ReGeo ISSN: 2177-3246

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COMO INDICADOR DA DINÂMICA AMBIENTAL E DA APTIDÃO AGRÍCOLA EM AMBIENTE TROPICAL AMAZÔNICO

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AS INDICATORS OF ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND AGRICULTURAL SUITABILITY IN THE SOUTHWESTERN AMAZON

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DEL SUELO COMO INDICADOR DE LA DINÁMICA AMBIENTAL Y LA APTITUD AGRÍCOLA EN UN ENTORNO AMAZÓNICO TROPICAL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-092

Data de submissão: 08/07/2026 **Data de publicação:** 08/08/2026

Jociel Honorato de Jesus
Doutorando em Geografia
Instituição: Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
E-mail: jocielhonorato@gmail.com

Eliomar Pereira da Silva Filho
Doutor em Geociências e Meio Ambiente
Instituição: Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
E-mail: eliomarfilho@uol.com.br

RESUMO

Os atributos químicos do solo expressam a interação entre material de origem, relevo, drenagem, intemperismo, ciclagem de nutrientes e manejo da terra. Este estudo avaliou a heterogeneidade química de 13 amostras de solo coletadas em um transecto agrícola tropical amazônico no estado de Rondônia. Nesta revisão, as amostras foram associadas sequencialmente aos pontos P01 a P13, distribuídos entre as coordenadas 9,881366° S; 63,022240° O e 9,880286° S; 63,021148°, com distâncias acumuladas nominais de 10 a 130 m e orientação aproximada para nordeste. O objetivo foi identificar gradientes ambientais e segmentos com diferentes potenciais de uso agrícola. Foram determinados pH, acidez potencial, acidez complementar, cálcio, cálcio mais magnésio, potássio, sódio e fósforo por potenciometria, titulações ácido-base e complexométrica com EDTA, fotometria de chama e espectrofotometria. Aplicaram-se estatística descritiva, teste de Shapiro-Wilk, correlação de Pearson, análise de componentes principais, agrupamento hierárquico e perfis exploratórios ao longo da distância acumulada. O pH variou de 5,80 a 7,50, com média de 6,26, enquanto a resposta de acidez potencial variou de 3,0 a 6,5 mL de NaOH. O fósforo apresentou a maior variabilidade relativa, com absorbâncias entre 0,016 e 0,470. Houve correlação negativa forte entre pH e acidez potencial ($r = -0,875$; $p < 0,001$), além de relações significativas entre pH e acidez complementar, potássio e fósforo, e acidez complementar e fósforo. As duas primeiras componentes principais explicaram 83,2% da variância, representando um gradiente de acidez-bases e um contraste entre disponibilidade relativa de K e resposta de P. O agrupamento definiu três segmentos químicos contíguos no transecto: Zona B entre 10 e 60 m, com maiores respostas de K; Zona C entre 70 e 110 m, mais ácida, com menor K e enriquecimento localizado de P; e Zona A entre 120 e 130 m, com maior pH e menor acidez. Os resultados evidenciam heterogeneidade edáfica relevante para o manejo localizado. As coordenadas permitem interpretar a variação em uma dimensão, mas a inconsistência entre o espaçamento nominal

e as distâncias calculadas a partir das coordenadas, a ausência do datum e a geometria linear impedem, nesta etapa, a elaboração de mapas bidimensionais robustos.

Palavras-chave: Fertilidade do Solo. Pedogênese Tropical. Geoquímica Ambiental. Análise Multivariada. Geoprocessamento. Manejo Localizado.

ABSTRACT
Soil chemical attributes reflect interactions among parent material, relief, drainage, weathering, nutrient cycling, and land management. This study evaluated the chemical heterogeneity of 13 soil samples collected along a tropical Amazonian agricultural transect in Rondônia, Brazil. In this revision, the samples were sequentially linked to points P02 through P14, ranging from 9.881366° S, 63.022240° W to 9.880286° S, 63.021148° W, with nominal cumulative distances from 10 to 130 m and an approximately northeastward orientation. The objective was to identify environmental gradients and segments with contrasting agricultural potential. Soil pH, potential acidity, complementary acidity response, calcium, calcium plus magnesium, potassium, sodium, and phosphorus were determined by potentiometry, acid-base and EDTA complexometric titrations, flame photometry, and spectrophotometry. Descriptive statistics, the Shapiro-Wilk test, Pearson correlation, principal component analysis, hierarchical clustering, and exploratory profiles along cumulative distance were applied. Soil pH ranged from 5.80 to 7.50, averaging 6.26, whereas potential acidity ranged from 3.0 to 6.5 mL of NaOH. Phosphorus showed the highest relative variability, with absorbance values from 0.016 to 0.470. A strong negative correlation was found between pH and potential acidity ($r = -0.875$; $p < 0.001$), together with significant relationships involving pH, complementary acidity, potassium, and phosphorus. The first two principal components explained 83.2% of the variance and represented an acidity-base gradient and a contrast between relative K availability and P response. Cluster analysis defined three contiguous chemical segments: Zone B from 10 to 60 m, with higher K responses; Zone C from 70 to 110 m, with stronger acidity, lower K, and localized P enrichment; and Zone A from 120 to 130 m, with higher pH and lower acidity. The coordinates support one-dimensional spatial interpretation, but the mismatch between nominal spacing and coordinate-derived distances, the unknown geodetic datum, and the linear sampling geometry preclude robust two-dimensional interpolation at this stage.

Keywords: Soil Fertility. Tropical Pedogenesis. Environmental Geochemistry. Multivariate Analysis. Geoprocessing. Site-Specific Management.

RESUMEN
Los atributos químicos del suelo expresan la interacción entre el material parental, el relieve, el drenaje, la meteorización, el ciclo de nutrientes y el manejo de la tierra. Este estudio evaluó la heterogeneidad química de 13 muestras de suelo recolectadas a lo largo de un transecto agrícola tropical amazónico en el estado de Rondônia. En esta revisión, las muestras se asociaron secuencialmente con los puntos P01 a P13, distribuidos entre las coordenadas 9.881366° S; 63.022240° O y 9.880286° S; 63.021148° O, con distancias acumuladas nominales de 10 a 130 m y una orientación aproximada noreste. El objetivo fue identificar gradientes ambientales y segmentos con diferentes potenciales de uso agrícola. El pH, la acidez potencial, la acidez complementaria, el calcio, el calcio más el magnesio, el potasio, el sodio y el fósforo se determinaron mediante potenciometría, titulaciones ácido-base y complexométricas con EDTA, fotometría de llama y espectrofotometría. Se aplicaron estadísticas descriptivas, prueba de Shapiro-Wilk, correlación de Pearson, análisis de componentes principales, agrupamiento jerárquico y perfiles exploratorios a lo largo de la distancia acumulada. El pH varió de 5,80 a 7,50, con una media de 6,26, mientras que la respuesta de acidez potencial varió de 3,0 a 6,5 mL de NaOH. El fósforo mostró la mayor variabilidad relativa, con absorbancias entre 0,016 y 0,470. Hubo una fuerte correlación negativa entre el pH y la acidez potencial ($r = -0,875$; $p < 0,001$), además de relaciones significativas entre el pH y la acidez complementaria, el potasio y el fósforo, y la acidez complementaria y el fósforo.

Los dos primeros componentes principales explicaron el 83,2% de la varianza, representando un gradiente ácido-base y un contraste entre la disponibilidad relativa de K y la respuesta de P. El agrupamiento definió tres segmentos químicos contiguos en el transecto: Zona B entre 10 y 60 m, con respuestas de K más altas; La zona C, entre 70 y 110 m, es más ácida, con menor contenido de K y enriquecimiento localizado de P; y la zona A, entre 120 y 130 m, presenta un pH más elevado y menor acidez. Los resultados resaltan la heterogeneidad edáfica relevante para la gestión localizada. Las coordenadas permiten interpretar la variación en una dimensión, pero la inconsistencia entre el espaciado nominal y las distancias calculadas a partir de las coordenadas, la ausencia de un datum y la geometría lineal impiden, por el momento, la elaboración de mapas bidimensionales robustos.

