification and control of the geographic origin of plant materials: Investigation of ambient influences and environmental selection, **Front. Sustain. Food Syst.** 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

ITTO. Biennial Review and Assessment of the World Timber Situation 2019-2020. **International Tropical Timber Organization**. Yokohama, Japan. ITTO. 223 p. 2020.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology**. Dove Press, New York. 1941.

JUNIOR, de C. W.; ÁGLIO, M. L. D.; DART, R. O.; SOUZA, J. S.; GUEDES, J. P.; BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. Brasil: solos por regiões geopolíticas. In: Anais do XXXIII

Congresso Brasileiro de Ciência do Solo; 2011; Uberlândia. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011. Resumo expandido.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants**. 3rd Edition, CRC Press, 2001.

KABATA-PENDIAS, A. Soil–plant transfer of trace elements – an environmental issue. **Geoderma**, 122(2), 143-149. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.004>. Acesso em: 26 jun. 2025.

KAGAWA, A. Stable isotopes and inorganic elements as potential indicators of geographic origin of Southeast Asian timber. **Proceedings of the International Symposium on Development of Improved Methods to Identify Shorea Species Wood and its Origin**, 39-44, 2007.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J.J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2009. v.1. p.573-610.

KLOCK, U; ANDRADE, A. S. de. Química da madeira. **Rev. Curitiba**: Universidade Federal do Paraná. 4. ed. 85, p. 2013.

LENTINI, M. *et al.* A Exploração do Ipê (*Handroanthus spp.*) em Florestas Naturais a Amazônia Brasileira: Desafios e Oportunidades para a Conservação e o Manejo Responsável. **Boletim Timberflow 4**. Imaflora, 2021.

LOW, M. C. *et al.* Tracing the world's timber: the status of scientific verification technologies for species and origin identification. *IAWA Journal*, 2022: 1-22.

MALAVOLTA, E. *et al.* Micronutrientes e metais pesados – essencialidade e toxidez. In: PATERNIANI, E. **Ciência, Agricultura e Sociedade**. Brasília-DF: Embrapa, 2006, 503 p.

MARSCHNER, H. General introduction to the mineral nutrition of plants. Inorganic plant nutrition. **Springer Berlin Heidelberg**, 5-60, 1983.

MARTINELLI, L. A. *et al.* Princípios básicos sobre as variações naturais dos isótopos estáveis **Fronteiras em Ciências Forenses** – Ano 1 -Vol. 01, p. 49-58, Julho/2020.

MARTINELLI, L. A., BATAILLE, C. P.; BATISTA, A. C.; SOUZA-SILVA, I. M.; ARAÚJO, M. G.; FILHO, A. L. A.; BRUNELLO, A.; FILHO, M. T.; HIGUCHI, N.; BARBOSA, A. C.; COSTA, F.; NARDOTO, G. B. Bioavailable strontium isoscape for the Amazon region using tree wood, *Forest Ecology and Management*, Volume 594, 2025, 122963, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.fo-390> reco.2025.122963.

MEERTS, P. Mineral nutrient concentrations in sapwood and heartwood: a literature review. *Ann. For. Sci.* 59 (7), 713–722, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/forest:2002059>. Acesso em: 26 jun. 2025.

MOMOSHIMA, N.; BONDIETTI, E.A. Cation binding in wood: applications to understanding historical changes in divalent cation availability to red spruce. **Canadian**

Science Publishing. 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/x90-247>. Acesso em: 30 maio 2025.

MOREIRA, G. R. *et al.* Elemental profile of Ipê species to support timber tracing in Amazon Rainforest, Trees, **Forests and People**, Volume 18, 2024.

NIKEZIĆ, M; PERŞOIU, A.; FEHER, R.; POPA, I.; ZULIANI, T. Geochemical fingerprinting of Norway spruce from the Eastern Carpathians: Sr isotopic and multi-elemental signatures. **Science of The Total Environment**, Volume 954, 2024, 176244, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176244>.

NORMAN, M.; ZUNINO, A. R. Demand for Luxury Decks in Europe and North America is Pushing Ipê to the Brink of Extinction Across the Amazon Basin and Threatening the Forest Frontier. **Tech. Rep.** (Forest Trends, 2022). Disponível em: <https://www.forest-trends.org/publications/demand-is-pushing-ipe-to-brink-of-extinction-across-the-amazon-basin/>. Acesso em: 26 jun. 2025

PALACIO, S. *et al.* Recent and ancient evolutionary events shaped plant elemental composition of edaphic endemics: a phylogeny-wide analysis of iberian gypsum plants. **New Phytologist**, 235(6), 2406-2423, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.18309>. Acesso em: 29 jun. 2025

QUESADA, C. A. *et al.* Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences** 7: 1515–1541, 2010.

QUESADA, C. A. *et al.* Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites, **Biogeosciences**, 8, 1415–1440. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>, 2011. Acesso em: 26 jun. 2025.

RADAMBRASIL: Levantamento dos Recursos Naturais, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1978.

REES, G. **Verifying the Declared Origin of Timber Using Stable Isotope Ratio and Multi-Element Analyses**. 2015. Ph.D. Thesis. Heslington: University of York.

RODRIGUES, R. A. S. **Ciência do solo: morfologia e gênese**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018, 264 p.

RODRIGUEZ, D. R. O.; CARVALHO, H. W. P.; FILHO, M. T. Dendroquímica no estudo nutricional do lenho de árvores de Pinus Taeda L. Por fluorescência de raios X (μ -XRF). In: **VII Congresso Florestal Latino-Americano**. Anais. Vitória (ES) Golden Tulip Porto Vitória Hotel, 2018.

SJOSTROM, E. **Wood chemistry**. 1993. Elsevier Science.

SMITH, K.T. *et al.* Dendrochemical patterns of calcium, zinc, and potassium related to internal factors detected by energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF). **Chemosphere**, Volume 95, pg. 58-62, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.08.017>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ŠTULC, A.I.; POSZWA, A.; PONTON, S.; DUPOUEY, J. L.; BOUCHEZ, J.; BEURET, M.; RIGOUSSEN, D.; PAUL, T.; LEMOINE, M.; COUBRAY, S.; GIRARDCLOS, O.; GAUTHIER, C.; BARDIN, J.; TU, T. T. N.; DUFRAISSE, A.; Tracing the origin of wood at the regional scale with dendrochemical markers: elemental and strontium and neodymium isotopic composition. *Sci Total Environ.* 2024 Dec 20; 957:177640. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177640.

SUPPI, I. M. *et al.* Teores de cobalto e manganês em solos de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 579-588, 14 nov. 2018.

TONOUÉWA, J. F. M. F. *et al.* Timber traceability, determining effective methods to combat illegal logging in africa: a review. **Trees For People** 18:100709, 2024.

VAL, P. *et al.* Chapter 1: Geological History and Geodiversity of the Amazon. In: Nobre, C. *et al.* (Eds). Amazon Assessment Report. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. 2021. Disponível em: <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

VITOUSEK, P. M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. **Ecology** 65 (1), 285–298, 1984.

WATMOUGH, S. A. An evaluation of the use of dendrochemical analyses in environmental monitoring. **Environmental Reviews.** 5(3-4): 181-201, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/a97-010>. Acesso em: 26 jun. 2025.

WILLE, V. K. D. *et al.* Chemical composition of *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex steud wood. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 44, p. 1441-1449, 2017.

YANG, X. *et al.* Taxonomic effect on plant base concentrations and stoichiometry at the tips of the phylogeny prevails over environmental effect along a large scale gradient. **Oikos** 126:1241–1249, 2017.

Apêndice A – Concentrações de elementos analisados

Tabela 6 – Valores das concentrações dos elementos analisados

Indivíduo	Localidade	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb
1	ZF2	11,539	325,601	6,069	300,545	1040,935	1,507	0,000	12,407	0,000	0,066	0,246	9,548	1,429	10,843	0,029	0,000	0,000	0,083
2	ZF2	30,210	314,299	6,209	429,742	679,729	1,481	2,576	14,281	0,000	0,187	0,549	14,996	1,336	7,190	0,060	0,000	0,000	0,074
3	ZF2	20,149	371,081	11,394	421,798	887,016	1,918	13,006	11,199	0,000	0,165	0,561	14,860	1,218	10,693	0,037	0,001	0,001	0,084
4	ZF2	10,209	387,695	8,231	1095,839	1695,296	1,793	0,013	10,315	0,000	0,280	1,053	8,123	1,501	19,087	0,030	0,000	0,001	0,060
5	ZF2	21,965	515,408	5,868	534,921	1359,003	3,723	23,253	20,797	0,000	0,899	0,735	27,481	1,225	9,579	0,333	0,001	0,000	0,045
6	ZF2	21,528	353,944	14,111	972,469	363,923	2,699	13,466	21,686	0,000	0,546	2,682	17,105	1,512	4,272	0,711	0,000	0,003	0,240
7	ZF2	18,932	977,894	22,507	1155,325	1595,414	3,479	21,636	20,305	0,000	0,134	0,581	33,450	1,606	18,206	1,603	0,001	0,003	0,057
8	ZF2	15,407	191,134	8,804	436,624	869,784	3,663	1,010	21,332	0,000	0,238	0,637	17,039	1,751	7,215	0,160	0,000	0,003	0,092
9	Itacoatiara	6,797	413,998	4,019	468,135	623,025	0,345	1,397	98,252	0,000	0,939	0,684	11,080	1,058	6,537	0,187	0,002	0,010	0,187
10	Itacoatiara	3,277	266,990	2,490	321,542	443,223	0,076	1,117	11,349	0,000	0,097	0,699	10,724	1,649	5,211	0,157	0,000	0,006	0,157
11	Itacoatiara	0,000	412,594	15,069	463,134	1051,830	0,284	2,481	29,749	0,037	0,813	0,653	27,959	0,939	10,277	0,549	0,013	0,067	0,549
12	Itacoatiara	0,687	398,932	20,622	946,257	718,768	0,283	17,379	20,031	0,044	0,523	1,477	59,175	1,537	7,879	0,400	0,008	0,060	0,400
13	Itacoatiara	10,105	281,622	76,518	421,745	810,604	0,412	14,827	53,136	0,059	0,637	1,568	53,311	1,177	11,343	0,285	0,036	0,120	0,285
14	Itacoatiara	5,374	247,139	44,383	214,348	759,961	0,406	14,044	14,032	0,042	0,661	2,299	25,232	1,157	10,516	0,237	0,010	0,097	0,237
15	Itacoatiara	8,809	200,063	25,960	159,790	378,357	0,132	11,147	19,788	0,035	0,353	0,684	28,558	1,165	5,610	0,230	0,008	0,054	0,230
16	Itacoatiara	6,184	185,949	23,461	319,393	416,172	0,153	7,811	22,551	0,047	0,665	0,924	47,210	0,838	5,471	0,257	0,006	0,090	0,257
17	Itacoatiara	0,652	227,429	27,663	237,624	404,356	0,085	7,550	12,970	0,039	0,327	0,450	28,268	0,878	5,608	0,283	0,004	0,076	0,283
18	Itacoatiara	7,571	216,990	45,150	309,173	1210,782	0,217	20,651	29,741	0,027	2,895	1,369	25,612	0,906	18,643	0,366	0,006	0,076	0,366
19	Itacoatiara	3,219	98,535	61,285	105,746	612,700	0,219	5,454	17,657	0,012	3,876	1,206	21,627	0,919	9,354	0,141	0,008	0,151	0,141
20	Itacoatiara	3,193	337,769	14,347	93,795	357,677	9,163	6,328	76,073	0,056	3,423	1,264	7,747	0,827	6,309	0,149	0,006	0,048	0,149
21	Itacoatiara	6,770	712,899	32,151	323,555	979,556	0,354	32,988	22,412	0,012	0,973	0,510	5,784	1,245	13,455	0,191	0,009	0,066	0,191
22	Itacoatiara	5,306	423,474	18,398	182,883	553,482	6,570	8,270	72,304	0,031	0,637	0,254	2,429	1,264	8,199	0,202	0,006	0,026	0,202
23	Itacoatiara	5,707	697,674	20,261	601,289	615,817	0,300	8,923	47,391	0,013	1,604	1,694	4,257	0,789	9,619	0,223	0,006	0,040	0,223
24	Itapiranga	7,785	706,224	0,970	363,632	2323,903	1,187	60,339	16,836	0,027	3,468	2,253	0,000	0,000	34,321	0,730	0,000	0,000	0,010
25	Itapiranga	11,230	199,966	2,987	150,824	957,140	0,319	18,793	67,984	0,027	0,184	2,607	2,920	0,000	15,950	0,118	0,041	0,183	0,253
26	Itapiranga	1,456	94,500	0,346	140,276	382,782	0,534	6,110	109,290	0,043	0,787	5,129	0,000	0,000	8,559	0,330	0,000	0,000	0,000
27	Itapiranga	8,194	358,787	15,918	204,948	254,935	0,264	7,681	17,220	0,008	0,000	0,279	11,968	0,000	7,880	0,276	0,000	0,031	0,413
28	Itapiranga	6,024	227,201	5,227	85,876	998,412	0,167	17,276	2,443	0,012	0,140	0,766	8,037	0,118	15,823	0,014	0,024	0,000	0,001
29	Itapiranga	6,878	122,531	30,087	255,690	83,193	0,141	8,021	36,946	0,001	0,000	0,000	16,421	0,000	4,680	0,022	0,000	0,132	0,000
30	Itapiranga	4,866	282,160	16,638	334,082	497,506	0,225	9,909	17,985	0,014	0,161	3,023	82,612	0,000	7,710	0,251	6,553	3,931	0,733
31	Itapiranga	4,035	328,689	4,870	1533,556	1707,375	0,195	0,603	1,990	0,019	0,000	0,715	3,110	0,000	18,896	0,642	0,000	0,000	0,000
32	Itapiranga	4,436	231,222	8,939	503,722	1448,863	0,715	36,848	210,619	0,033	0,216	0,000	2,602	0,000	18,628	0,795	0,000	0,031	0,051
33	Itapiranga	0,000	195,351	0,000	61,214	488,154	0,653	12,225	161,553	0,016	4,028	15,001	26,236	0,000	9,028	1,078	0,000	0,000	0,506
34	Itapiranga	2,560	317,263	0,923	353,890	649,976	0,925	19,552	3,721	0,000	0,005	0,967	89,545	0,000	11,066	0,162	0,000	0,000	0,217
35	Itapiranga	5,906	165,800	11,661	382,678	320,921	0,206	7,253	1,649	0,000	0,071	0,941	33,567	0,556	8,835	0,426	0,005	0,029	0,146
36	Itapiranga	3,089	110,981	17,917	415,479	128,281	0,040	2,582	5,271	0,206	0,144	1,314	14,460	0,000	3,451	1,092	0,093	0,032	0,234
37	Itapiranga	4,522	224,591	17,789	874,298	213,148	1,224	5,433	21,947	0,003	0,234	2,143	8,653	1,017	6,268	0,600	0,006	0,097	0,106
38	Itapiranga	0,769	51,830	3,243	349,268	212,171	0,295	8,361	7,195	0,000	0,057	1,105	9,896	0,112	5,540	0,090	0,040	0,088	0,139
39	Itapiranga	0,764	43,197	7,692	227,859	144,075	0,735	4,872	20,926	0,000	0,105	1,519	35,026	0,705	3,689	0,142	0,000	0,035	0,075