Palabras clave: Fertilidad del Suelo. Pedogénesis Tropical. Geoquímica Ambiental. Análisis Multivariante. Geoprocesamiento. Gestión Localizada.

1 INTRODUÇÃO

O solo representa um sistema natural dinâmico, complexo e aberto, cuja formação resulta da interação contínua entre clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, conforme estabelecido pelos fatores clássicos da pedogênese (Jenny, 1941). Em ambientes tropicais úmidos, como aqueles predominantes na Amazônia, as elevadas temperaturas associadas aos altos índices pluviométricos intensificam os processos de intemperismo químico, promovendo a lixiviação de bases, a concentração de óxidos de ferro e alumínio e a predominância de argilominerais de baixa atividade. Como consequência, desenvolvem-se solos geralmente profundos, altamente intemperizados e com reduzida capacidade de retenção de nutrientes, características que influenciam diretamente o comportamento da acidez, da capacidade de troca catiônica (CTC), da disponibilidade de fósforo e da dinâmica dos principais cátions essenciais às plantas (Novais *et al*., 2007; Teixeira *et al*., 2017; Santos *et al*., 2018).

Na Amazônia Ocidental, a fertilidade do solo apresenta elevada variabilidade espacial em decorrência da diversidade de materiais de origem, das diferenças de relevo, das condições de drenagem, dos processos de deposição sedimentar e da intensa dinâmica da cobertura vegetal. Mesmo em pequenas escalas espaciais, essas características podem originar contrastes expressivos nos atributos químicos do solo (Quesada *et al.,* 2011).

Além dos fatores naturais, a conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas modifica significativamente o equilíbrio geoquímico do ambiente, promovendo alterações no pH, na acidez potencial, na saturação por bases e na disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo e potássio. Entretanto, em regiões de elevada pluviosidade, parte dessas modificações tende a ser temporária devido à intensa lixiviação e à limitada capacidade de retenção de nutrientes característica dos solos altamente intemperizados (Silva *et al*., 2021; Santos *et al*., 2018).

Os atributos químicos tradicionalmente empregados na avaliação da fertilidade do solo também constituem importantes indicadores dos processos pedogenéticos e da organização funcional da paisagem. O pH e a acidez potencial refletem o equilíbrio entre os processos de acidificação, lixiviação e reposição de bases trocáveis, enquanto os teores de cálcio e magnésio estão relacionados à composição mineralógica do material de origem, à ciclagem biogeoquímica e às práticas de correção da fertilidade (Teixeira *et al*).

Por sua vez, o potássio apresenta comportamento influenciado tanto pela mineralogia quanto pelo manejo agrícola, ao passo que o fósforo, devido à sua baixa mobilidade em solos tropicais, apresenta elevada variabilidade espacial em razão dos processos de adsorção em óxidos de ferro e alumínio, da interação com a matéria orgânica e dos aportes provenientes da adubação (Novais *et al*., 2007; Teixeira *et al*., 2017; Raij, 2011).

Diversos estudos desenvolvidos na Amazônia demonstram que os atributos químicos do solo apresentam padrões estruturados de distribuição espacial, refletindo a influência simultânea dos processos naturais e das intervenções antrópicas. Essa organização espacial possui implicações diretas para a definição de estratégias de manejo localizado, otimização do uso de insumos e planejamento sustentável dos sistemas agrícolas (Cerri *et al*., 2004; Lu *et al*., 2012).

Nesse contexto, a integração entre ferramentas de estatística multivariada, geoestatística e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem ampliado significativamente a capacidade de interpretar a variabilidade espacial dos atributos do solo, permitindo identificar gradientes ambientais, agrupar áreas com comportamento semelhante e delimitar zonas homogêneas de manejo (Cerri *et al*., 2004; Lu *et al*., 2012; Silva *et al*., 2023). Essas abordagens favorecem uma compreensão mais abrangente da relação entre os processos pedogenéticos, a dinâmica da paisagem e a distribuição espacial da fertilidade.

Embora os avanços metodológicos tenham ampliado a aplicação das geotecnologias na Ciência do Solo, grande parte das avaliações de fertilidade ainda permanece direcionada à interpretação pontual dos atributos químicos, desconsiderando sua relação com a paisagem e os processos ambientais que condicionam sua distribuição espacial. Essa limitação torna-se particularmente relevante na Amazônia, onde a elevada heterogeneidade ambiental exige abordagens integradas capazes de subsidiar práticas agrícolas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis. A compreensão da variabilidade espacial da fertilidade contribui não apenas para o aumento da produtividade, mas também para a conservação dos recursos edáficos, a redução das perdas de nutrientes e o planejamento territorial voltado ao uso racional das áreas já antropizadas (Quesada *et al*., 2011; Teixeira *et al.,* 2017).

Diante desse contexto, o presente estudo partiu do pressuposto de que a variabilidade dos atributos químicos do solo reflete a interação entre os processos pedogenéticos, as características da paisagem e as práticas de manejo desenvolvidas em ambiente tropical amazônico.

Assim, buscou-se avaliar a distribuição espacial dos atributos químicos do solo ao longo de um transecto amostral, discutindo sua relação com a dinâmica ambiental e o potencial agrícola da área estudada. Especificamente, foram caracterizados os valores de pH, acidez potencial, cálcio, magnésio, potássio, sódio e fósforo; comparados os diferentes pontos amostrais; investigadas as relações entre os atributos químicos; identificados padrões de similaridade entre as amostras; e estabelecidas bases para a elaboração de mapas temáticos e definição de zonas de manejo, fornecendo subsídios técnicos para práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis em áreas agrícolas da Amazônia Ocidental.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no estado de Rondônia, inserida no domínio tropical úmido da Amazônia Sul-Ocidental, ao longo de uma via de acesso rural no sentido do município de Monte Negro. O ponto inicial do transecto amostral (P01) foi definido a partir da coordenada geográfica 9,881456° S e 63,022331° O, correspondente à distância nominal de 0 m. A partir desse ponto, foram distribuídas sequencialmente 13 amostras, identificadas de P01 a P13, abrangendo coordenadas entre 9,881366° S; 63,022240° O e 9,880286° S; 63,021148° O, permitindo representar a variação espacial dos atributos analisados ao longo do percurso.

O delineamento amostral caracteriza um transecto praticamente retilíneo, orientado no sentido nordeste e implantado ao longo da rota de acesso ao município de Monte Negro, abrangendo distâncias nominais acumuladas entre 10 e 130 m.

A Figura 1 apresenta o mapa do local de coleta, com a rota de acesso, a posição do ponto inicial P01, a distribuição espacial dos pontos amostrais P01–P13, seta norte, escala gráfica e mapa de localização do setor amostrado.