Continua

Continuação

Indivíduo	Localidade	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb
40	Itapiranga	2,473	37,692	4,035	161,250	41,387	0,488	2,343	9,348	0,000	0,034	1,774	4,191	0,598	2,530	0,031	0,273	0,452	0,046
41	Itapiranga	1,588	172,516	2844,852	297,279	27,076	0,363	4,013	24,980	0,181	0,659	21,992	13,697	0,110	3,091	0,715	0,042	0,026	0,052
42	Itapiranga	1,061	285,983	25,247	278,197	376,046	0,248	0,826	15,709	0,203	0,517	8,840	0,243	0,114	6,163	0,188	0,000	0,051	0,003
43	Itapiranga	1,851	244,926	26,214	259,826	396,524	0,370	0,781	14,796	0,154	0,740	5,129	9,286	0,110	5,703	1,225	0,049	0,029	0,010
44	Itapiranga	4,329	206,680	24,310	318,339	564,046	0,144	0,914	16,233	0,122	0,589	4,769	73,497	0,900	7,947	0,065	0,043	0,024	0,011
45	Itapiranga	0,800	153,264	8285,008	405,575	100,042	0,425	4,976	10,475	0,103	0,656	4,173	37,538	0,000	4,837	0,142	0,290	0,254	0,153
46	Itapiranga	0,055	64,883	25,007	143,137	344,275	0,486	2,737	7,848	0,036	0,605	3,048	24,545	0,321	4,144	0,238	0,076	0,024	0,054
47	Itapiranga	0,715	88,871	24,245	102,642	1627,626	0,492	2,666	7,596	0,032	1,040	3,934	22,069	0,579	11,712	0,033	0,036	0,030	0,004
48	Itapiranga	1,004	40,872	24,380	214,545	215,330	0,319	1,850	7,708	0,014	0,688	4,695	20,353	0,000	2,527	0,138	0,055	0,008	0,042
49	Itaituba	10,323	293,807	40,355	850,097	2099,010	3,962	4,021	27,214	0,016	0,557	3,663	11,196	0,746	24,288	4,478	0,143	0,370	4,478
50	Itaituba	7,429	48,963	16,810	449,536	782,624	3,900	5,169	37,844	0,017	0,288	2,980	1,225	1,309	14,471	2,652	0,106	0,146	2,652
51	Itaituba	3,956	229,086	13,785	2298,643	4319,131	6,394	53,137	55,934	0,029	0,395	2,940	6,670	1,045	67,690	0,999	0,021	0,040	0,999
52	Itaituba	4,032	139,082	5,890	347,336	1016,473	1,799	8,585	20,922	0,013	0,385	2,126	4,619	1,130	18,605	2,129	0,066	0,206	2,129
53	Itaituba	18,632	113,109	5,992	172,074	891,264	11,733	2,734	139,547	0,040	0,826	2,117	3,399	0,785	16,819	15,719	0,041	0,070	15,719
54	Itaituba	17,165	168,273	24,614	644,202	3582,657	12,653	50,266	135,121	0,063	0,634	1,825	6,435	1,627	41,208	1,222	0,025	0,057	1,222
55	Itaituba	11,020	556,548	25,709	1857,456	2919,668	5,696	68,642	47,131	0,022	0,340	1,766	6,403	1,064	44,134	3,988	0,033	0,095	3,988
56	Itaituba	23,852	382,395	116,579	418,534	823,047	4,191	43,097	160,132	0,029	0,486	0,617	10,935	1,198	16,203	1,434	0,024	0,194	1,434
57	Itaituba	13,767	378,376	8,347	425,201	610,930	1,638	60,467	17,013	0,016	0,195	0,371	7,157	0,850	20,566	3,765	0,053	0,032	3,765
58	Itaituba	22,522	268,955	2,075	787,406	985,748	1,305	60,888	13,920	0,017	0,218	6,130	3,637	1,926	19,342	9,104	0,018	0,045	9,104
59	Itaituba	31,435	316,714	27,389	1042,140	2941,267	6,323	68,559	35,505	0,030	0,427	2,908	14,860	0,747	30,906	1,778	0,032	0,071	1,778
60	Itaituba	4,364	364,436	27,137	828,298	1279,441	1,756	47,937	17,040	0,011	0,423	3,738	11,068	1,359	23,161	13,187	0,271	0,447	13,187
61	Itaituba	10,191	264,880	13,557	1150,247	1246,036	3,584	92,017	27,295	0,029	0,613	1,532	9,919	1,015	21,809	1,164	0,011	0,026	1,164
62	N. Progresso	8,256	248,779	7,787	238,476	1085,651	4,821	34,369	54,811	0,051	0,454	1,297	9,812	1,025	38,024	1,185	0,011	0,020	1,185
63	N. Progresso	2,605	179,226	9,213	1002,994	800,923	3,195	47,164	47,682	0,042	0,404	3,388	8,008	1,076	10,688	3,653	0,012	0,041	3,653
64	N. Progresso	4,557	424,204	13,557	679,048	929,617	4,104	35,871	26,781	0,016	0,431	1,423	8,361	0,850	12,262	0,472	0,006	0,016	0,472
65	S. G. Cachoeira	1,293	44,214	16,880	475,474	218,072	6,370	10,369	61,344	0,039	0,470	0,812	5,501	1,070	3,905	4,567	0,029	0,025	4,567
66	S. G. Cachoeira	4,782	513,407	6,271	418,125	1205,098	1,666	1,266	17,609	0,010	0,323	1,147	2,411	1,204	18,243	0,226	0,006	0,020	0,226
67	S. G. Cachoeira	2,111	265,122	14,205	1083,110	452,869	4,746	30,550	38,201	0,009	0,442	0,940	5,672	1,236	8,085	3,965	0,016	0,022	3,965
68	S. G. Cachoeira	7,269	287,222	4,904	1025,622	390,272	5,371	1,308	33,473	0,022	0,308	0,327	0,721	1,049	7,287	1,485	0,004	0,007	1,485
69	S. G. Cachoeira	10,126	135,500	34,925	1173,951	294,639	4,859	14,842	39,399	0,023	0,485	1,514	12,992	0,736	4,911	2,129	0,012	0,086	2,129
70	Manicoré	13,279	381,780	14,232	651,388	345,332	1,273	38,086	14,676	0,023	0,645	1,576	12,710	0,893	5,013	13,207	0,008	0,039	13,207
71	Manicoré	6,655	543,709	27,896	1140,342	749,464	2,367	75,526	30,542	0,023	1,709	2,463	12,463	0,781	11,344	3,374	0,023	0,042	3,374
72	Manicoré	5,460	539,439	17,289	1867,345	887,177	4,230	44,849	28,480	0,031	0,512	2,377	10,847	1,142	12,462	14,819	0,009	0,038	14,819
73	Manicoré	8,455	476,513	63,344	907,846	451,851	3,770	34,636	26,863	0,019	0,714	2,588	14,214	1,135	8,416	12,287	0,009	0,391	12,287
74	Manicoré	5,328	282,276	40,287	1659,776	389,107	7,854	8,242	59,180	0,040	0,472	3,818	8,544	1,087	8,782	1,550	0,024	0,103	1,550

Continua

Continuação

Indivíduo	Localidade	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb
75	Flona do Tapajós	1,837	289,630	4,131	277,269	1143,810	0,258	5,996	9,251	0,004	0,423	4,939	1,376	0,112	38,205	66,444	0,406	0,648	0,189
76	Flona do Tapajós	0,058	338,615	8,225	441,587	1287,930	0,159	18,607	9,794	0,000	1,519	7,335	7,274	0,457	24,629	40,247	3,747	7,911	2,852
77	Flona do Tapajós	0,680	189,236	1,517	811,179	741,468	0,097	74,654	9,800	0,000	0,127	6,680	1,702	0,561	10,234	14,547	2,493	3,807	1,151
78	Flona do Tapajós	2,361	133,993	2,540	462,665	813,585	0,234	40,266	3,990	0,000	0,106	4,927	1,779	1,354	21,854	40,171	1,963	1,707	0,222
79	Flona do Tapajós	1,798	106,207	0,256	232,774	894,665	0,025	36,068	6,032	0,000	0,311	3,973	2,607	0,333	9,398	12,052	0,145	0,566	4,362
80	Flona do Tapajós	2,933	193,219	4,481	649,828	1333,793	0,147	2,908	7,979	0,000	0,120	3,700	1,977	0,606	57,907	66,373	4,918	1,636	0,267
81	Flona do Tapajós	2,508	123,181	0,212	375,996	1332,105	0,061	7,194	3,871	0,002	0,200	3,697	1,223	0,108	14,868	22,796	0,039	0,097	0,199
82	Flona do Tapajós	0,052	184,959	9,119	86,781	470,466	0,378	24,404	30,890	0,746	2,345	23,620	2,782	0,225	10,543	0,033	0,109	0,119	0,064
83	Flona do Tapajós	0,061	241,917	1,604	36,152	366,213	0,422	23,656	529,611	0,384	4,528	166,003	4,110	0,363	7,693	2,019	0,128	0,099	0,204
84	Flona do Tapajós	1,049	150,371	1,509	63,999	216,982	0,044	14,195	20,967	0,521	1,037	24,608	0,082	0,880	4,656	0,025	0,078	0,030	0,026
85	Flona do Tapajós	1,778	202,867	4,698	17,468	325,490	0,828	29,281	240,616	0,417	1,708	26,795	1,792	0,589	8,566	0,204	0,016	0,072	0,129
86	Flona do Tapajós	0,423	44,997	5,199	204,756	28,772	0,388	6,222	21,943	0,199	1,036	16,818	1,727	0,456	3,462	0,168	0,157	0,062	0,071
87	Flona do Tapajós	0,000	19,712	39,410	30,373	18,214	0,173	1,637	26,512	0,146	1,124	17,765	0,959	0,000	2,413	0,056	0,039	0,115	0,005
88	Flona do Tapajós	0,053	56,770	22,732	138,806	845,863	0,368	2,484	41,646	0,168	0,484	43,074	0,285	0,797	24,093	30,559	0,425	1,201	2,080
89	Flona do Tapajós	0,440	151,371	29,139	63,420	1039,898	0,082	7,335	19,225	0,299	0,768	16,770	3,048	0,111	12,256	27,927	0,198	0,154	0,163
90	Comodoro	1,472	636,753	9,100	213,375	1878,942	0,463	40,306	13,270	0,000	1,563	16,469	2,245	0,000	23,684	0,418	0,163	0,131	0,169
91	Comodoro	0,059	128,569	1,512	397,423	244,265	0,171	9,635	3,661	0,000	0,030	1,317	1,229	0,360	4,382	0,170	0,094	0,289	0,072
92	Comodoro	0,453	118,480	7,239	431,048	796,315	0,195	3,004	4,438	0,000	0,125	1,427	0,475	0,593	9,818	0,087	0,139	0,321	0,005
93	Comodoro	2,542	30,969	5,037	66,071	72,488	0,438	1,054	5,813	0,000	0,028	0,827	5,844	0,228	1,987	2,505	0,155	0,051	0,248
94	Querência	0,463	324,105	1,579	539,463	468,549	0,763	49,201	8,506	0,000	0,090	0,743	1,284	0,570	4,338	1,057	0,058	0,098	0,092
95	Querência	4,480	364,274	1,235	2146,677	470,481	0,913	37,148	10,724	0,000	1,287	5,055	1,119	0,579	5,711	1,053	0,052	0,065	0,071
96	Querência	0,465	453,589	2,001	268,270	515,681	0,101	27,791	2,435	0,000	0,028	0,484	0,304	0,113	6,348	0,399	0,130	0,110	0,075
97	Querência	0,812	256,751	2,884	1097,943	570,355	0,186	35,058	6,401	0,000	0,187	4,898	6,615	1,312	9,909	0,950	0,112	0,156	0,107
98	Querência	1,142	539,043	3,987	1510,567	1124,858	0,080	7,706	5,413	0,004	0,237	1,629	1,725	0,346	14,491	1,078	0,172	0,184	0,224
99	Querência	2,186	77,702	23,895	427,162	360,213	0,425	24,018	5,972	0,003	0,242	1,183	0,112	0,458	6,137	0,976	0,158	0,084	0,071
100	Querência	1,706	134,824	221,533	714,384	941,169	0,218	2,211	3,711	0,000	0,193	0,570	0,950	0,746	13,840	6,468	0,318	0,308	0,246
101	Querência	3,106	305,790	29,981	233,003	295,380	0,614	19,836	8,866	0,000	0,175	0,299	1,250	0,000	4,297	1,014	0,129	0,160	0,043
102	Querência	0,461	262,120	21,703	788,932	239,057	0,285	32,854	117,491	5,034	2,262	88,367	2,465	1,214	7,370	4,136	0,098	0,073	0,035

Continua

Continuação

Indivíduo	Localidade	B	Mg	Al	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sr	Ba	La	Ce	Pb
103	Flona do Jamari	2,558	349,320	0,000	585,761	1558,610	0,588	0,105	0,789	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	19,110	0,540	0,000	0,000	0,000
104	Flona do Jamari	5,459	345,403	1,114	62,610	1679,891	0,242	0,146	0,308	0,001	0,000	1,028	7,960	0,000	15,254	0,331	0,000	0,245	0,128
105	Flona do Jamari	0,000	3,791	0,000	5,372	7,362	0,020	0,121	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	2,990	0,097	0,023	0,000	0,000	0,000
106	Flona do Jamari	0,627	15,251	0,308	56,324	45,165	0,072	0,524	0,000	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,298	0,126	0,000	0,000	0,000
107	Flona do Jamari	1,125	574,692	1,258	1087,046	2268,042	0,370	0,490	0,594	0,019	0,000	0,934	0,561	0,000	23,506	0,882	0,000	0,000	0,047
108	Flona do Jamari	0,652	386,796	2,732	866,848	1357,738	0,157	12,058	1,806	0,002	0,038	2,293	26,298	0,000	12,413	0,222	1,224	0,713	0,777
109	Flona do Jamari	2,059	298,845	3,982	294,962	1867,539	0,501	49,925	9,351	0,005	0,029	3,403	9,031	0,000	18,024	0,802	0,000	0,000	0,075
110	Flona do Jamari	0,000	463,501	0,300	192,339	1807,912	0,467	62,357	273,087	0,004	4,262	27,515	4,250	0,000	14,631	1,443	0,000	0,000	0,176
111	Flona do Jamari	3,850	192,970	7,970	696,198	820,751	0,586	45,005	6,947	0,006	0,002	2,095	18,482	0,000	8,142	0,852	2,379	1,664	0,110
112	Flona do Jamari	0,171	290,654	53,549	884,962	870,961	0,121	91,564	39,654	0,090	0,537	6,101	1,543	0,991	4,897	3,839	0,510	2,445	0,574
113	Flona do Jamari	0,055	340,488	37,628	1332,837	484,409	1,069	7,809	71,305	0,054	1,477	10,395	5,468	0,110	8,359	3,907	0,138	0,269	0,172
114	Flona do Jamari	2,323	291,421	26,598	411,990	480,646	0,516	16,150	29,794	0,045	0,924	4,578	1,242	0,105	4,156	1,911	0,022	0,080	0,030
115	Flona do Jamari	1,485	326,953	26,486	264,071	605,910	0,461	26,615	8,771	0,022	0,719	6,711	1,780	0,341	10,930	0,070	0,093	0,129	0,060
116	Flona do Jamari	0,812	205,310	25,625	248,849	800,077	0,451	23,626	27,908	0,006	0,635	6,860	2,347	0,899	10,271	0,245	0,295	0,639	0,057
117	Flona do Jamari	1,789	247,687	31,604	407,031	1281,914	0,208	54,719	31,185	0,069	6,915	22,590	1,636	0,225	17,709	2,159	0,055	0,079	0,119
118	Flona do Jamari	1,817	21,434	47,515	779,559	9,022	0,954	2,070	22,111	0,020	0,112	4,194	1,066	0,000	3,077	0,276	0,207	0,150	0,237
119	Flona do Jamari	1,635	43,885	32,764	320,330	39,637	0,289	4,364	18,484	0,008	0,151	2,356	1,005	0,963	3,016	0,201	0,251	0,362	0,297

Nota: B = Boro; Mg = magnésio; Al = alumínio; K = potássio; Ca = cálcio; Cr = cromo; Mn = manganês; Fe = ferro; Co = cobalto; Ni = níquel; Cu = cobre; Zn = zinco; Se = selênio; Sr = estrôncio; Ba = bário; La = lantânio; Ce = Césio; Pb = chumbo.

A unidade adotada para as concentrações de todos os elementos foi $\mu\text{g}/\text{kg}$ (micrograma por quilo).

Apêndice B – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados da totalidade das amostras

Tabela 7 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (B-1) e para as regiões do disco de 0% (B-2), 25% (B-3), 50% (B-4), 75% (B-5) e 100% (B-6)

Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis							
	χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p
B	68.2	10	<.001	B	45.3	10	<.001	B	27.0	10	0.003	B	46.5	10	<.001	B	50.9	10	<.001	B	42.4	10	<.001				
Mg	29.6	10	<.001	Mg	23.3	10	0.010	Mg	31.9	10	<.001	Mg	27.3	10	0.002	Mg	12.8	10	0.238	Mg	27.6	10	0.002				
Al	19.1	10	0.039	Al	12.9	10	0.230	Al	17.6	10	0.062	Al	14.0	10	0.174	Al	11.1	10	0.350	Al	16.8	10	0.080				
K	42.4	10	<.001	K	45.4	10	<.001	K	66.9	10	<.001	K	51.2	10	<.001	K	16.6	10	0.083	K	49.6	10	<.001				
Ca	25.5	10	0.004	Ca	41.1	10	<.001	Ca	37.8	10	<.001	Ca	32.4	10	<.001	Ca	18.0	10	0.055	Ca	32.3	10	<.001				
Cr	69.9	10	<.001	Cr	69.8	10	<.001	Cr	79.3	10	<.001	Cr	65.8	10	<.001	Cr	67.8	10	<.001	Cr	64.8	10	<.001				
Mn	28.2	10	0.002	Mn	33.3	10	<.001	Mn	30.8	10	<.001	Mn	32.6	10	<.001	Mn	17.1	10	0.072	Mn	31.4	10	<.001				
Fe	31.6	10	<.001	Fe	31.4	10	<.001	Fe	24.9	10	0.006	Fe	44.8	10	<.001	Fe	37.3	10	<.001	Fe	33.8	10	<.001				
B-1 Co	33.3	10	<.001	B-2 Co	30.9	10	<.001	B-3 Co	28.9	10	0.001	B-4 Co	28.8	10	0.001	B-5 Co	25.8	10	0.004	B-6 Co	27.5	10	0.002				
Ni	19.9	10	0.030	Ni	26.0	10	0.004	Ni	30.9	10	<.001	Ni	17.7	10	0.061	Ni	23.5	10	0.009	Ni	21.5	10	0.018				
Cu	44.8	10	<.001	Cu	38.6	10	<.001	Cu	36.5	10	<.001	Cu	31.2	10	<.001	Cu	30.9	10	<.001	Cu	38.4	10	<.001				
Zn	56.4	10	<.001	Zn	60.6	10	<.001	Zn	50.8	10	<.001	Zn	51.0	10	<.001	Zn	44.5	10	<.001	Zn	42.9	10	<.001				
Se	72.0	10	<.001	Se	47.3	10	<.001	Se	75.6	10	<.001	Se	57.0	10	<.001	Se	62.2	10	<.001	Se	55.8	10	<.001				
Sr	32.0	10	<.001	Sr	48.4	10	<.001	Sr	37.0	10	<.001	Sr	36.4	10	<.001	Sr	20.8	10	0.022	Sr	36.0	10	<.001				
Ba	50.5	10	<.001	Ba	58.5	10	<.001	Ba	47.4	10	<.001	Ba	53.9	10	<.001	Ba	42.4	10	<.001	Ba	47.8	10	<.001				
La	51.6	10	<.001	La	28.8	10	0.001	La	34.8	10	<.001	La	49.2	10	<.001	La	32.8	10	<.001	La	33.4	10	<.001				
Ce	41.6	10	<.001	Ce	33.8	10	<.001	Ce	40.5	10	<.001	Ce	36.3	10	<.001	Ce	31.7	10	<.001	Ce	35.0	10	<.001				
Pb	67.2	10	<.001	Pb	47.8	10	<.001	Pb	48.3	10	<.001	Pb	50.1	10	<.001	Pb	42.2	10	<.001	Pb	41.8	10	<.001				

Apêndice C – Análise de componente principal dos dados da totalidade das amostras

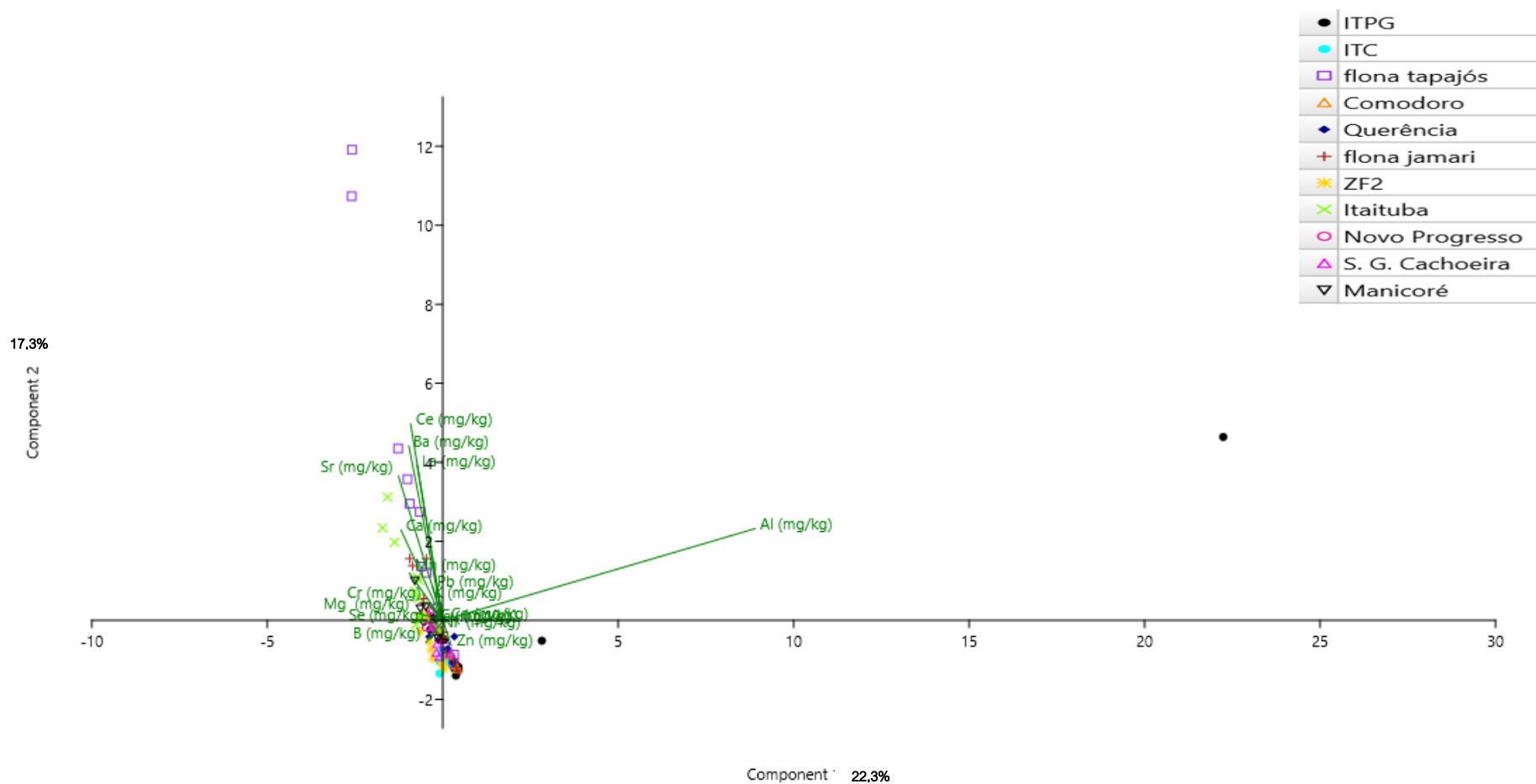


Figura 28 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira, de diferentes localidades

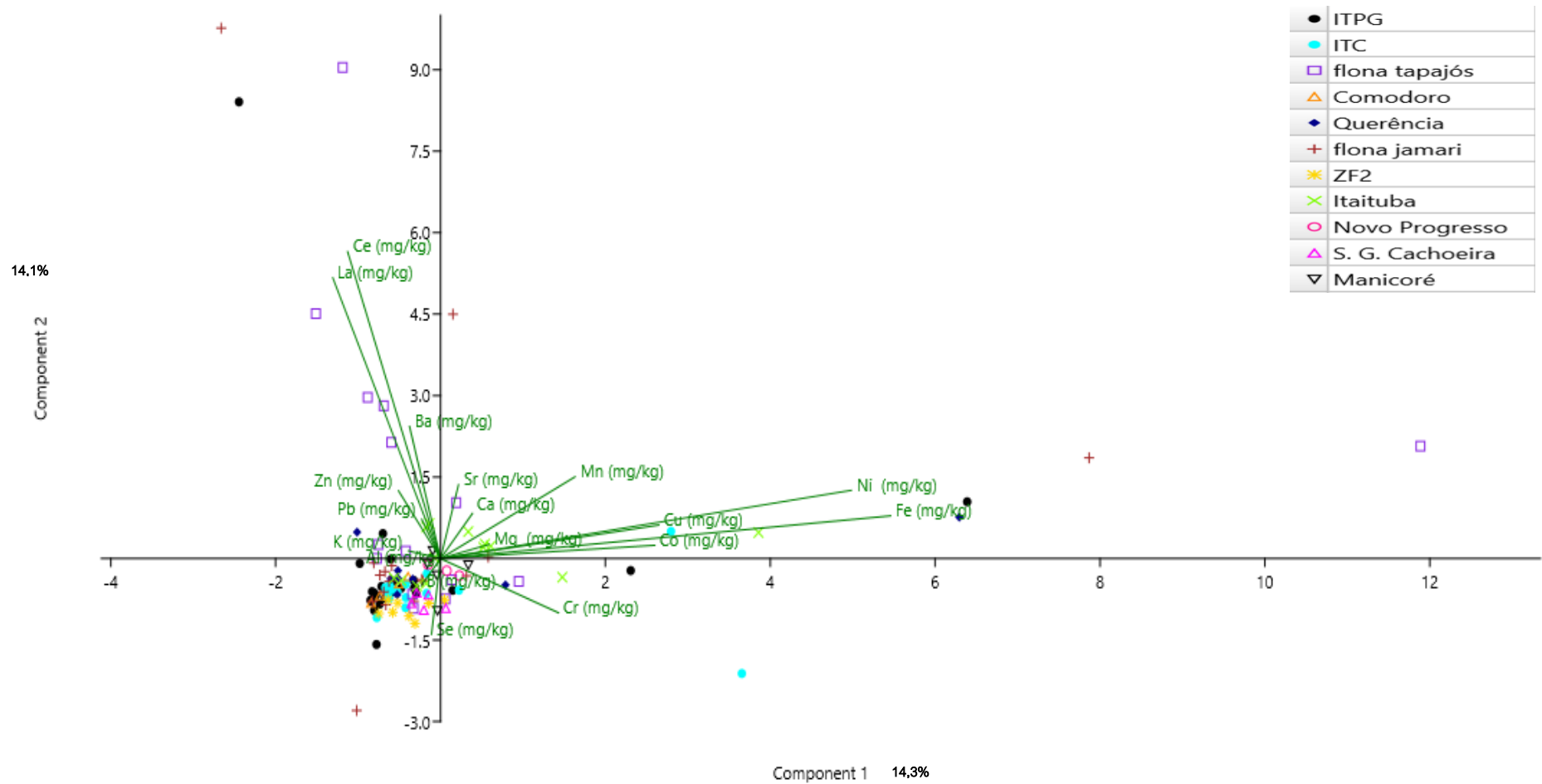


Figura 29 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira, de diferentes localidades

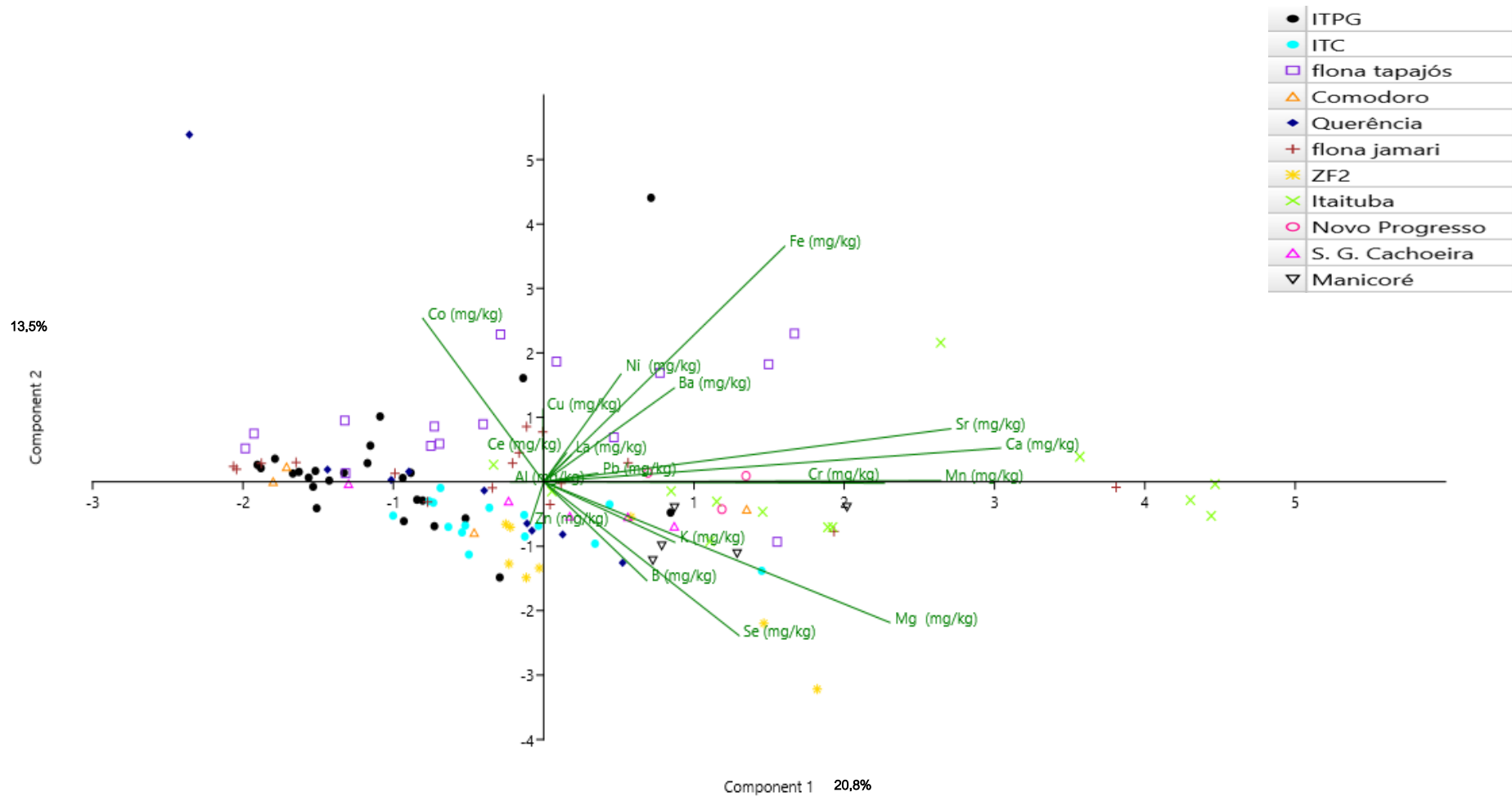


Figura 30 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira, de diferentes localidades

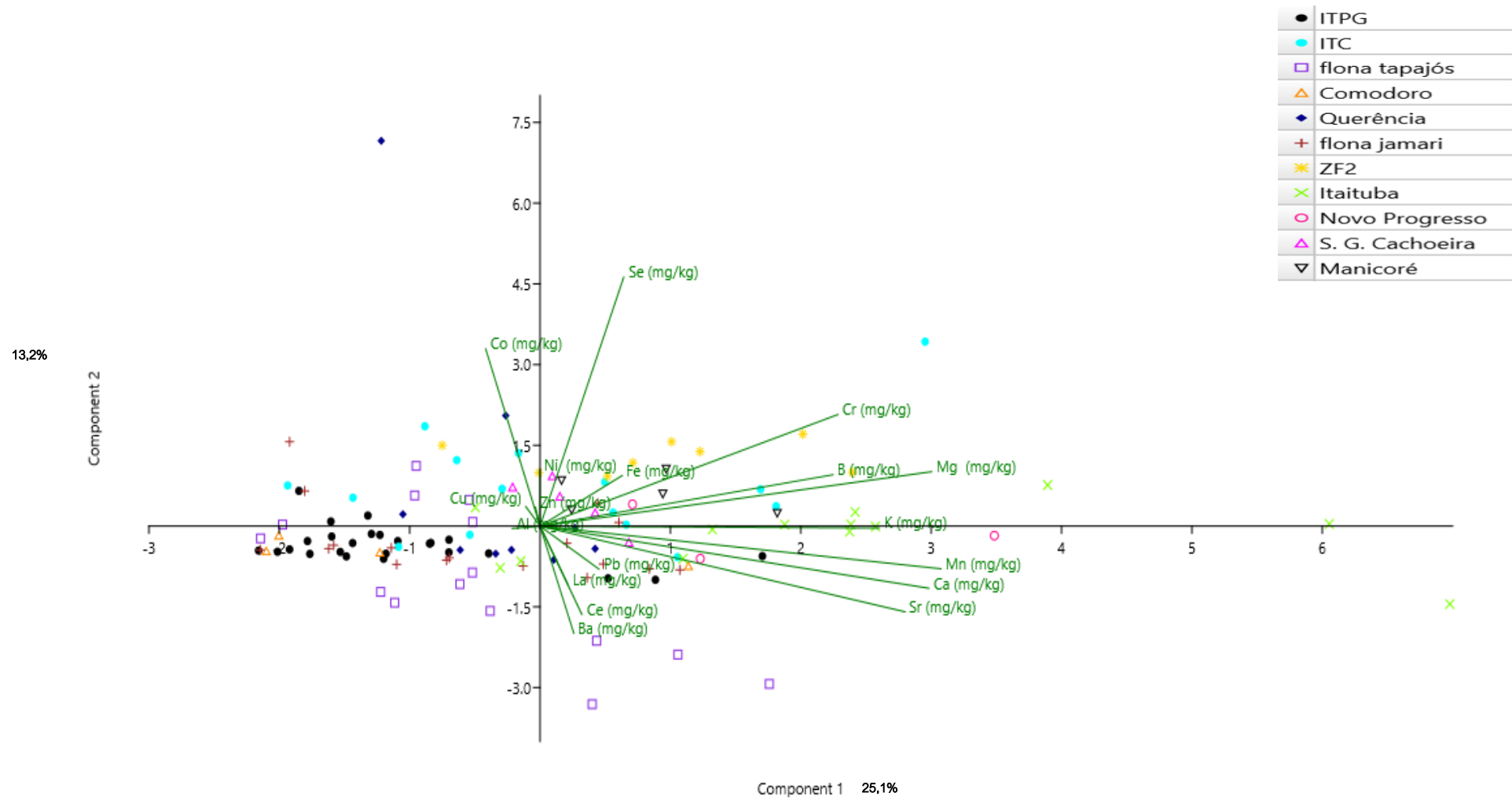


Figura 31 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira, de diferentes localidades