Quadro 1 – Informações geoespaciais e operacionais dos pontos amostrais (P01–P13)

Elemento	Descrição
Estado	Rondônia
Contexto regional	Amazônia Sul-Ocidental, ambiente tropical úmido
Referência de acesso	Trecho ou rota rural no sentido do município de Monte Negro
Ponto inicial de referência	P01 - 9,881456° S; 63,022331° O; distância nominal 0 m
Faixa dos pontos amostrais	P02 a P14 - 9,881366° S; 63,022240° O a 9,880286° S; 63,021148° O
Configuração	Transecto praticamente linear, orientado aproximadamente para nordeste
Espaçamento nominal	10 m entre pontos; distâncias acumuladas de 10 a 130 m
Distância derivada das coordenadas	Aproximadamente 14,1 m entre pontos; conferir registros de campo
Datum geodésico	Não informado; confirmar antes da cartografia definitiva

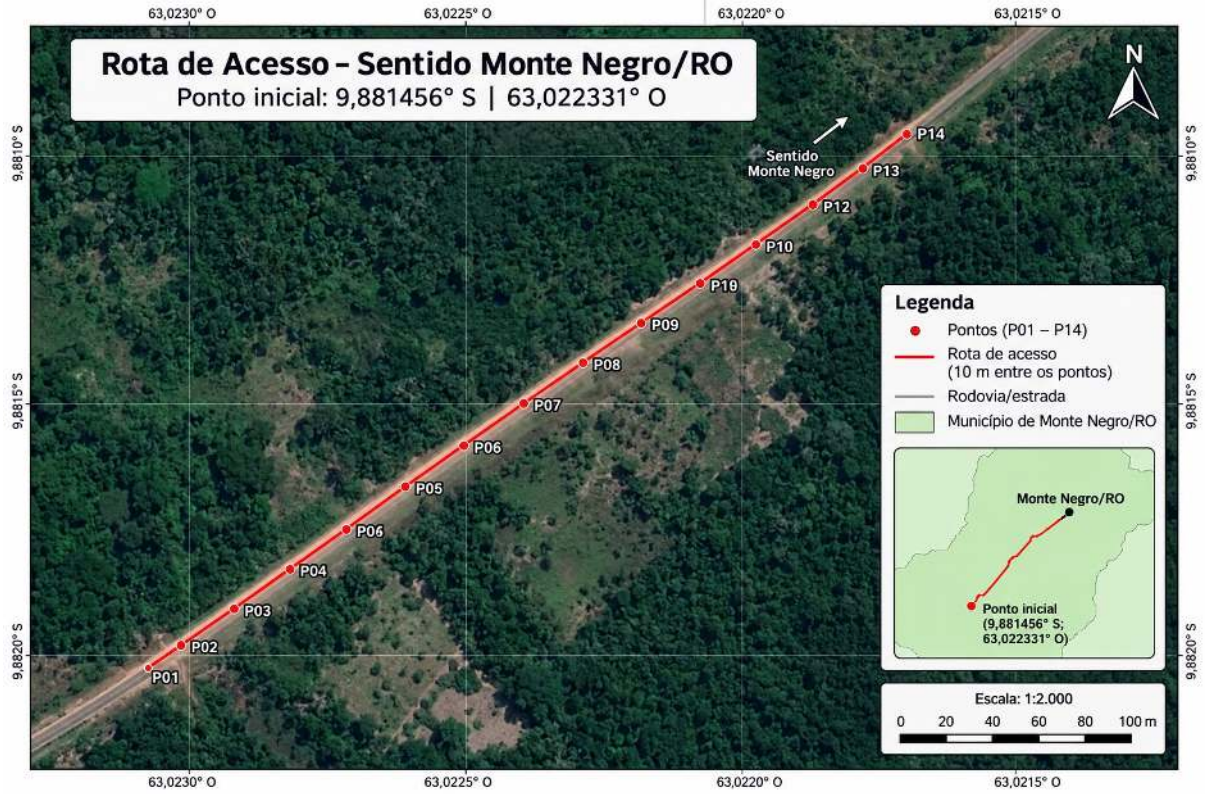
Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

Quadro 2 - Correspondência entre as amostras, os pontos geográficos e as distâncias acumuladas nominais.

Amostra	Ponto	Latitude (S)	Longitude (O)	Distância acumulada nominal (m)
1	P01	9,881366	63,022240	10
2	P02	9,881276	63,022149	20
3	P03	9,881186	63,022058	30
4	P04	9,881096	63,021967	40
5	P05	9,881006	63,021876	50
6	P06	9,880916	63,021785	60
7	P07	9,880826	63,021694	70
8	P08	9,880736	63,021603	80
9	P09	9,880646	63,021512	90
10	P10	9,880556	63,021421	100
11	P11	9,880466	63,021330	110
12	P12	9,880376	63,021239	120
13	P13	9,880286	63,021148	130

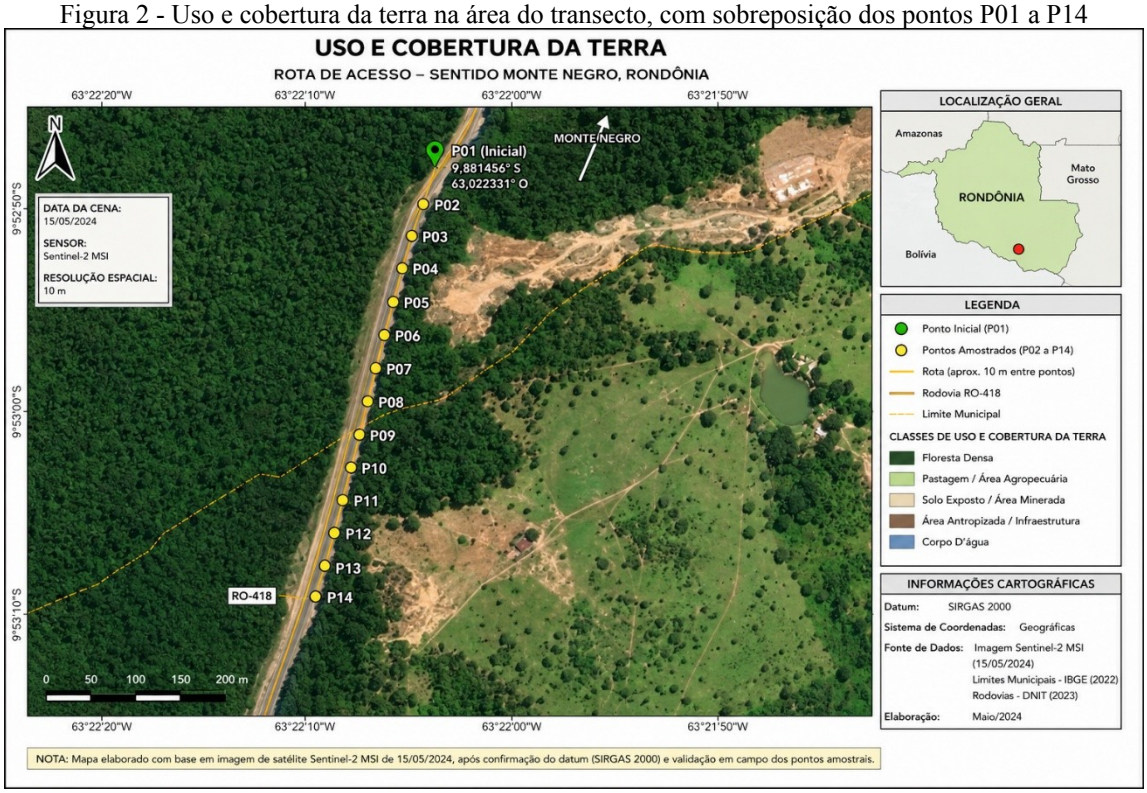
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Figura 1 - Mapa do local de coleta das amostras, com identificação do ponto inicial P01, dos pontos amostrais P01 a P13 da rota de acesso no sentido Monte Negro/RO e da posição relativa do transecto na área estudada.



Nota: a distância geodésica média calculada entre coordenadas consecutivas é de aproximadamente 14,1 m; o trecho P02-P14 mede aproximadamente 169,5 m pelas coordenadas.
Fonte: imagem e coordenadas disponibilizadas pelos autores (2026).

Figura 2 - Uso e cobertura da terra na área do transecto, com sobreposição dos pontos P01 a P14



Fonte: elaboração dos autores (2026).

A caracterização regional da área de estudo foi desenvolvida com base em informações provenientes de bases oficiais, contemplando os aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos, hidrológicos e de uso e cobertura da terra. Essa abordagem permitiu a contextualização ambiental da área investigada e forneceu subsídios para a interpretação integrada dos resultados obtidos.

A utilização das coordenadas geográficas individuais possibilitou o georreferenciamento preciso dos pontos amostrais e a avaliação da distribuição espacial dos atributos químicos ao longo do transecto. Adicionalmente, a confirmação do datum geodésico, a incorporação do histórico de manejo da área, a padronização da profundidade de coleta e a integração dos dados com o modelo digital de elevação, informações de declividade, posição topográfica e classes de uso e cobertura da terra conferiram maior robustez à interpretação dos contrastes observados entre os diferentes segmentos amostrados.