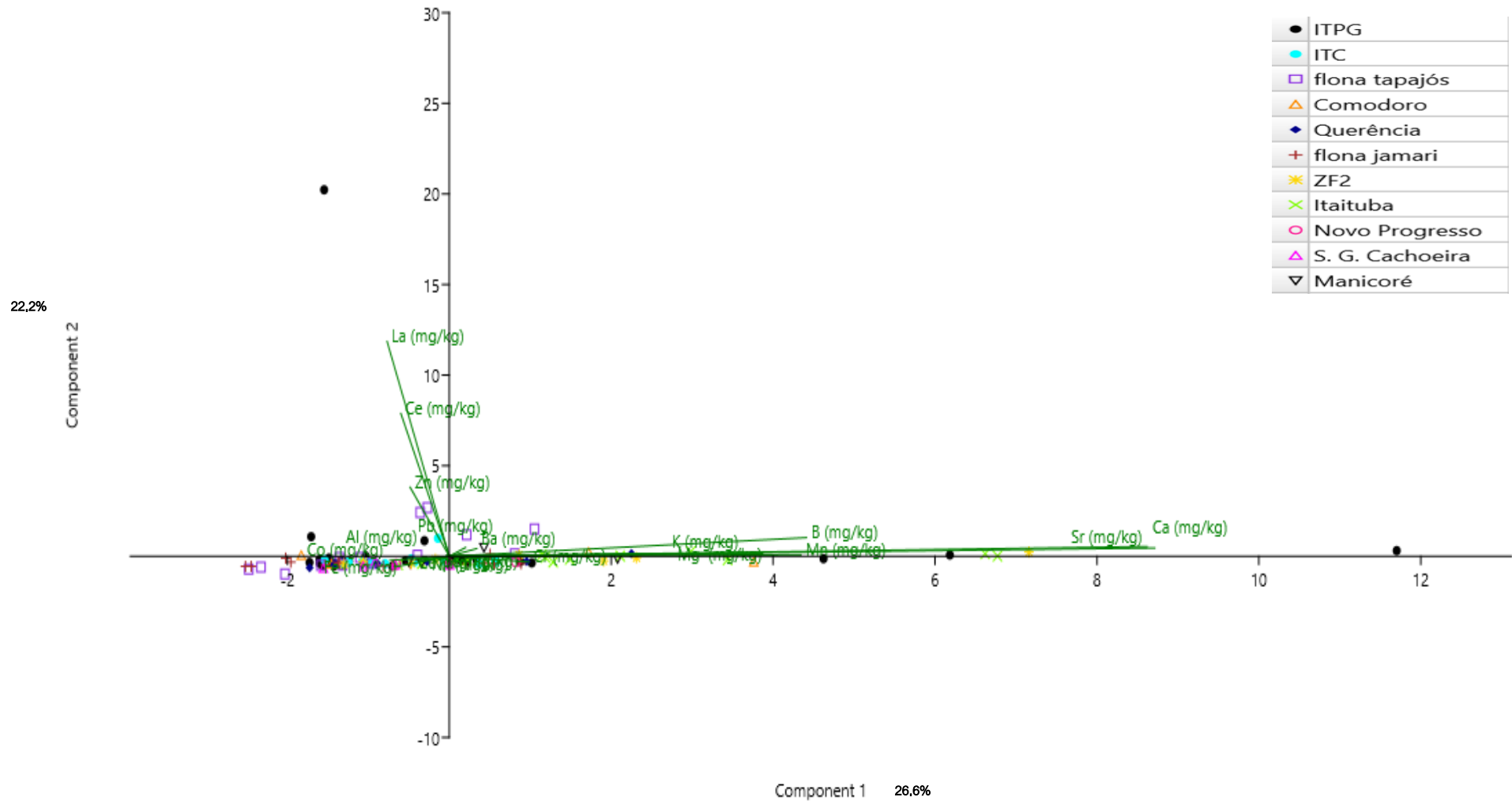


Figura 32 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira, de diferentes localidades

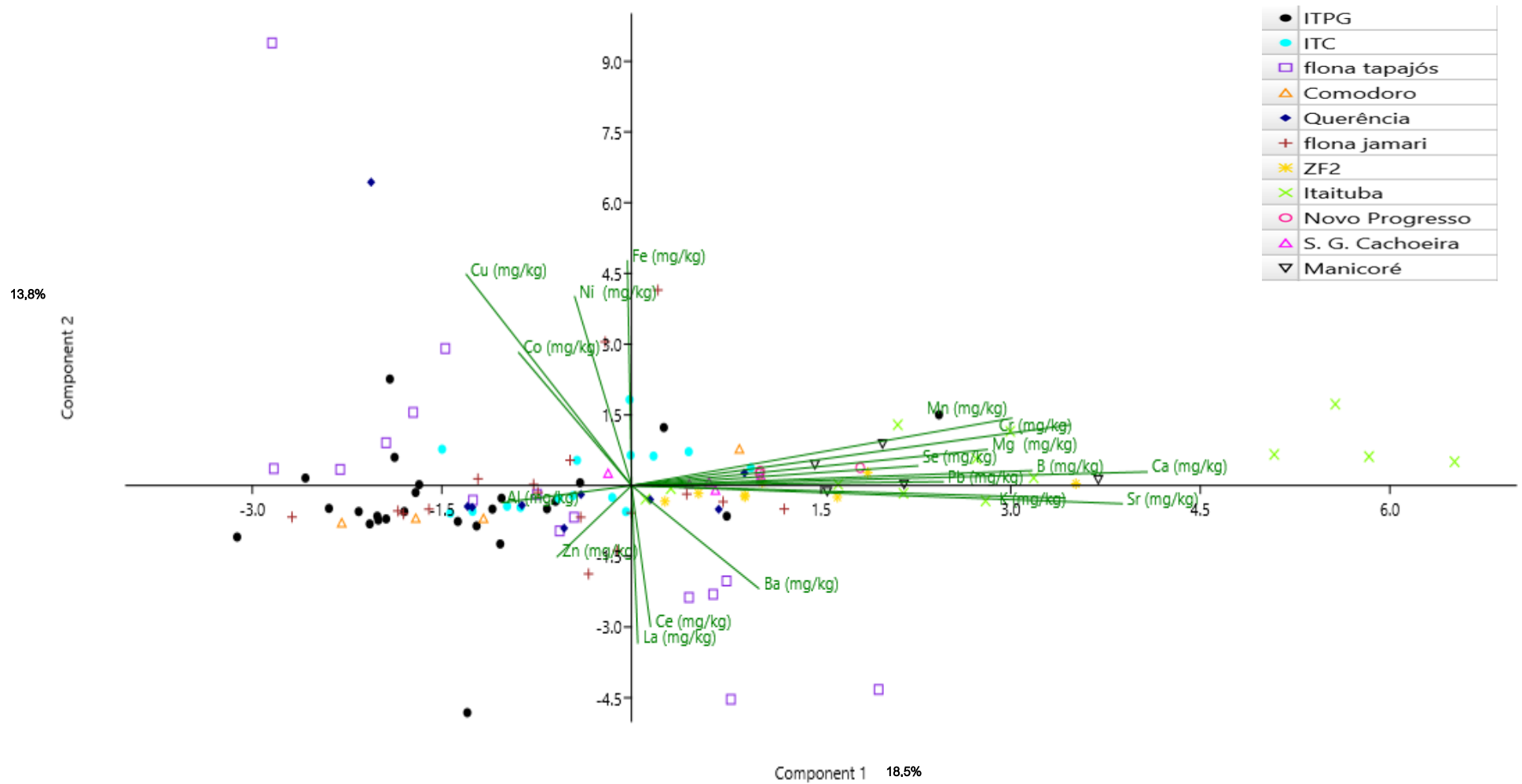


Figura 33 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira, de diferentes localidades

Apêndice D – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados diferentes por espécie (Jatobá)

Tabela 8 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (D-1) e para as regiões do disco de 0% (D-2), 25% (D-3), 50% (D-4), 75% (D-5) e 100% (D-6) de Jatobá

Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis							
	χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p
B	10.88	6	0.092	B	9.55	6	0.145	B	9.23	6	0.161	B	10.56	6	0.103	B	14.30	6	0.026	B	12.44	6	0.053	B	12.44	6	0.053
Mg	5.33	6	0.502	Mg	3.69	6	0.719	Mg	3.63	6	0.727	Mg	2.79	6	0.834	Mg	4.18	6	0.652	Mg	5.31	6	0.505	Mg	5.31	6	0.505
Al	13.84	6	0.032	Al	10.55	6	0.103	Al	9.83	6	0.132	Al	9.90	6	0.129	Al	15.35	6	0.018	Al	14.75	6	0.022	Al	14.75	6	0.022
K	9.07	6	0.170	K	10.36	6	0.110	K (3)	12.81	6	0.046	K (3)	11.62	6	0.071	K (3)	12.41	6	0.053	K (3)	9.40	6	0.152	K (3)	9.40	6	0.152
Ca	12.04	6	0.061	Ca	14.49	6	0.025	Ca	10.14	6	0.119	Ca	10.82	6	0.094	Ca	11.17	6	0.083	Ca	6.35	6	0.385	Ca	6.35	6	0.385
Cr	15.17	6	0.019	Cr	13.05	6	0.042	Cr	11.86	6	0.065	Cr	12.44	6	0.053	Cr	12.30	6	0.056	Cr	12.10	6	0.060	Cr	12.10	6	0.060
Mn	8.88	6	0.181	Mn	8.79	6	0.186	Mn	7.01	6	0.320	Mn	10.12	6	0.120	Mn	12.64	6	0.049	Mn	6.24	6	0.397	Mn	6.24	6	0.397
Fe	5.76	6	0.451	Fe	13.59	6	0.035	Fe	5.75	6	0.452	Fe	4.95	6	0.550	Fe	9.84	6	0.131	Fe	4.44	6	0.617	Fe	4.44	6	0.617
Co	13.03	6	0.043	Co	14.94	6	0.021	Co	10.32	6	0.112	Co	11.34	6	0.078	Co	16.18	6	0.013	Co	6.54	6	0.366	Co	6.54	6	0.366
Ni	5.78	6	0.448	Ni	14.41	6	0.025	Ni	9.10	6	0.168	Ni	5.43	6	0.490	Ni	5.33	6	0.503	Ni	4.85	6	0.563	Ni	4.85	6	0.563
Cu	6.24	6	0.397	Cu	9.41	6	0.152	Cu	5.42	6	0.491	Cu	3.77	6	0.708	Cu	3.38	6	0.760	Cu	3.25	6	0.777	Cu	3.25	6	0.777
Zn	7.17	6	0.305	Zn	12.66	6	0.049	Zn	3.68	6	0.719	Zn	6.10	6	0.412	Zn	11.64	6	0.071	Zn	10.34	6	0.111	Zn	10.34	6	0.111
Se	15.36	6	0.018	Se	15.45	6	0.017	Se	15.61	6	0.016	Se	14.89	6	0.021	Se	15.50	6	0.017	Se	10.87	6	0.093	Se	10.87	6	0.093
Sr	11.71	6	0.069	Sr	13.79	6	0.032	Sr	11.00	6	0.089	Sr	10.02	6	0.124	Sr	11.02	6	0.088	Sr	10.24	6	0.115	Sr	10.24	6	0.115
Ba	11.05	6	0.087	Ba	9.02	6	0.172	Ba	9.42	6	0.151	Ba	8.85	6	0.182	Ba	8.91	6	0.179	Ba	6.81	6	0.339	Ba	6.81	6	0.339
La	6.62	6	0.358	La	16.53	6	0.011	La	9.62	6	0.142	La	9.95	6	0.127	La	15.58	6	0.016	La	11.32	6	0.079	La	11.32	6	0.079
Ce	6.31	6	0.390	Ce	12.25	6	0.057	Ce	10.21	6	0.116	Ce	10.02	6	0.124	Ce	10.49	6	0.106	Ce	11.92	6	0.064	Ce	11.92	6	0.064
Pb	11.83	6	0.066	Pb	10.27	6	0.114	Pb	9.78	6	0.134	Pb	10.24	6	0.115	Pb	6.18	6	0.404	Pb	8.80	6	0.185	Pb	8.80	6	0.185

Apêndice E – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados de localidades diferentes por espécie (Maçaranduba)

Tabela 9 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (E-1) e para as regiões do disco de 0% (E-2), 25% (E-3), 50% (E-4), 75% (E-5) e 100% (E-6) de Maçaranduba

Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis									
	χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		
	B	7.52	4	0.111		B	4.44	4	0.349		B	7.867	4	0.097		B	7.31	4	0.121		B	9.76	4	0.045		B	1.92	4	0.750
	Mg	6.42	4	0.170		Mg	8.00	4	0.092		Mg	5.879	4	0.208		Mg	6.12	4	0.190		Mg	7.94	4	0.094		Mg	2.55	4	0.637
	Al	5.94	4	0.204		Al	3.94	4	0.414		Al	8.364	4	0.079		Al	5.03	4	0.284		Al	7.70	4	0.103		Al	4.42	4	0.352
	K	7.52	4	0.111		K	7.33	4	0.119		K	6.727	4	0.151		K	6.73	4	0.151		K	6.42	4	0.170		K	4.61	4	0.330
	Ca	5.64	4	0.228		Ca	5.09	4	0.278		Ca	8.121	4	0.087		Ca	7.15	4	0.128		Ca	6.61	4	0.158		Ca	2.91	4	0.573
	Cr	8.00	4	0.092		Cr	8.40	4	0.078		Cr	8.158	4	0.086		Cr	7.64	4	0.106		Cr	8.36	4	0.079		Cr	5.21	4	0.266
	Mn	9.45	4	0.051		Mn	7.82	4	0.098		Mn	8.242	4	0.083		Mn	9.45	4	0.051		Mn	8.97	4	0.062		Mn	8.73	4	0.068
	Fe	4.61	4	0.330		Fe	6.67	4	0.155		Fe	7.697	4	0.103		Fe	4.36	4	0.359		Fe	5.27	4	0.260		Fe	7.27	4	0.122
E-1	Co	7.29	4	0.121	E-2	Co	6.83	4	0.145	E-3	Co	7.531	4	0.110	E-4	Co	8.14	4	0.087	E-5	Co	7.41	4	0.115	E-6	Co	8.09	4	0.088
	Ni	4.97	4	0.290		Ni	4.61	4	0.330		Ni	3.091	4	0.543		Ni	3.39	4	0.494		Ni	5.58	4	0.235		Ni	6.42	4	0.170
	Cu	7.76	4	0.101		Cu	7.27	4	0.122		Cu	7.939	4	0.094		Cu	7.76	4	0.101		Cu	9.45	4	0.051		Cu	7.27	4	0.122
	Zn	3.09	4	0.543		Zn	2.97	4	0.563		Zn	0.727	4	0.948		Zn	1.70	4	0.791		Zn	1.58	4	0.813		Zn	6.79	4	0.148
	Se	6.36	4	0.174		Se	7.53	4	0.110		Se	6.454	4	0.168		Se	1.83	4	0.768		Se	5.43	4	0.246		Se	6.51	4	0.164
	Sr	8.24	4	0.083		Sr	7.94	4	0.094		Sr	8.242	4	0.083		Sr	8.61	4	0.072		Sr	7.52	4	0.111		Sr	3.88	4	0.423
	Ba	7.39	4	0.116		Ba	7.76	4	0.101		Ba	5.576	4	0.233		Ba	7.27	4	0.122		Ba	8.83	4	0.066		Ba	9.21	4	0.056
	La	4.94	4	0.294		La	3.52	4	0.474		La	8.324	4	0.080		La	7.32	4	0.120		La	8.48	4	0.076		La	7.39	4	0.117
	Ce	6.18	4	0.186		Ce	2.19	4	0.701		Ce	6.424	4	0.170		Ce	4.00	4	0.406		Ce	5.45	4	0.244		Ce	8.35	4	0.080
	Pb	9.21	4	0.056		Pb	9.25	4	0.055		Pb	9.426	4	0.051		Pb	9.25	4	0.055		Pb	8.67	4	0.070		Pb	8.40	4	0.078

Apêndice F – Teste Kruskal-Wallis de comparação dos dados de localidades diferentes por espécie (Ipê)

Tabela 10 – Resultados do Teste Kruskal-Wallis de Comparação para a média das regiões (F-1) e para as regiões do disco de 0% (F-2), 25% (F-3), 50% (F-4), 75% (F-5) e 100% (F-6) de Ipê

Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis				Kruskal-Wallis													
	χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		χ^2	gl	p		
	B	11.189	2	0.004	B	8.072	2	0.018	B	2.212	2	0.331	B	3.557	2	0.169	B	4.2292	2	0.121	B	7.041	2	0.030									
	Mg	0.137	2	0.934	Mg	0.608	2	0.738	Mg	0.137	2	0.934	Mg	1.287	2	0.526	Mg	1.5196	2	0.468	Mg	1.012	2	0.603									
	Al	2.365	2	0.306	Al	4.134	2	0.127	Al	0.869	2	0.648	Al	2.121	2	0.346	Al	4.3713	2	0.112	Al	1.080	2	0.583									
	K	4.130	2	0.127	K	0.736	2	0.692	K	2.965	2	0.227	K	7.594	2	0.022	K	2.3824	2	0.304	K	3.365	2	0.186									
	Ca	1.424	2	0.491	Ca	1.520	2	0.468	Ca	2.757	2	0.252	Ca	1.284	2	0.526	Ca	1.7181	2	0.424	Ca	4.071	2	0.131									
	Cr	11.118	2	0.004	Cr	11.324	2	0.003	Cr	10.322	2	0.006	Cr	11.202	2	0.004	Cr	9.7770	2	0.008	Cr	11.169	2	0.004									
	Mn	0.953	2	0.621	Mn	0.306	2	0.858	Mn	0.581	2	0.748	Mn	1.990	2	0.370	Mn	1.5196	2	0.468	Mn	0.490	2	0.783									
	Fe	7.189	2	0.027	Fe	7.324	2	0.026	Fe	5.483	2	0.064	Fe	2.382	2	0.304	Fe	8.5784	2	0.014	Fe	5.189	2	0.075									
F-1	Co	4.019	2	0.134	F-2	Co	4.237	2	0.120	F-3	Co	3.230	2	0.199	F-4	Co	3.976	2	0.137	F-5	Co	4.2509	2	0.119	F-6	Co	2.482	2	0.289				
	Ni	0.563	2	0.755	Ni	1.990	2	0.370	Ni	2.696	2	0.260	Ni	0.490	2	0.783	Ni	0.0294	2	0.985	Ni	3.051	2	0.217									
	Cu	6.777	2	0.034	Cu	2.777	2	0.249	Cu	2.659	2	0.265	Cu	10.490	2	0.005	Cu	6.0515	2	0.049	Cu	2.169	2	0.338									
	Zn	5.483	2	0.064	Zn	3.612	2	0.164	Zn	3.422	2	0.181	Zn	4.280	2	0.118	Zn	9.4848	2	0.009	Zn	4.607	2	0.100									
	Se	6.777	2	0.034	Se	6.070	2	0.048	Se	3.465	2	0.177	Se	6.955	2	0.031	Se	4.2579	2	0.119	Se	8.133	2	0.017									
	Sr	1.424	2	0.491	Sr	2.051	2	0.359	Sr	2.659	2	0.265	Sr	1.431	2	0.489	Sr	2.6593	2	0.265	Sr	2.853	2	0.240									
	Ba	9.206	2	0.010	Ba	9.836	2	0.007	Ba	8.600	2	0.014	Ba	8.020	2	0.018	Ba	9.2059	2	0.010	Ba	11.169	2	0.004									
	La	7.549	2	0.023	La	2.663	2	0.264	La	3.895	2	0.143	La	6.618	2	0.037	La	5.3652	2	0.068	La	2.965	2	0.227									
	Ce	7.549	2	0.023	Ce	5.064	2	0.079	Ce	5.365	2	0.068	Ce	7.549	2	0.023	Ce	2.2509	2	0.325	Ce	7.189	2	0.027									
	Pb	7.953	2	0.019	Pb	3.895	2	0.143	Pb	5.404	2	0.067	Pb	1.365	2	0.505	Pb	4.6005	2	0.100	Pb	2.647	2	0.266									

Apêndice G – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Jatobá)

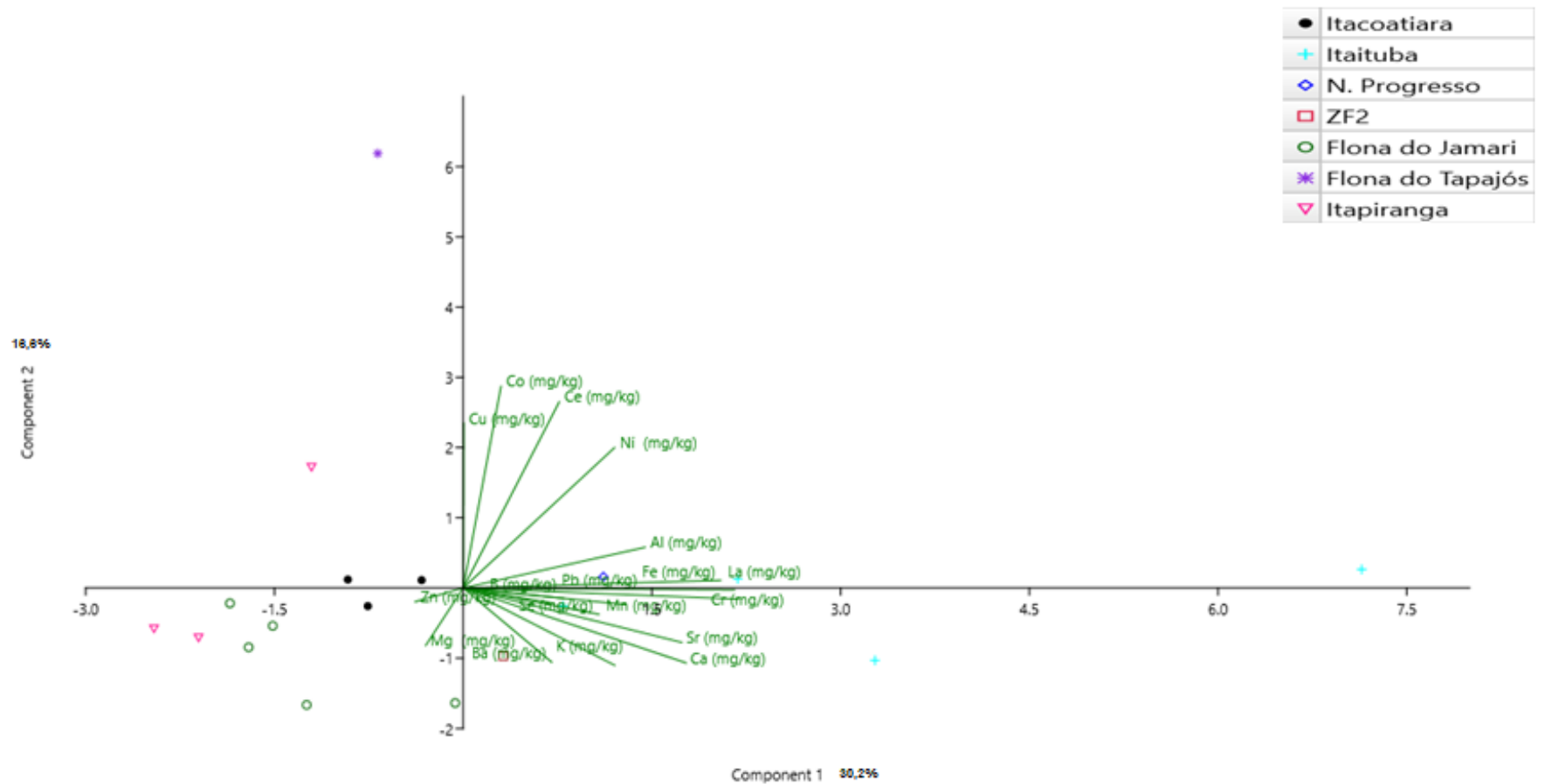


Figura 34 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

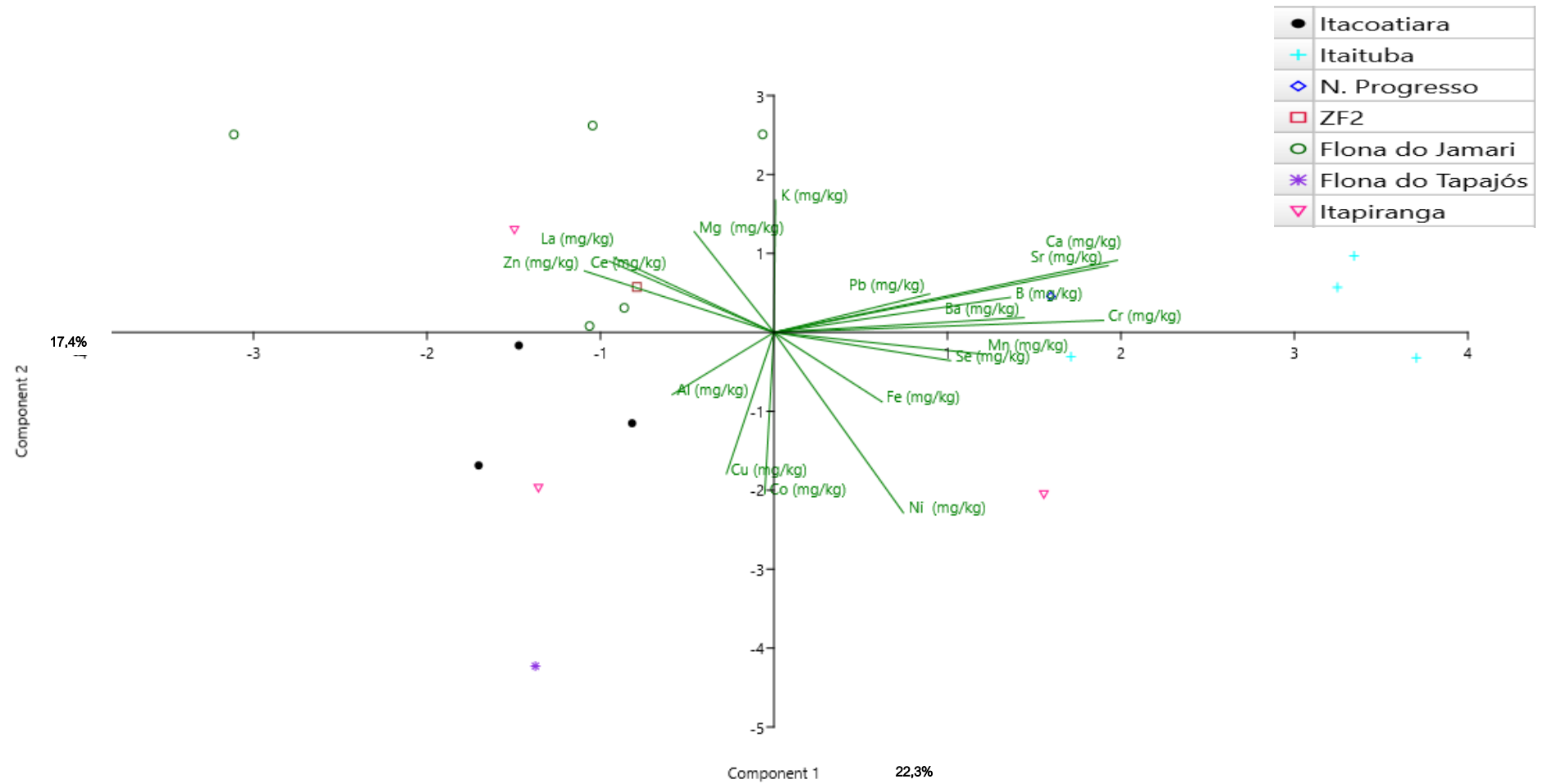


Figura 35 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

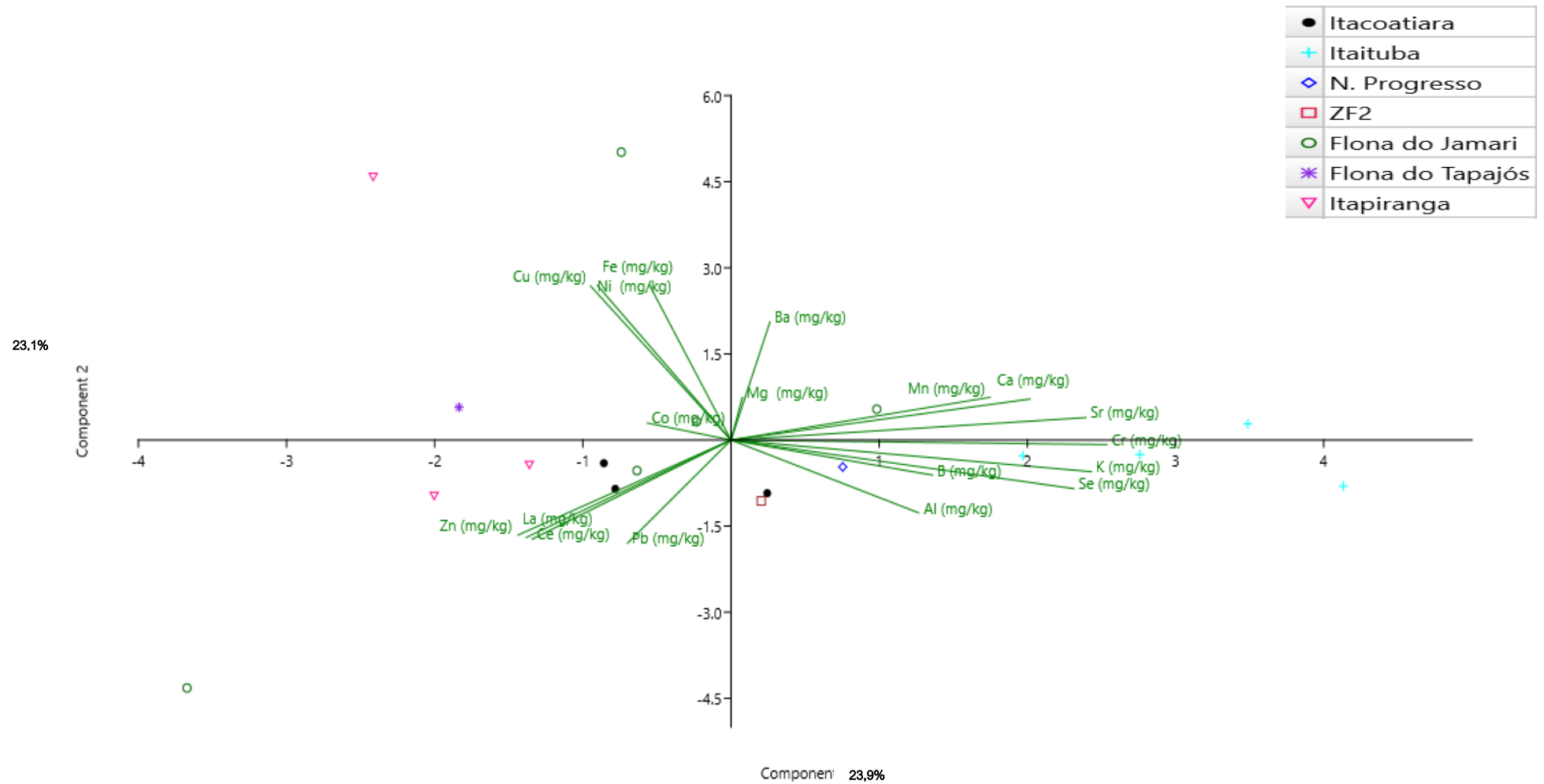


Figura 36 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

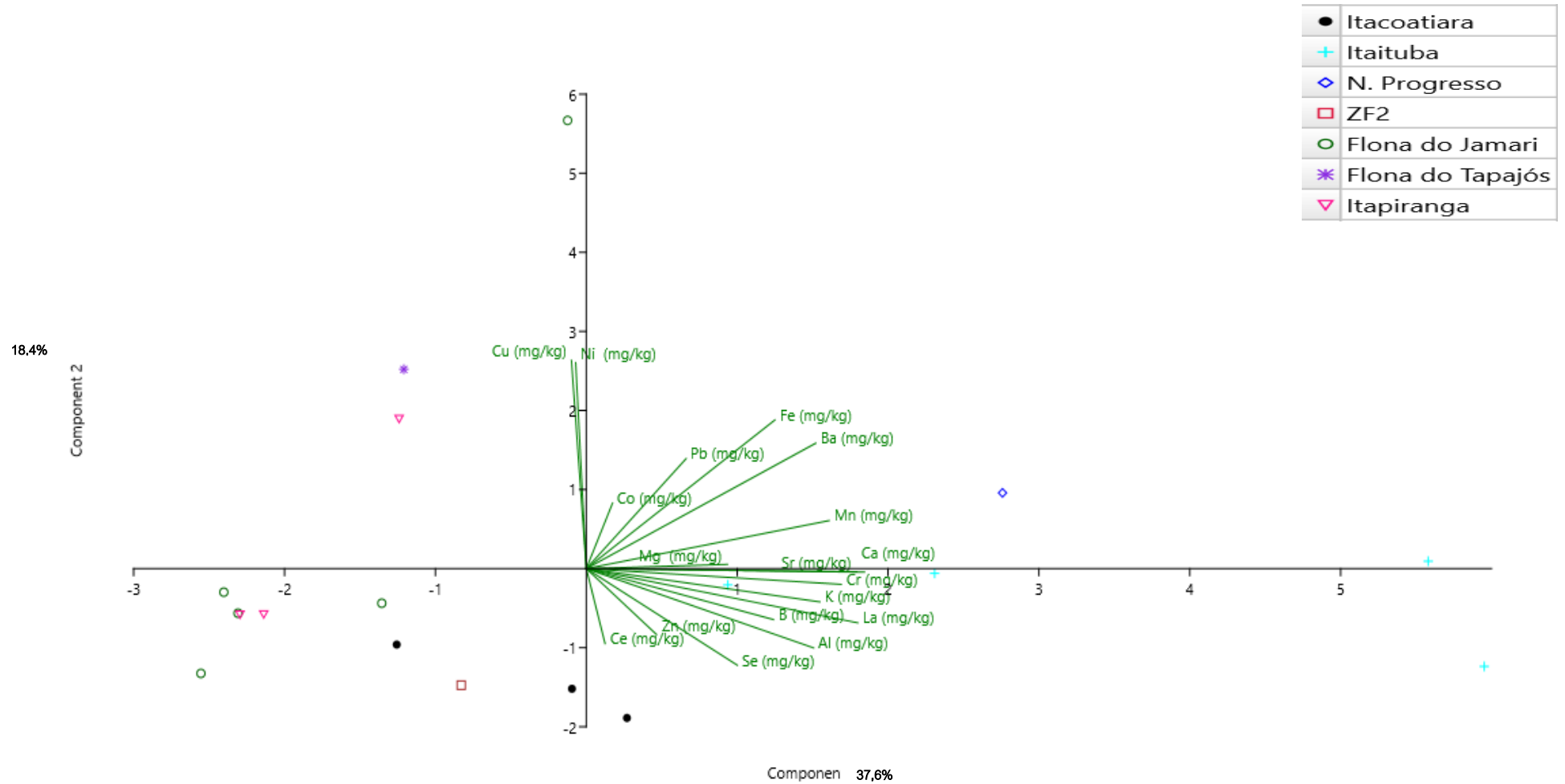


Figura 37 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

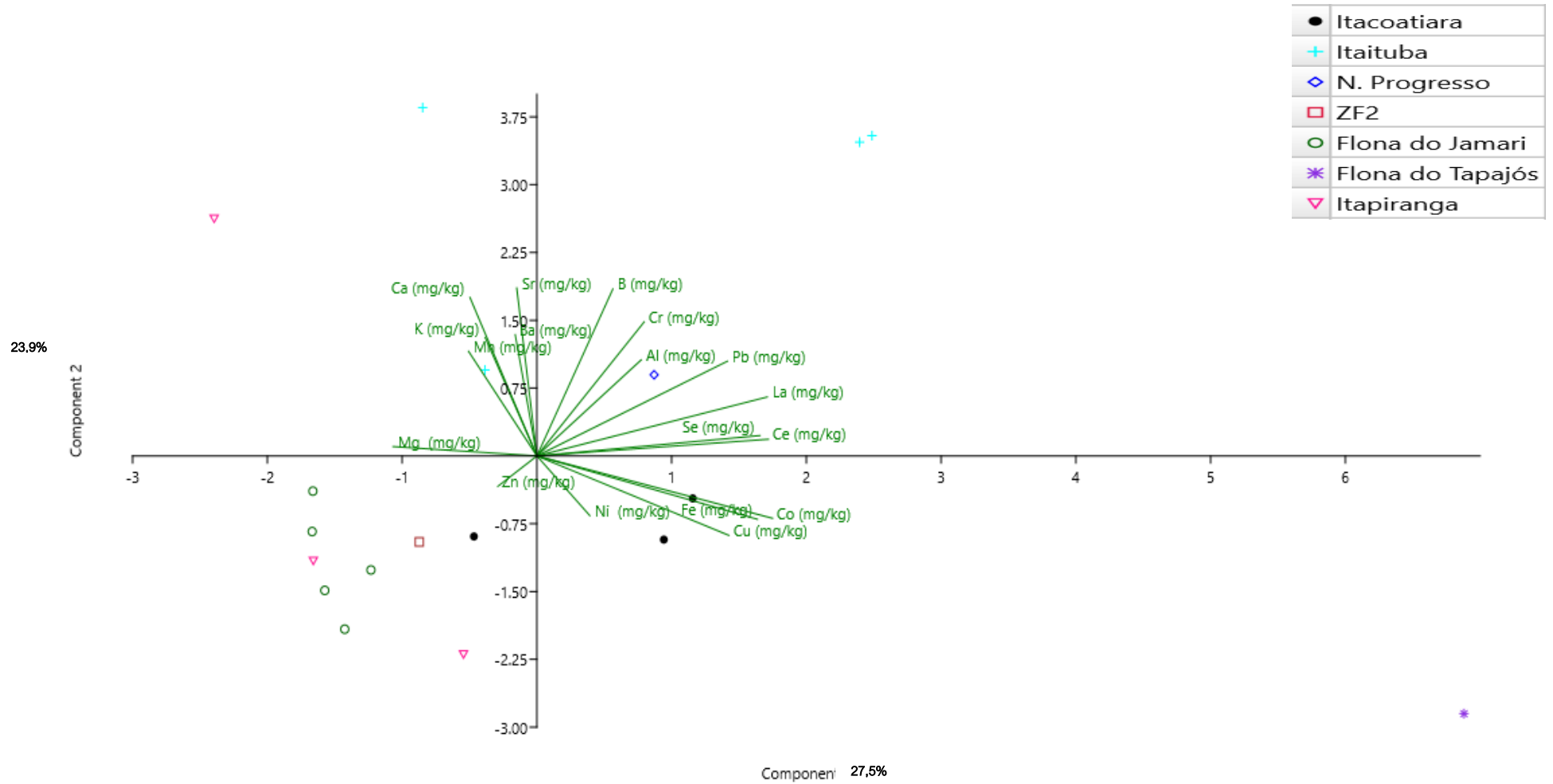


Figura 38 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

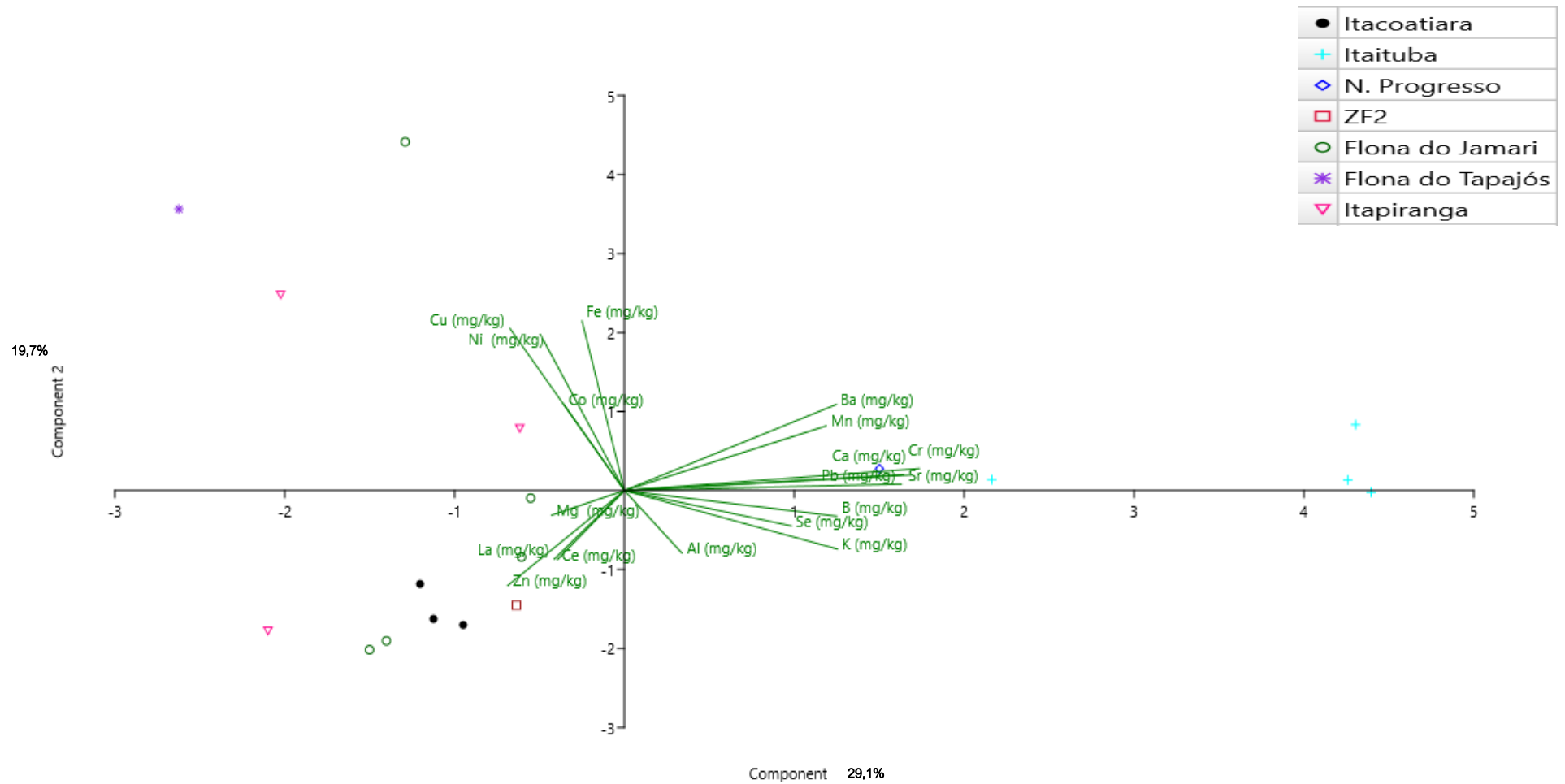


Figura 39 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de jatobá, de diferentes localidades

Apêndice H – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Maçaranduba)