O delineamento amostral adotado, estruturado na forma de um transecto linear, permitiu caracterizar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo ao longo de um gradiente unidimensional, possibilitando a identificação de tendências e transições entre os diferentes pontos de coleta.

Embora essa estratégia não represente integralmente a heterogeneidade bidimensional de toda a área agrícola, mostrou-se adequada para a avaliação da distribuição sequencial dos atributos analisados, evidenciando padrões espaciais consistentes associados às condições ambientais e ao manejo local. Dessa forma, o delineamento empregado forneceu informações relevantes para a compreensão da dinâmica espacial dos atributos químicos do solo, constituindo uma base consistente para interpretações ambientais e para o planejamento de práticas de manejo mais adequadas às condições da área de estudo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DELINEAMENTO AMOSTRAL

Foram avaliadas 13 amostras de solo, identificadas de 1 a 13. Nesta revisão, adotou-se a correspondência sequencial Amostra 1 = P01, Amostra 2 = P02, ..., Amostra 13 = P13. Os pontos estão distribuídos em um transecto de orientação aproximada sudoeste-nordeste, com distâncias acumuladas nominais de 10, 20, ..., 130 m a partir da referência P01 (9,881456° S; 63,022331° O), conforme ilustrado no mapa de coleta.

As coordenadas foram registradas em graus decimais, porém o datum geodésico não foi informado. A comparação entre coordenadas consecutivas indica distância geodésica média

aproximada de 14,1 m, superior ao intervalo nominal de 10 m. Por isso, a posição relativa dos pontos pode ser utilizada para visualização e análise exploratória, mas o espaçamento deve ser confirmado nos registros de campo antes de análises métricas definitivas.

O método de coleta caracteriza uma amostragem sistemática em transecto linear, instalada ao longo da rota de acesso da propriedade/área rural. Em cada ponto georreferenciado foi coletada uma amostra de solo individual, posteriormente identificada e encaminhada para as análises laboratoriais de pH, acidez potencial, acidez complementar, Ca, Ca+Mg, K, Na e P. A sequência espacial dos pontos permite avaliar gradientes químicos ao longo do eixo amostral e reconhecer segmentos com comportamento semelhante.

3.2 ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises laboratoriais foram realizadas de acordo com os procedimentos de rotina recomendados para caracterização química de solos, seguindo os protocolos estabelecidos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa, amplamente adotado como referência para análises de fertilidade e caracterização de solos no Brasil (Teixeira *et al*., 2017). Os ensaios também observaram as diretrizes técnicas preconizadas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) para laboratórios de análise de solo, assegurando a padronização dos procedimentos analíticos, a rastreabilidade das determinações e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Os métodos empregados fundamentam-se em procedimentos analíticos consolidados para determinação dos atributos químicos do solo, garantindo precisão, reprodutibilidade e comparabilidade entre as amostras analisadas.

As amostras foram preparadas previamente, permitindo o contato com as soluções extratoras e a estabilização das suspensões.

Tabela 1 - Síntese dos procedimentos laboratoriais utilizados

Atributo	Volume de solo	Volume de extrator	Procedimento
pH em água	10 cm³	25 mL de água destilada	Repouso por aproximadamente 1 h e leitura em pHmetro calibrado
Acidez potencial (H+Al)	5 cm³	25 mL de solução extratora	Titulação com NaOH 0,023 mol L^{-1} e fenolftaleína; resultado disponível como volume consumido
Acidez complementar	alíquota do extrato	não informado	Titulação com indicador azul de bromotimol; resultado disponível como volume consumido
Cálcio	10 cm³	25 mL de solução extratora	Titulação complexométrica com

Atributo	Volume de solo	Volume de extrator	Procedimento
			EDTA, KOH e indicador Calcon
Cálcio + magnésio	10 cm³	25 mL de solução extratora	Titulação com EDTA, tampão pH 10 e Negro de Eriocromo T
Potássio e sódio	5 cm³	10 mL de solução extratora	Leitura por fotometria de chama após calibração com padrões
Fósforo disponível	5 cm³	5 mL de solução extratora	Desenvolvimento de cor com molibdato de amônio e leitura espectrofotométrica

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Para o fósforo, a curva-padrão foi construída com concentrações de 0,00; 0,78; 1,50; 3,00 e 4,90 e absorbâncias de 0,000; 0,105; 0,215; 0,559 e 0,709, respectivamente. O ajuste linear entre concentração e absorbância resultou em $y = 0.1534x + 0.0053$, com $R^2 = 0.968$. Como o relatório não informa a unidade dos padrões, os fatores de diluição e a conversão para volume de solo, as análises comparativas utilizaram a absorbância como resposta analítica, sem atribuição de unidade agronômica final.

Os volumes de EDTA foram tratados como respostas proporcionais ao conteúdo de Ca e de Ca+Mg. Não foi calculado o teor de Mg pela diferença entre as duas titulações, pois a concentração do EDTA não foi informada, a amostra 6 não possui resultados dessas análises e, na amostra 11, o volume atribuído ao Ca foi superior ao volume de Ca+Mg, incompatibilidade que precisa ser conferida nos registros originais.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram calculados média, mediana, desvio-padrão, mínimo, máximo e coeficiente de variação. A aderência à normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância de 5%. As associações lineares foram investigadas pela correlação de Pearson. Em razão da ausência de dados de Ca e Ca+Mg para a amostra 6, a análise multivariada principal utilizou seis variáveis completas para os 13 pontos: pH, volume de NaOH na acidez potencial, volume da acidez complementar, leitura de K, leitura de Na e absorbância de P.

Antes da análise multivariada, as variáveis foram padronizadas para média zero e desvio-padrão unitário. A análise de componentes principais foi aplicada à matriz de correlação. As amostras foram agrupadas por método hierárquico aglomerativo, distância euclidiana e ligação de Ward. A partição em três grupos foi adotada por sua coerência ambiental e por apresentar coeficiente de silhueta de 0.494. As zonas foram interpretadas como: A - maior potencial químico, com pH elevado e baixa acidez; B -

condição intermediária e maiores respostas de K; e C - maior restrição por acidez e menor K, com enriquecimento localizado de P.

3.4 GEORREFERENCIAMENTO E ANÁLISE ESPACIAL AO LONGO DO TRANSECTO

As coordenadas geográficas dos pontos amostrais P01 a P13 foram organizadas em uma base cartográfica em graus decimais e processadas no software QGIS, possibilitando o georreferenciamento e a espacialização das unidades amostrais. O mapa da área de estudo foi elaborado a partir dessas informações, permitindo a visualização da rota de acesso, da disposição linear dos pontos de coleta e de sua distribuição espacial no sentido do município de Monte Negro, Rondônia.

Para garantir a compatibilidade com as bases cartográficas oficiais e maior precisão nas análises espaciais, os dados foram referenciados ao sistema geodésico SIRGAS 2000 e projetados no sistema de coordenadas UTM, zona 20S, possibilitando a realização de cálculos métricos, análises espaciais e integração com demais informações geográficas da área de estudo.

Nesta versão, a geometria foi utilizada para representar a direção do transecto e a ordem espacial das amostras. As distâncias acumuladas fornecidas em campo foram mantidas como eixo principal dos perfis químicos, sendo identificadas como distâncias nominais. Paralelamente, foi realizada conferência geométrica das coordenadas, que indicou aproximadamente 14,1 m por intervalo e 169,5 m entre P02 e P14, em contraste com os 10 m por intervalo e 120 m entre o primeiro e o último ponto amostral registrados na tabela de campo.

Em virtude da disposição linear e do delineamento sistemático dos 13 pontos amostrais, a análise espacial foi conduzida por meio de perfis unidimensionais dos atributos químicos em função da distância acumulada ao longo do transecto. Essa abordagem possibilitou a identificação das variações espaciais entre pontos consecutivos, bem como a delimitação de zonas com comportamentos geoquímicos distintos ao longo do gradiente amostral. O delineamento adotado mostrou-se adequado para a avaliação da distribuição sequencial dos atributos do solo, permitindo uma interpretação consistente da variabilidade espacial observada.

A análise da dependência espacial foi complementada por meio da avaliação descritiva do comportamento dos atributos ao longo do transecto, possibilitando a identificação de tendências e padrões de continuidade espacial entre as amostras. Considerando a configuração linear do delineamento amostral, a interpretação concentrou-se na variabilidade espacial unidimensional, estratégia compatível com os objetivos do estudo e suficiente para caracterizar a dinâmica dos atributos químicos ao longo do gradiente investigado. Dessa forma, os procedimentos adotados proporcionaram

resultados consistentes e representativos da distribuição espacial dos atributos avaliados na área de estudo.

Os produtos espaciais mínimos desta versão incluem: esquema de localização relativa dos pontos; tabela de coordenadas e correspondência amostral; perfis de pH, acidez potencial, acidez complementar, Ca, Ca+Mg, K, Na e P ao longo da distância nominal; e representação da sequência das zonas químicas. Em etapa posterior, após a ampliação da malha, poderão ser elaborados mapas de atributos, relevo, uso da terra, grupos de cluster e escores das componentes principais, sempre acompanhados de validação cruzada e declaração de incerteza.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

Os atributos apresentaram amplitudes distintas de variação. O pH variou de 5,80 a 7,50, com média de 6,26 e coeficiente de variação de 8,6%. As amostras 12 e 13 destacaram-se pelos valores mais elevados, enquanto as amostras 7 e 9 apresentaram as menores leituras. A resposta de acidez potencial variou de 3,0 a 6,5 mL de NaOH, com média de 5,44 mL e relação inversa com o pH. Os menores consumos de titulante ocorreram nas amostras 12 e 13, e os maiores nas amostras 8, 2 e 7.

As respostas de Ca e Ca+Mg apresentaram médias de 4,33 e 5,25 mL de EDTA, respectivamente, considerando 12 amostras. Os maiores volumes ocorreram nas amostras 12 e 13. Para K, os valores variaram de 12,7 a 30,7, com maiores respostas nas amostras 2, 4 e 6. O Na variou de 1,3 a 3,5, destacando-se as amostras 12, 2 e 13. A absorbância de P apresentou o maior coeficiente de variação, 120,1%, devido principalmente à amostra 7, seguida pelas amostras 10, 11, 9 e 8.

Tabela 2 - Estatística descritiva das respostas químicas. As unidades finais de K e Na e os fatores de conversão das titulações devem ser confirmados.

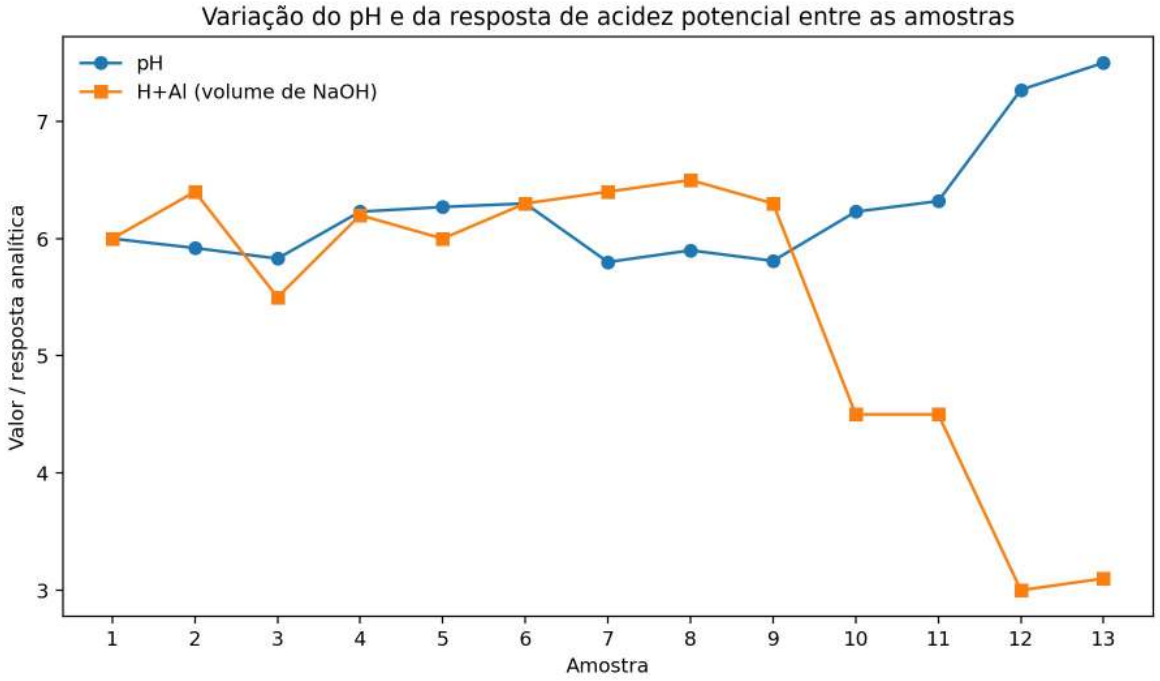
Atributo	n	Média	Mediana	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
pH	13	6.26	6.23	0.54	5.80	7.50	8.60
H+Al (mL NaOH)	13	5.44	6.00	1.25	3.00	6.50	23.05
Acidez complementar (mL)	13	0.78	0.70	0.49	0.00	1.60	62.87
Ca (mL EDTA)	12	4.33	3.80	1.25	2.80	6.60	28.80
Ca+Mg (mL EDTA)	12	5.25	5.10	1.01	3.90	7.30	19.26
K (leitura instrumental)	13	20.76	18.30	6.49	12.70	30.70	31.24

Atributo	n	Média	Mediana	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
Na (leitura instrumental)	13	2.15	1.90	0.70	1.30	3.50	32.64
P (absorbância)	13	0.116	0.035	0.140	0.016	0.470	120.057

Fonte: elaboração dos autores (2026).

O teste de Shapiro-Wilk indicou distribuição não normal para pH (p = 0,003), acidez potencial (p = 0,004), K (p = 0,038), Na (p = 0,049) e P (p = 0,002). A acidez complementar, o Ca e o Ca+Mg não rejeitaram a normalidade ao nível de 5%. Considerando o pequeno tamanho amostral, as correlações e a PCA devem ser interpretadas como análises exploratórias e, na versão final, podem ser acompanhadas por correlações de Spearman e técnicas de reamostragem.

Figura 3 - Variação do pH e da resposta de acidez potencial entre as amostras



Fonte: elaboração dos autores (2026).

4.2 RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS

A correlação mais forte ocorreu entre pH e acidez potencial (r = -0,875; p < 0,001), confirmando que o aumento da reação do solo esteve associado à menor necessidade de titulante para neutralização da acidez. O pH também apresentou correlação negativa com a acidez complementar (r = -0,707; p = 0,007). A resposta de P correlacionou-se negativamente com K (r = -0,658; p = 0,015) e positivamente com a acidez complementar (r = 0,615; p = 0,025). A acidez complementar apresentou correlação negativa com Na (r = -0,634; p = 0,020).

Essas relações sugerem a existência de dois eixos principais de diferenciação: um gradiente de acidez e saturação relativa por bases, e outro associado à distribuição contrastante de K e P. A correlação não permite definir causalidade. A confirmação dos mecanismos exige informações sobre uso da terra, adubação, textura, matéria orgânica, mineralogia e posição topográfica.

Tabela 3 - Correlações lineares significativas entre as respostas químicas ($p \leq 0,05$).