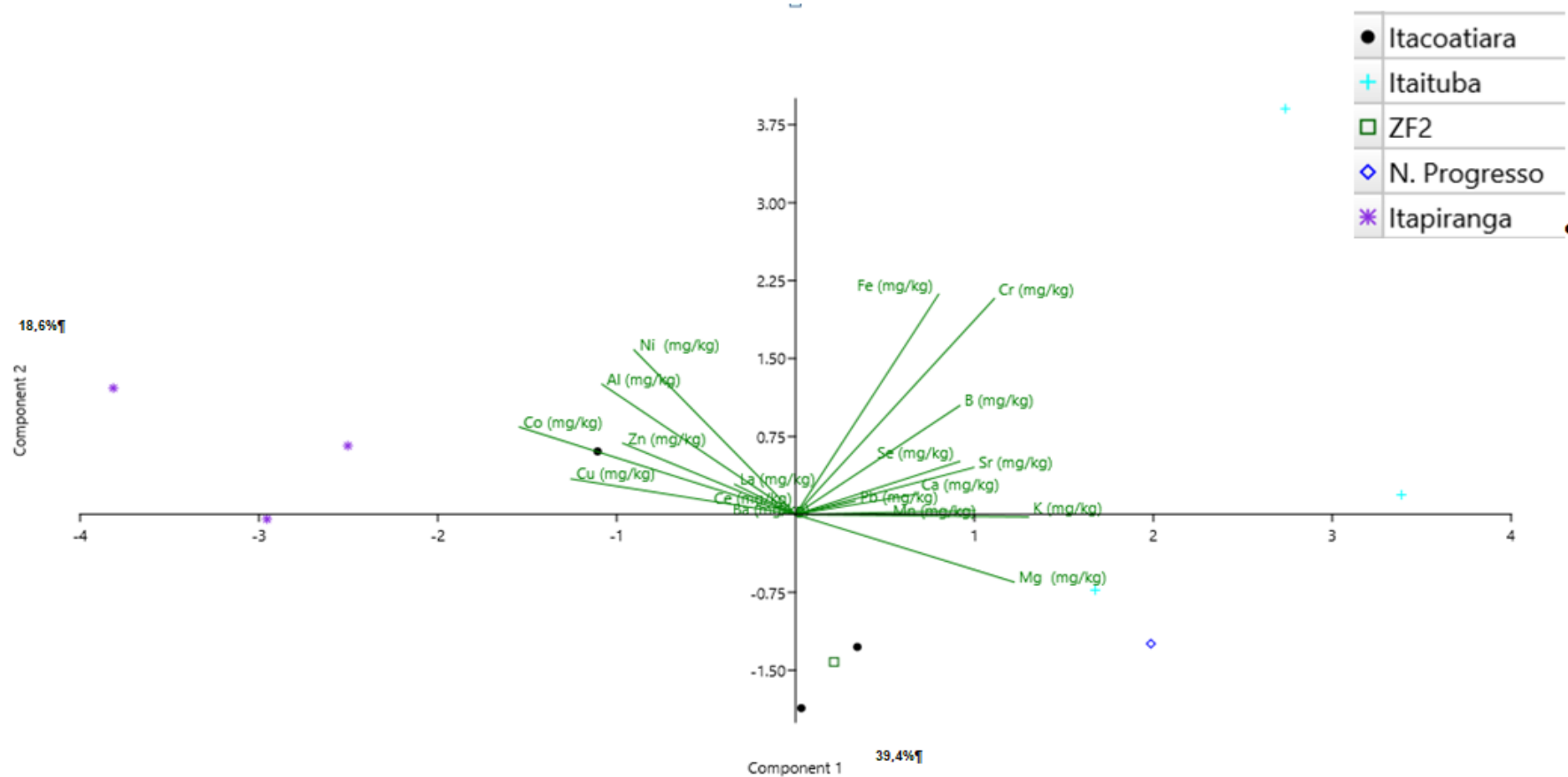


Figura 40 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

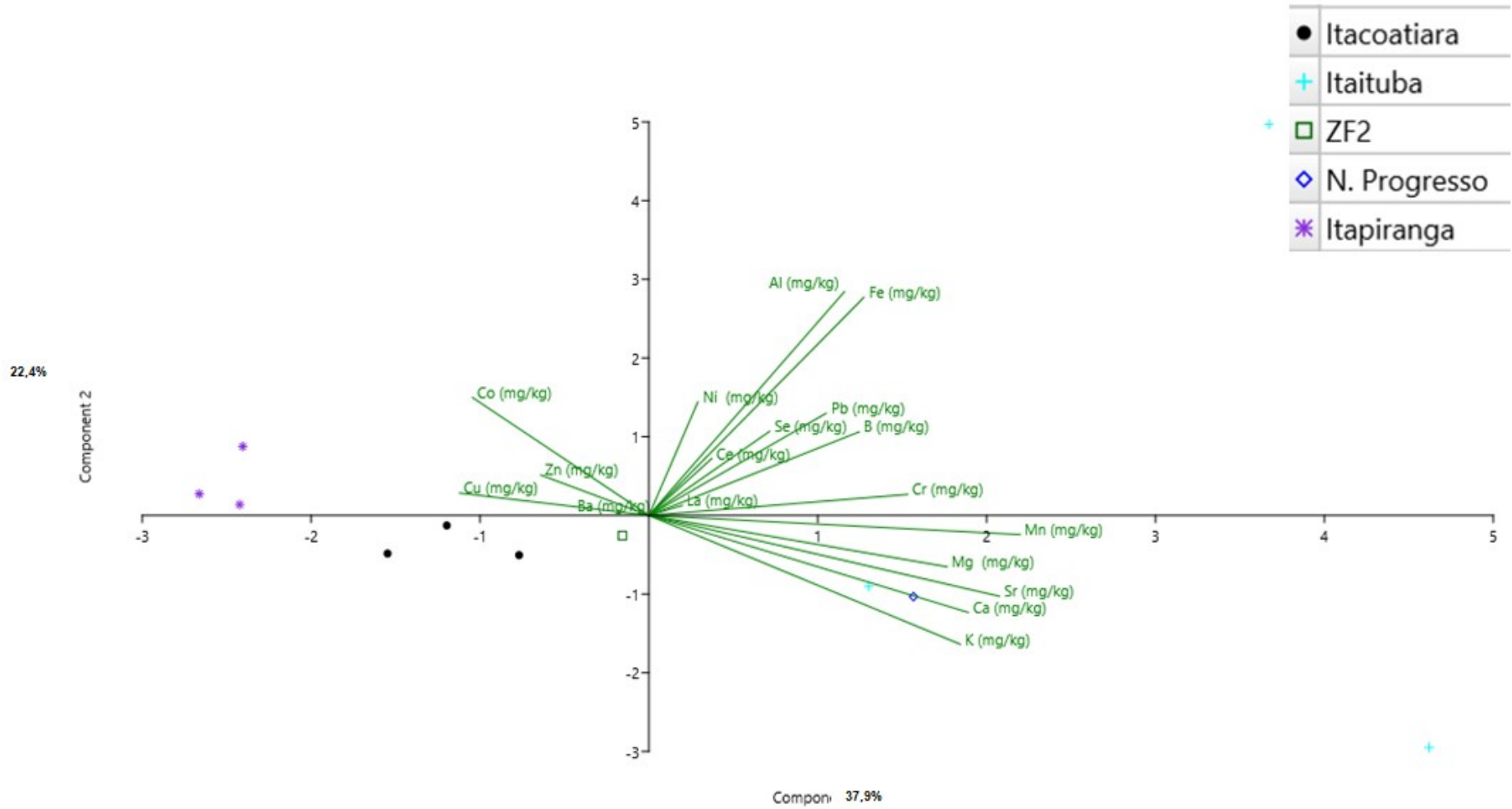


Figura 41 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

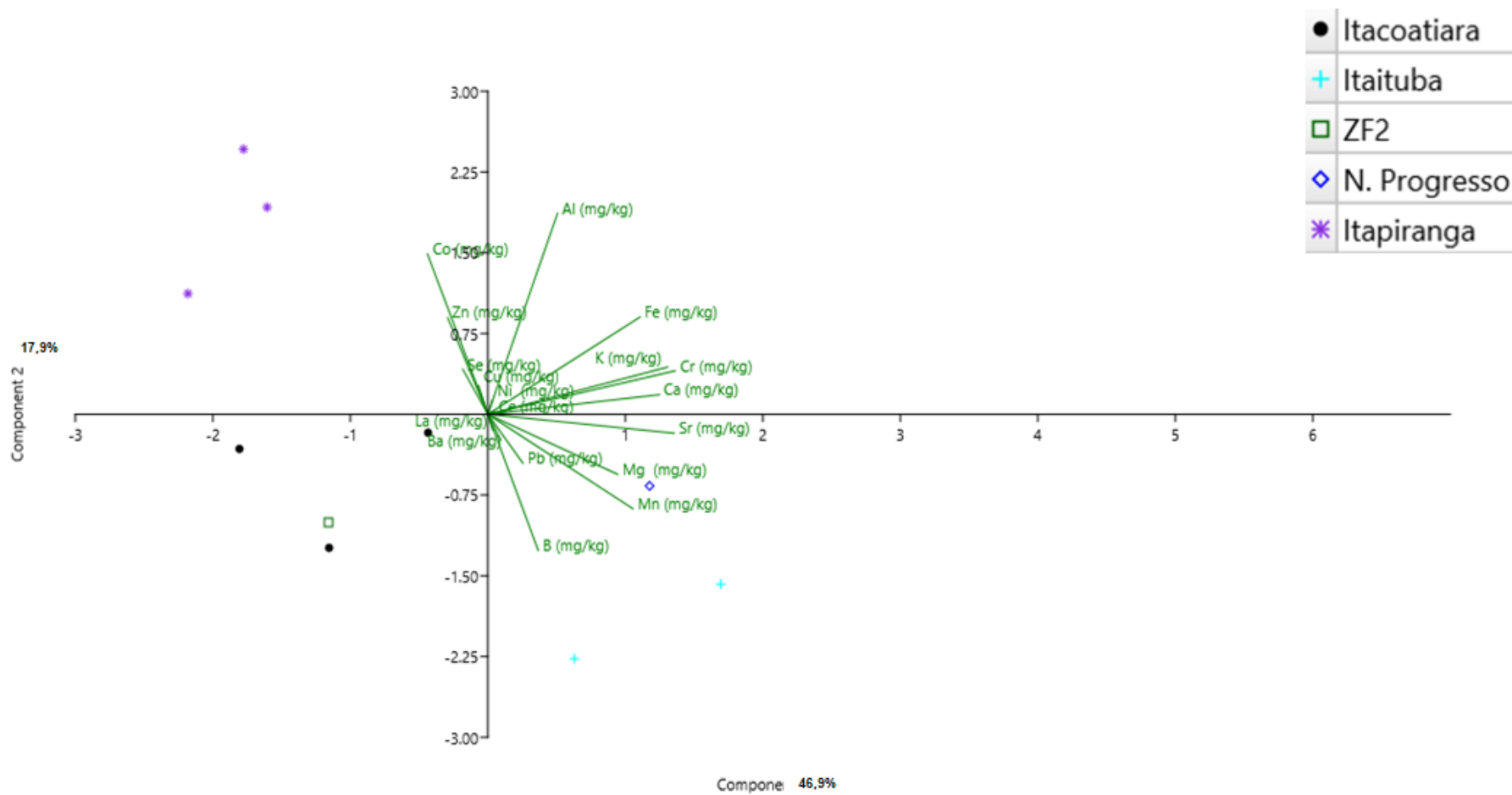


Figura 42 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

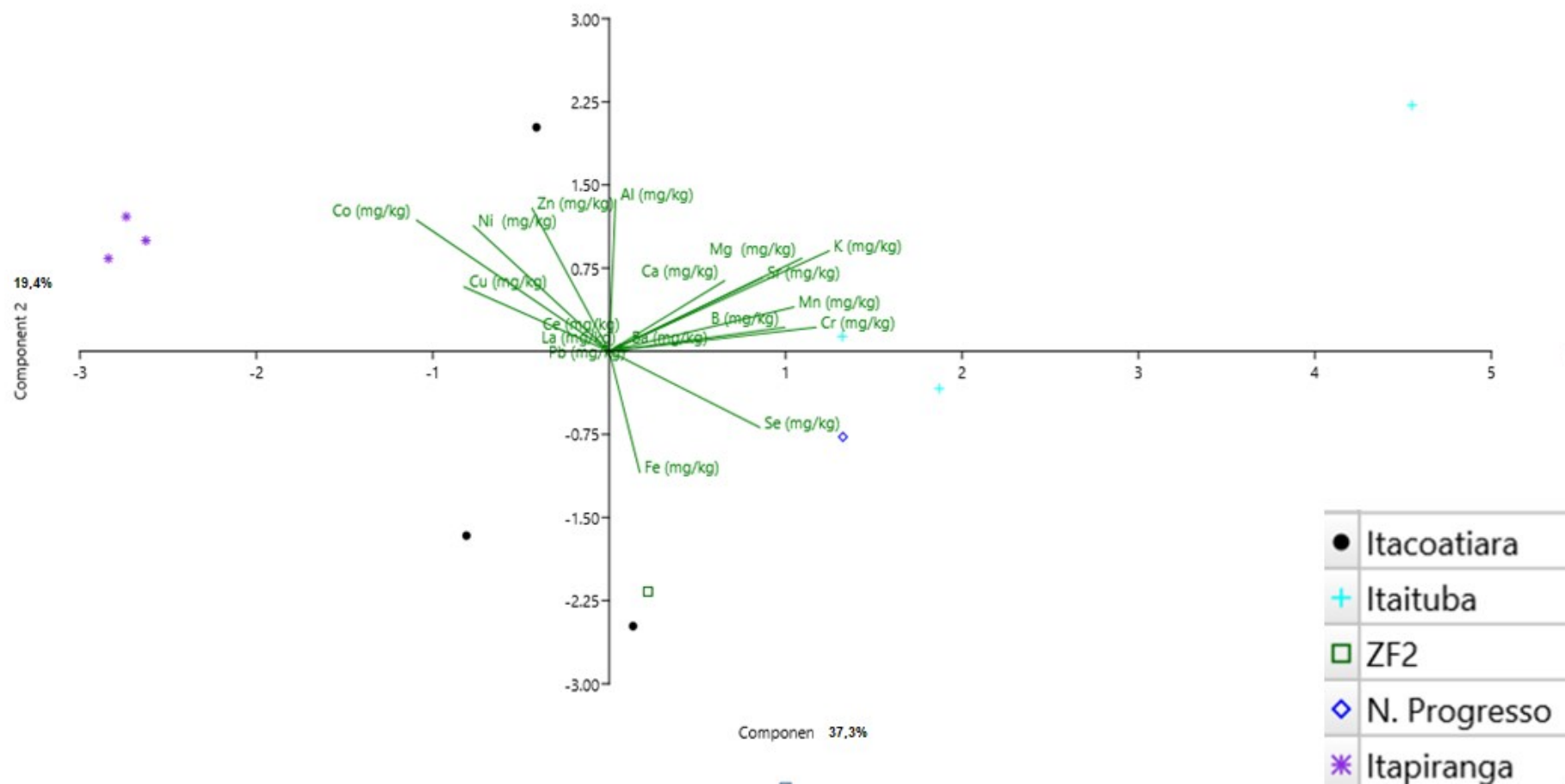


Figura 43 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

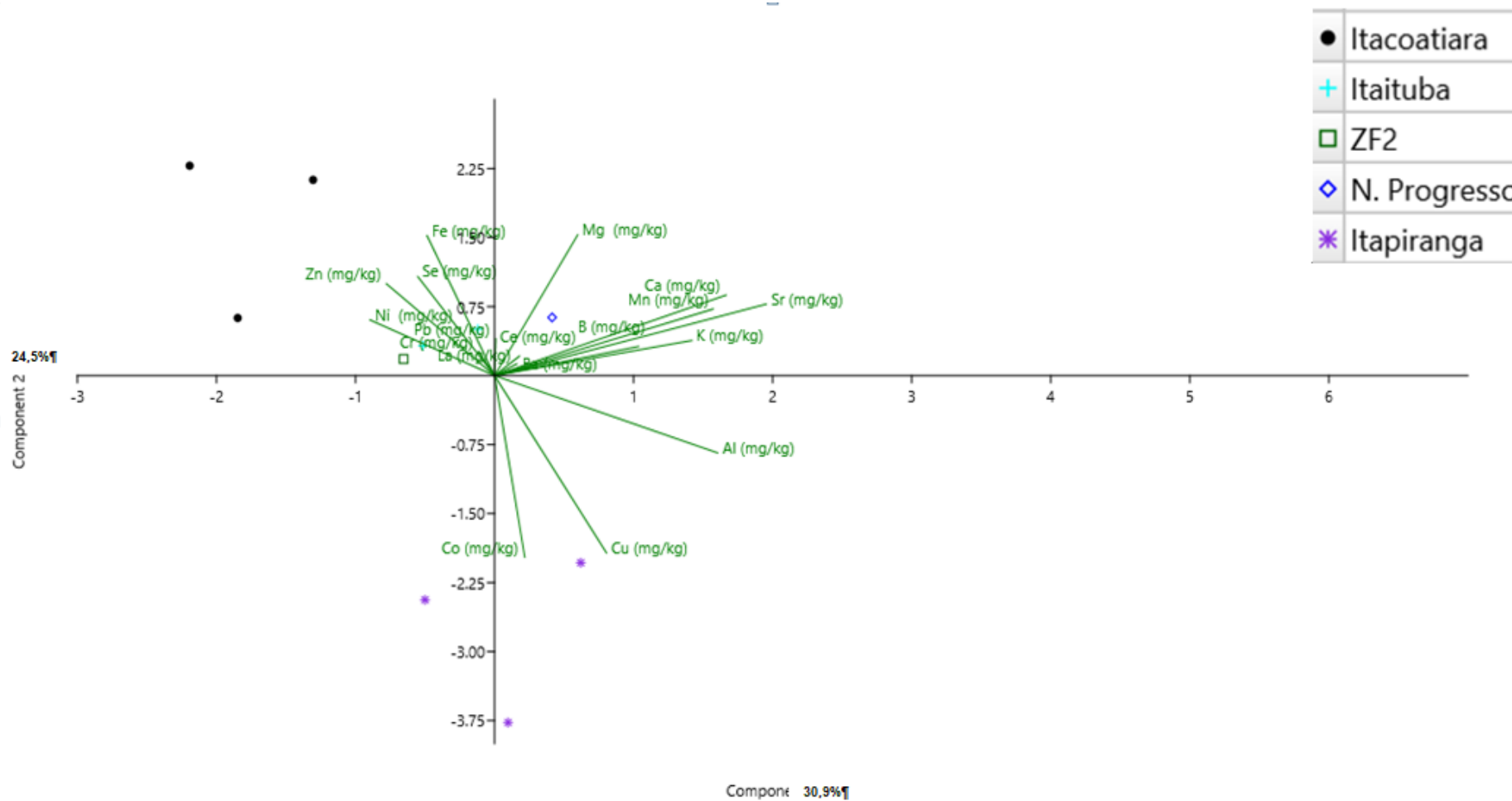