Variável 1	Variável 2	r de Pearson	p
pH	H+Al (mL NaOH)	-0.875	0.0001
pH	Acidez complementar (mL)	-0.707	0.0069
H+Al (mL NaOH)	Acidez complementar (mL)	0.583	0.0366
Acidez complementar (mL)	Na (leitura instrumental)	-0.634	0.0199
Acidez complementar (mL)	P (absorbância)	0.615	0.0254
K (leitura instrumental)	P (absorbância)	-0.658	0.0146

Fonte: elaboração dos autores (2026).

4.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

As duas primeiras componentes principais explicaram 83.2% da variância total. A CP1 respondeu por 52.3% e foi definida por cargas positivas de pH e Na e negativas de acidez potencial e acidez complementar. Assim, valores positivos da CP1 representam amostras com maior pH e menor acidez, enquanto valores negativos indicam maior limitação ácida. A CP2 explicou 30.9% e contrastou K, com carga positiva elevada, e P, com carga negativa.

As amostras 12 e 13 ocuparam a extremidade positiva da CP1, distinguindo-se por pH elevado e baixa resposta de acidez. As amostras 1 a 6 concentraram-se no setor associado ao K, enquanto as amostras 7 a 11 se aproximaram do vetor de P e da acidez complementar. Essa organização indica que a heterogeneidade não se resume a um gradiente único de fertilidade: existem áreas relativamente mais básicas, áreas com maior resposta de K e áreas mais ácidas com enriquecimento localizado de P.

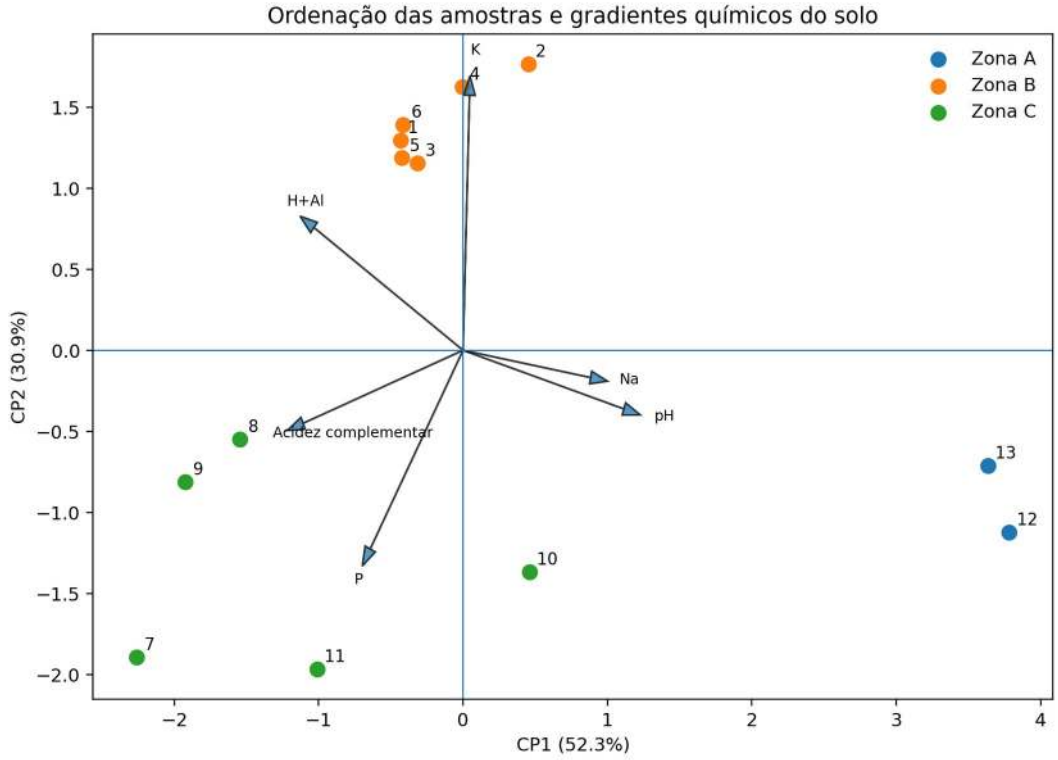
Tabela 4 - Cargas das variáveis nas duas primeiras componentes principais.

Variável	Carga CP1	Carga CP2
pH	0.512	-0.166
H+Al (mL NaOH)	-0.470	0.345
Acidez complementar (mL)	-0.508	-0.206

Variável	Carga CP1	Carga CP2
K (leitura instrumental)	0.020	0.705
Na (leitura instrumental)	0.417	-0.079
P (absorbância)	-0.291	-0.555

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 5 - Análise de componentes principais das respostas químicas padronizadas. Os números identificam as amostras e as setas representam as cargas das variáveis.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

4.4 AGRUPAMENTO E ZONAS QUÍMICAS

O agrupamento hierárquico separou três conjuntos coerentes com os gradientes observados na PCA. A Zona A reuniu as amostras 12 e 13, caracterizadas por pH médio de 7,39, baixa acidez potencial e ausência de resposta na titulação complementar. A Zona B reuniu as amostras 1 a 6, com pH médio de 6,09, maior resposta média de K e acidez potencial relativamente elevada. A Zona C reuniu as amostras 7 a 11, com pH médio de 6,01, maior acidez complementar, menor K e absorbância média de P aproximadamente dez vezes superior à da Zona B.

A designação “alta”, “intermediária” e “baixa fertilidade” deve ser empregada com cautela, pois os dados ainda não foram convertidos para unidades agronômicas e não incluem matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, alumínio trocável ou textura. Assim, a Zona A

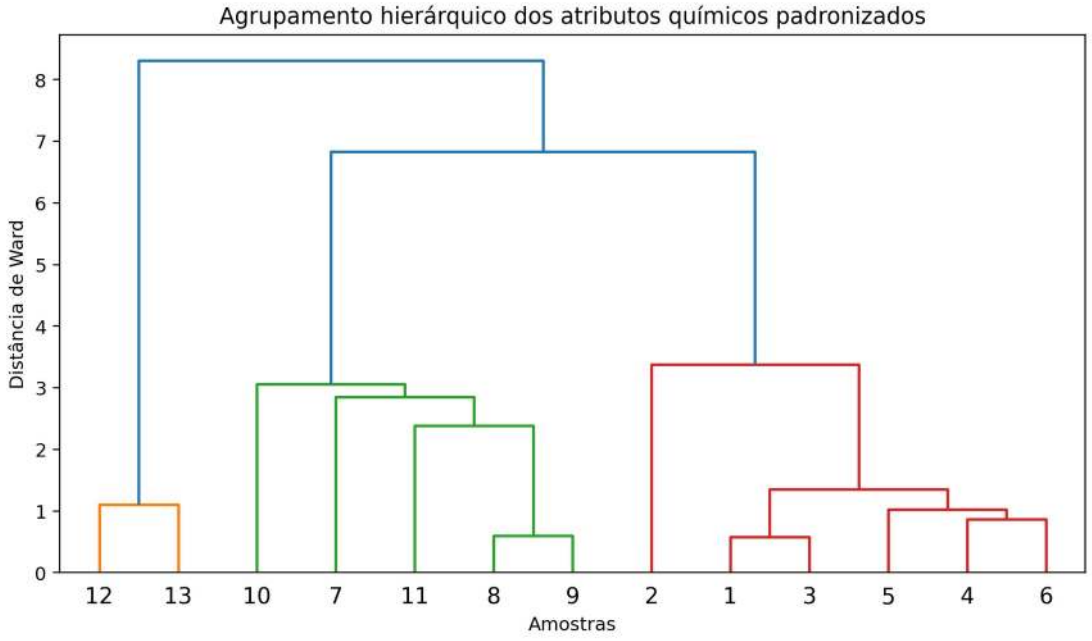
representa maior potencial químico relativo; a Zona B, condição intermediária com predomínio de K; e a Zona C, condição mais restritiva pela acidez, mas com enriquecimento relativo de P.

Tabela 5 - Síntese das zonas químicas identificadas pela análise de agrupamento.

Zona	Amostras	Características dominantes	Potencial relativo	Implicação preliminar
A	12 e 13	pH alto; baixa acidez; maiores respostas de Ca e Ca+Mg	Maior	Confirmar origem: calagem, cinzas, material de origem ou posição de paisagem
B	1 a 6	pH levemente ácido; maior K; P baixo; acidez potencial alta	Intermediário	Manejo equilibrado, com atenção à acidez e à manutenção de K
C	7 a 11	maior acidez complementar; menor K; P relativamente elevado	Baixo a intermediário	Correção localizada da acidez e diagnóstico da origem do P

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Figura 6 - Dendrograma do agrupamento hierárquico pelo método de Ward.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

4.5 ORGANIZAÇÃO ESPACIAL AO LONGO DO TRANSECTO

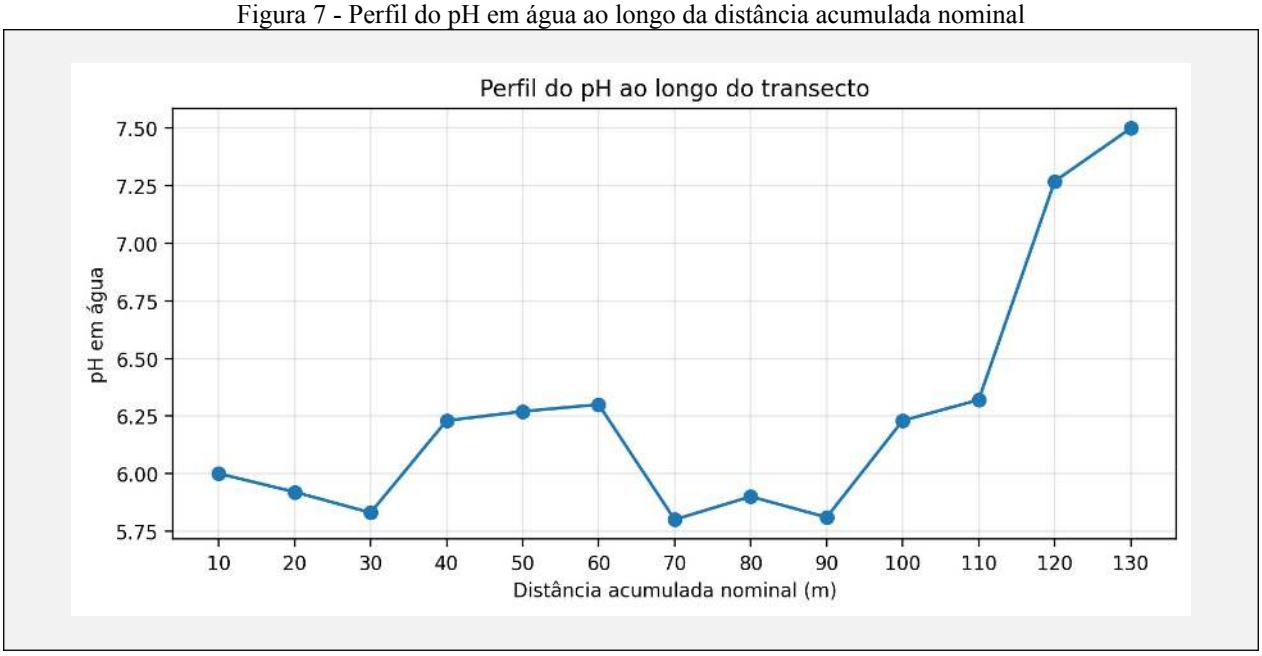
A incorporação das coordenadas permitiu ordenar espacialmente as 13 amostras e reconhecer três segmentos químicos contíguos. A Zona B ocupa o trecho inicial do transecto, entre 10 e 60 m,

correspondendo às amostras 1 a 6 e aos pontos P02 a P07. Nesse segmento predominam as maiores respostas de K, pH levemente ácido e baixa resposta de P.

A Zona C ocupa o trecho intermediário, entre 70 e 110 m, reunindo as amostras 7 a 11 e os pontos P08 a P12; apresenta maior acidez complementar, menor K e os maiores valores de P, com pico na amostra 7/P08, a 70 m. A Zona A ocorre no extremo final, entre 120 e 130 m, nos pontos P13 e P14, associados às amostras 12 e 13, e caracteriza-se por pH mais elevado, menor acidez potencial e maiores respostas relativas de Ca e Ca+Mg.

As mudanças mais evidentes ocorrem nas transições de 60 para 70 m e de 110 para 120 m. Essa organização demonstra que os grupos estatísticos também possuem continuidade ao longo do transecto, mas não permite extrapolá-los lateralmente para toda a área.

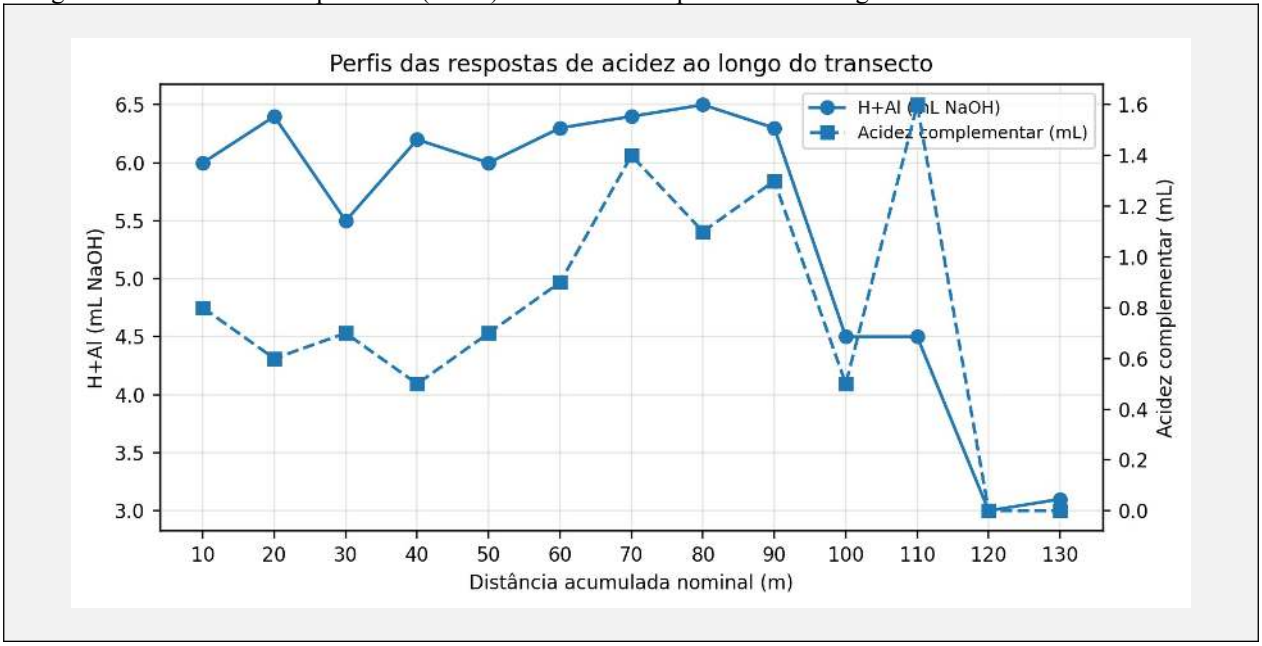
Figura 7 - Perfil do pH em água ao longo da distância acumulada nominal



Fonte: elaboração dos autores (2026).

A Figura 7 demonstra que o pH apresentou baixa variação entre 10 e 110 m, permanecendo entre 5,8 e 6,3, caracterizando solos moderadamente ácidos. A partir de 120 m, observa-se um aumento expressivo do pH, alcançando valores próximos de 7,5 no ponto final do transecto. Esse comportamento indica uma redução da acidez e maior disponibilidade de bases trocáveis nos segmentos finais da área amostrada. A distribuição espacial observada sugere influência de variações nas características do solo e, possivelmente, das práticas de manejo ao longo do transecto.