Figura 44 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

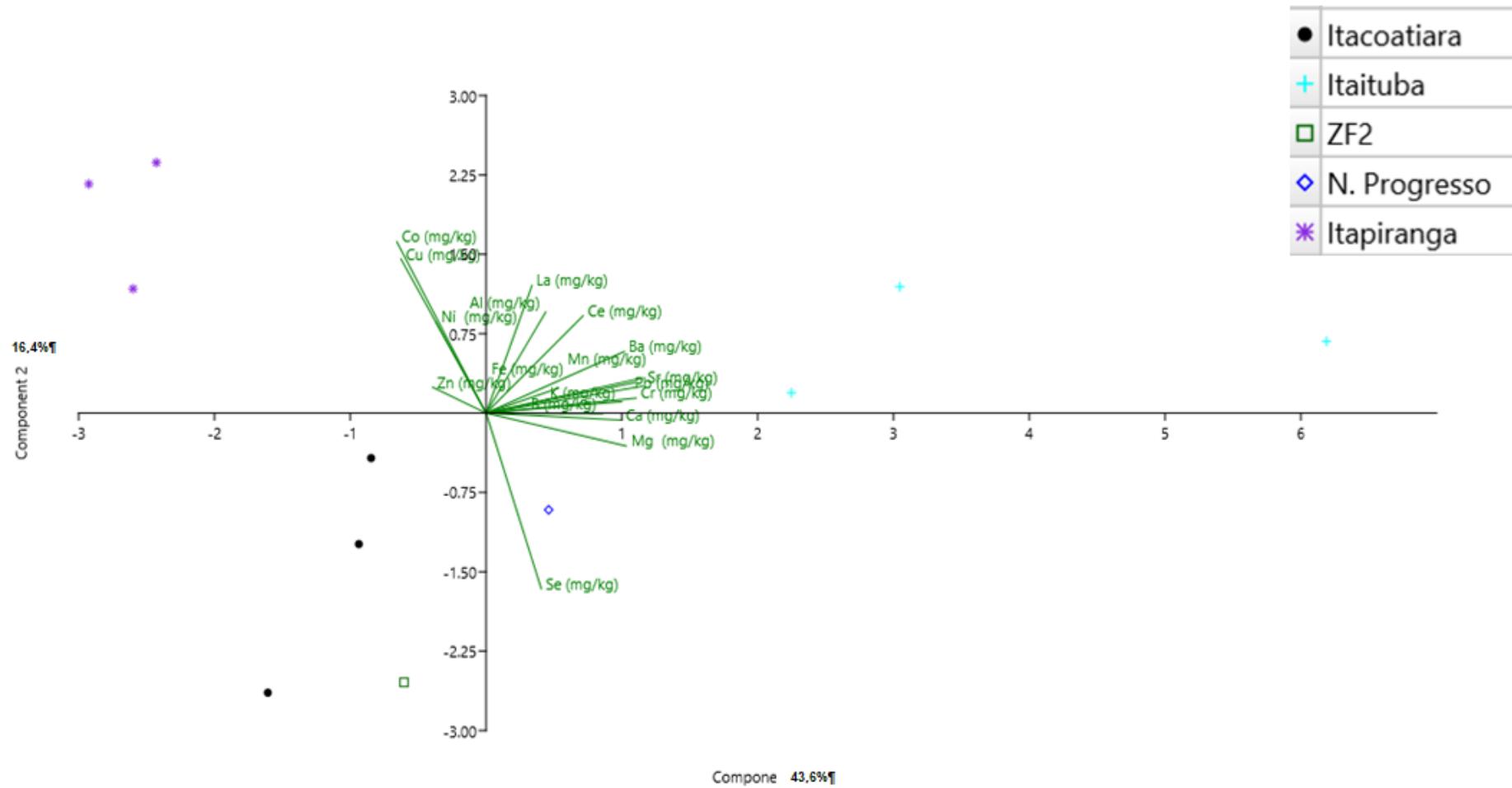


Figura 45 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de maçaranduba, de diferentes localidades

Apêndice I – Análise de componente principal dos dados de localidades diferentes por espécie (Ipê)

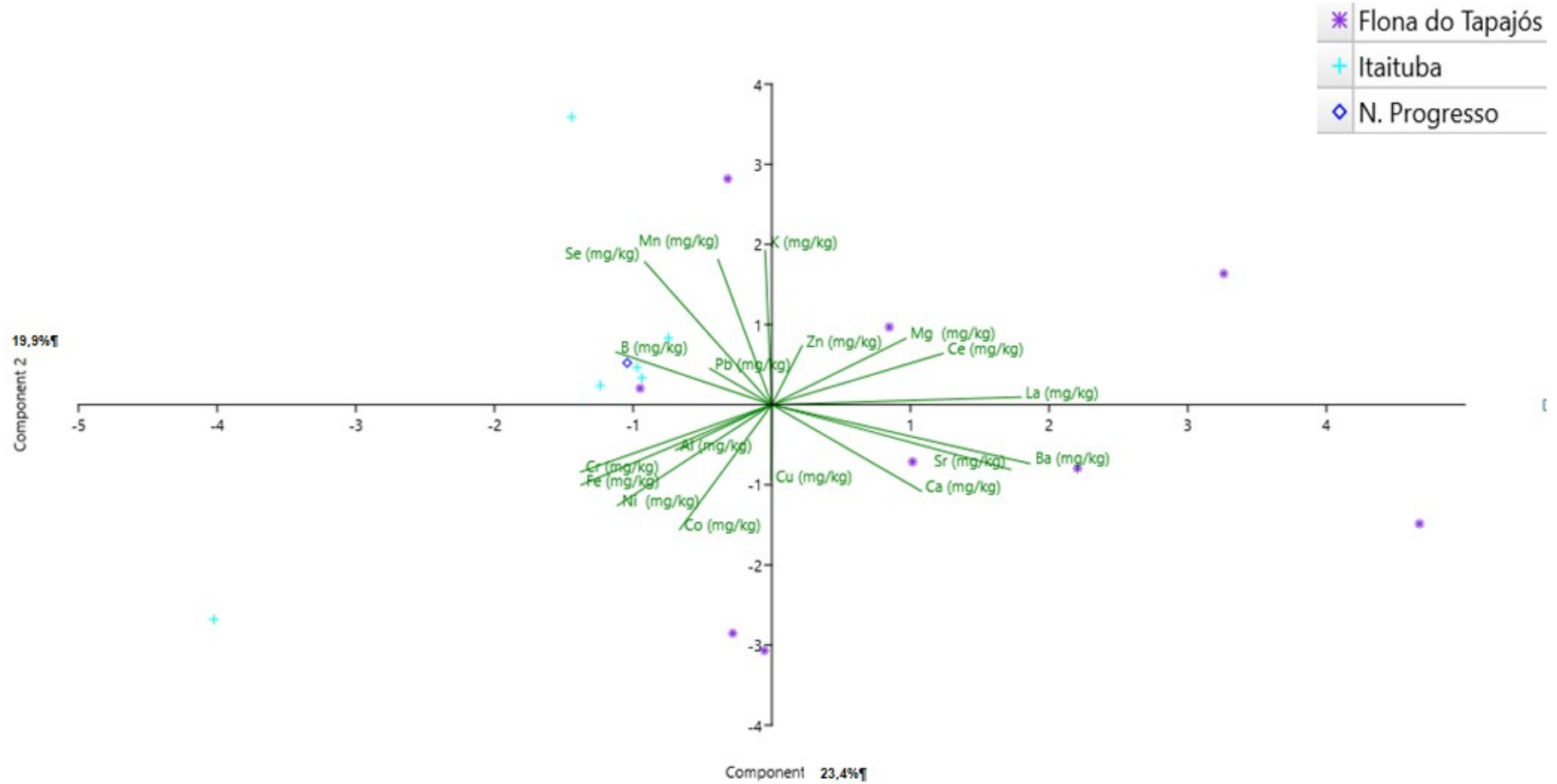


Figura 46 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 0% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades

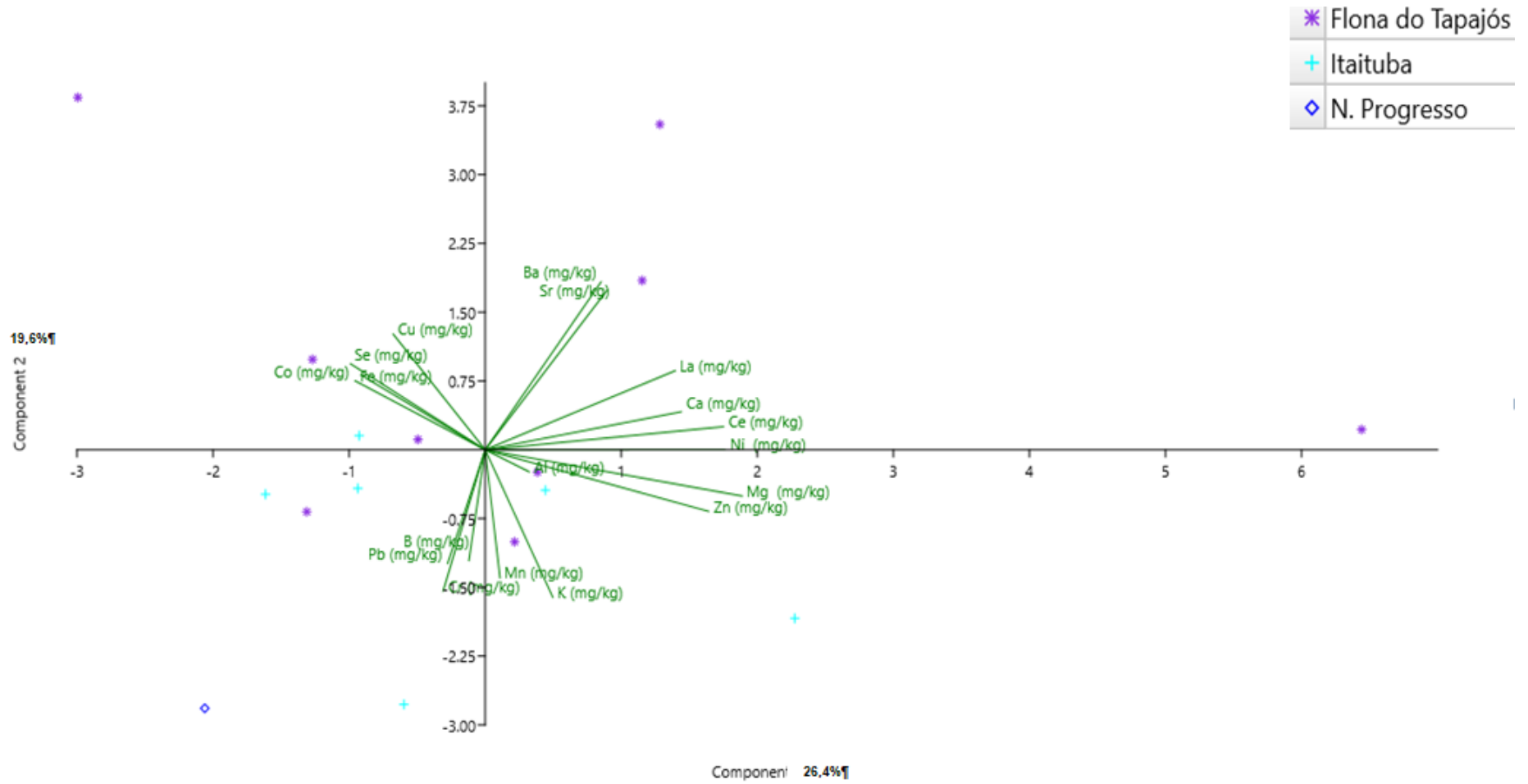


Figura 47 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 25% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades

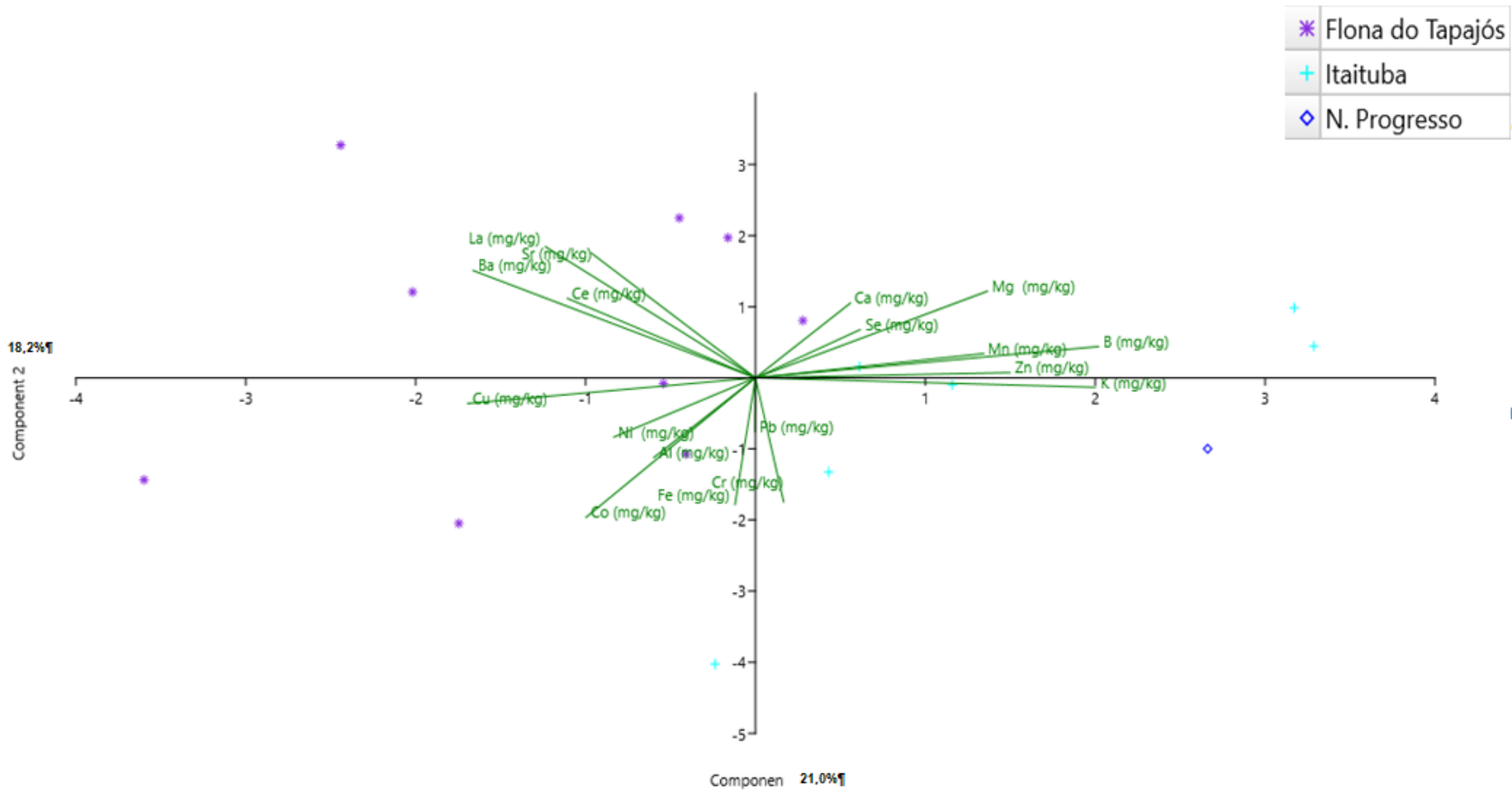


Figura 48 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 50% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades

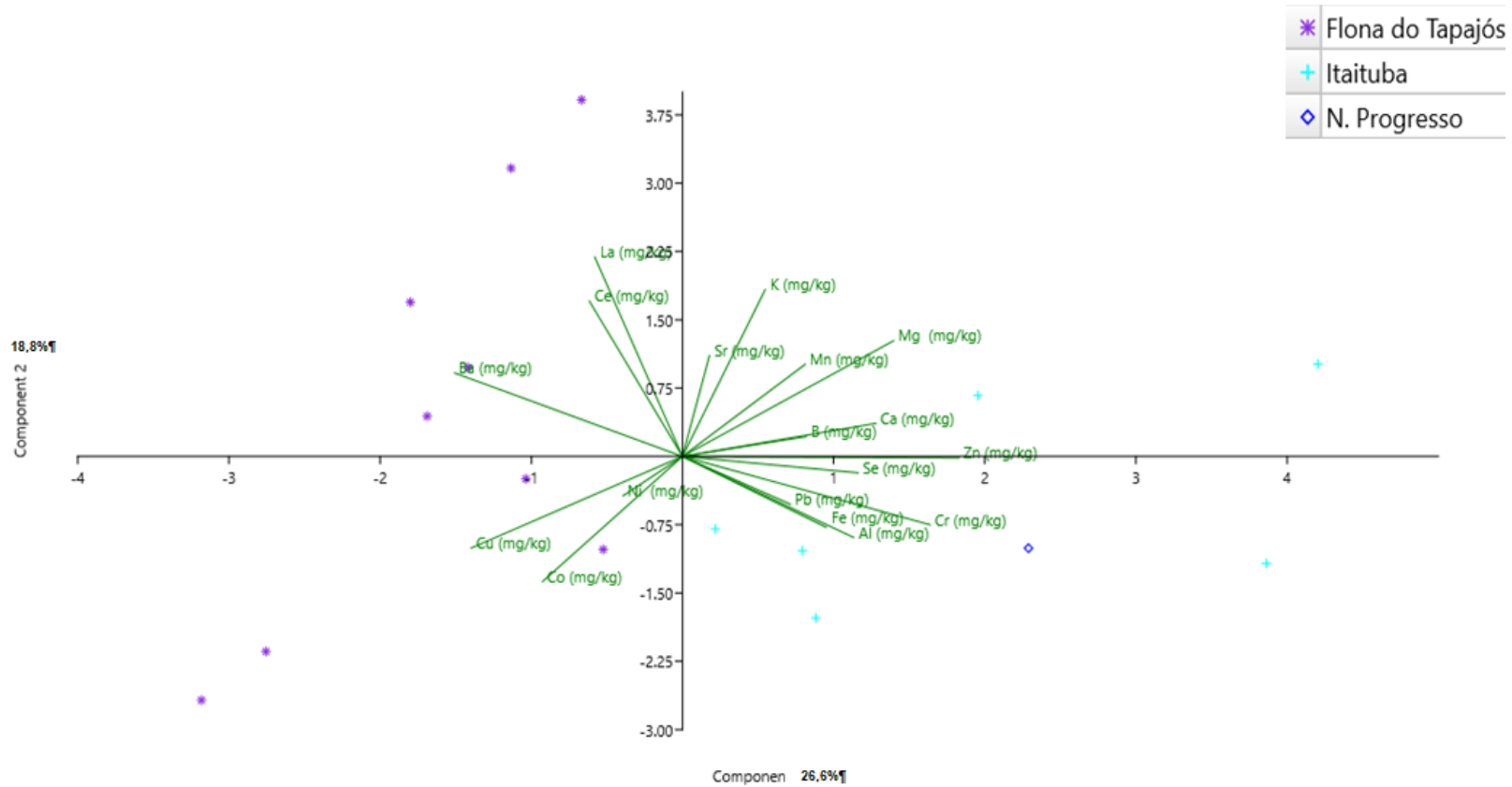


Figura 49 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 75% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades

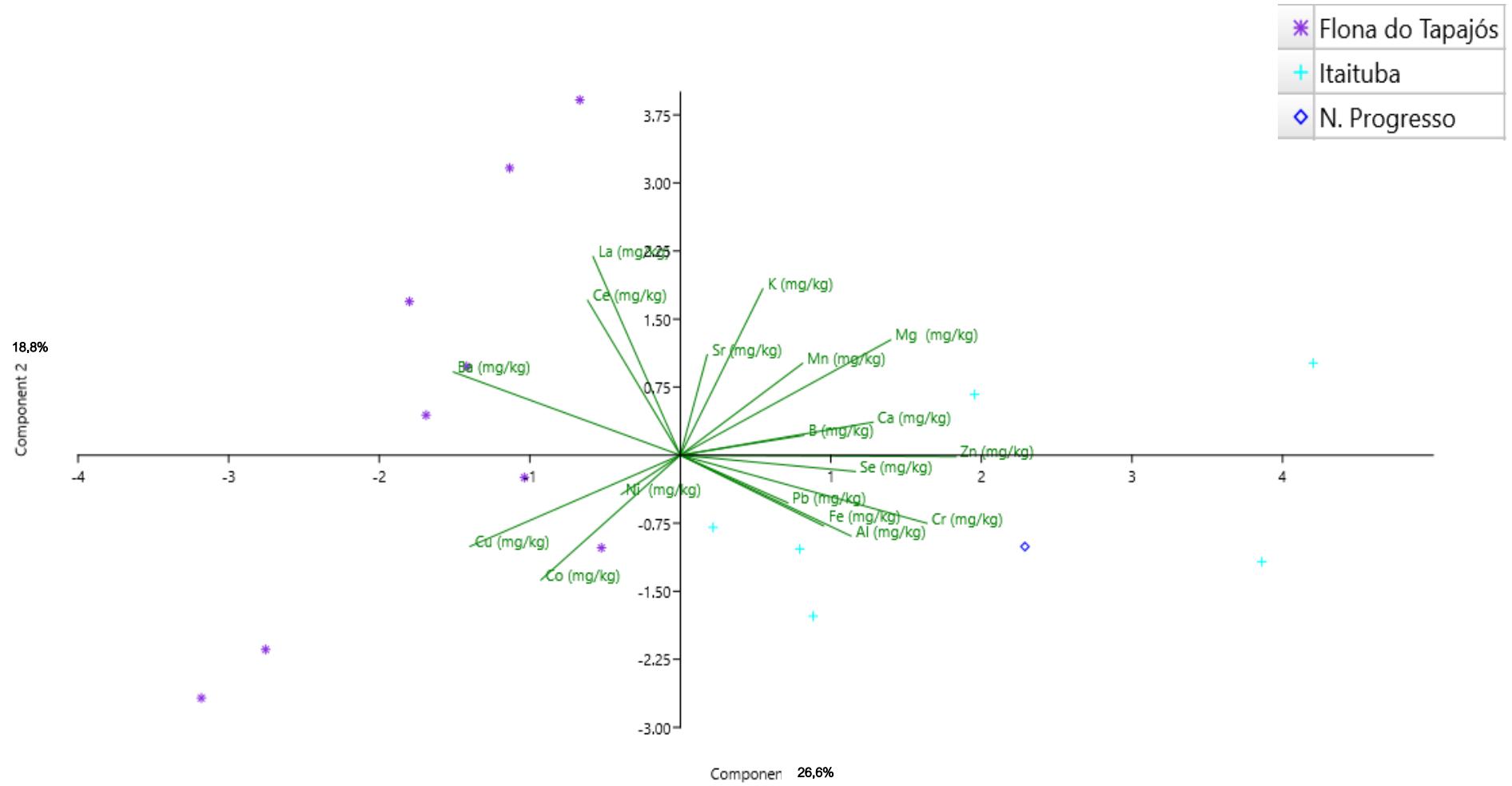


Figura 50 – Análise de Componente Principal para elementos químicos em amostras retiradas da região a 100% do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades

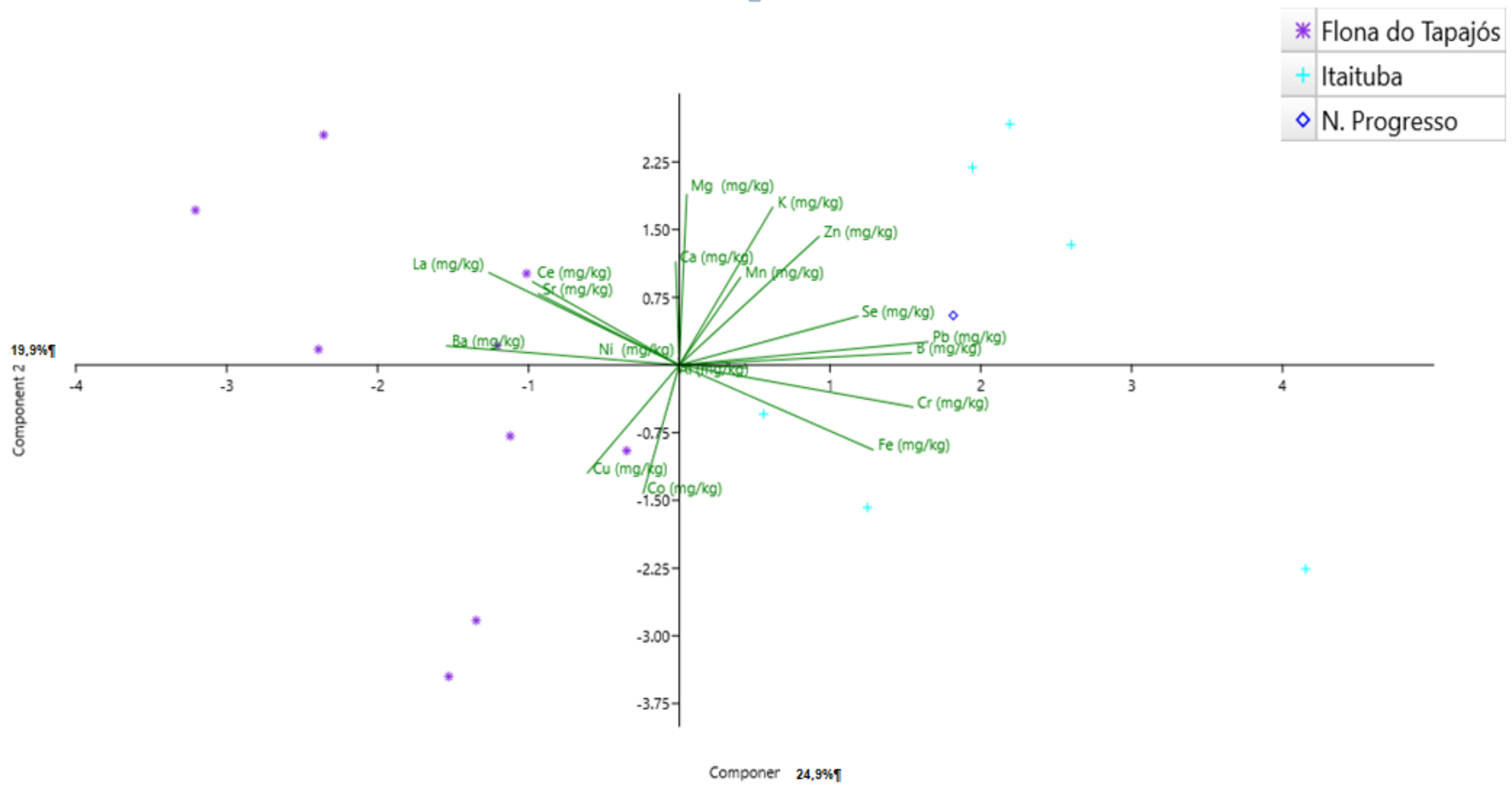


Figura 51 – PCA para elementos químicos em amostras com valores de médias das regiões do disco de madeira de ipê, de diferentes localidades