Figura 8 - Perfis da acidez potencial (H+Al) e da acidez complementar ao longo da distância acumulada nominal



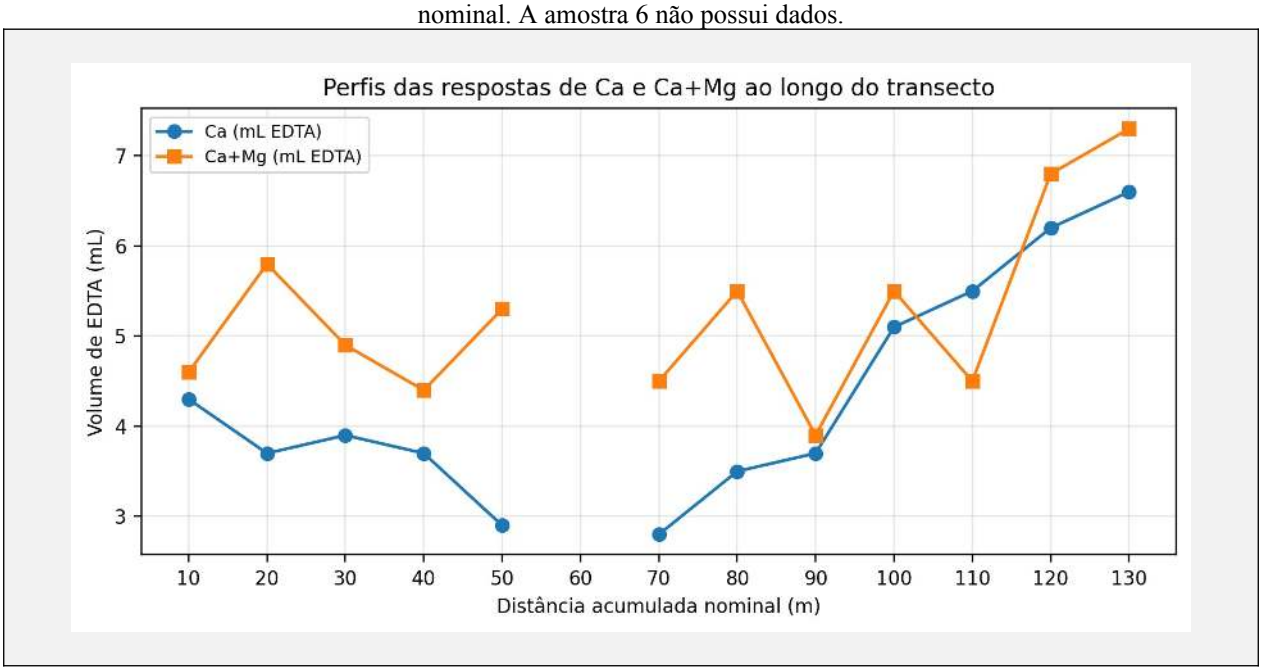
Fonte: elaboração dos autores (2026).

A Figura 8 evidencia uma variação espacial bem definida da acidez potencial (H+Al) e da acidez complementar ao longo do transecto amostral. Entre 10 e 90 m, os valores de H+Al permaneceram relativamente elevados e pouco variáveis, oscilando entre aproximadamente 5,5 e 6,5 mL de NaOH, indicando maior presença de íons H^+ e Al^{3+} adsorvidos ao complexo de troca e, consequentemente, maior potencial de acidez do solo nesse segmento.

Nesse mesmo intervalo, a acidez complementar apresentou incremento gradual, com maiores valores entre 70 e 90 m, sugerindo uma distribuição relativamente homogênea da acidez ativa ao longo da maior parte do transecto. A partir dos 100 m, observou-se redução acentuada dos valores de H+Al, atingindo os menores registros entre 120 e 130 m, acompanhada pela diminuição da acidez complementar. Esse comportamento indica uma transição para solos com menor potencial de acidificação, possivelmente associada ao aumento da saturação por bases ou a diferenças nas condições pedogenéticas e de manejo.

A correspondência entre os perfis de ambas as variáveis demonstra que a distribuição da acidez no transecto ocorre de forma espacialmente organizada, evidenciando a influência conjunta dos processos de intemperismo, da dinâmica dos cátions trocáveis e das características locais do ambiente sobre a variabilidade química do solo.

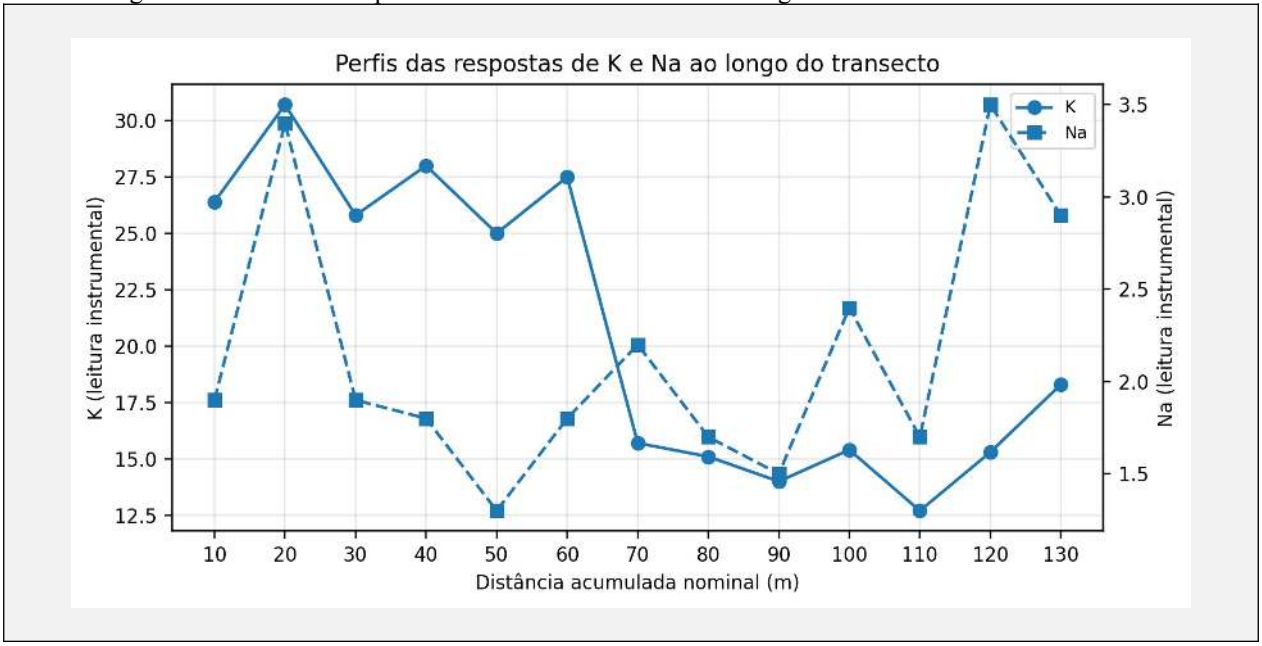
Figura 9 - Perfis das respostas de Ca e Ca+Mg, expressas como volumes de EDTA, ao longo da distância acumulada nominal. A amostra 6 não possui dados.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Os resultados descritos na figura 9 evidencia variação espacial nos teores de Ca e Ca+Mg ao longo do transecto, com menores valores entre 50 e 90 m e aumento expressivo nos pontos finais. O cálcio apresentou crescimento contínuo a partir de 90 m, atingindo o maior valor em 130 m. Comportamento semelhante foi observado para Ca+Mg, indicando maior disponibilidade de bases trocáveis nesse segmento da área. Esses resultados sugerem redução da acidez e melhoria das condições de fertilidade do solo, refletindo diferenças nas características pedológicas e, possivelmente, na influência do manejo ao longo do transecto.

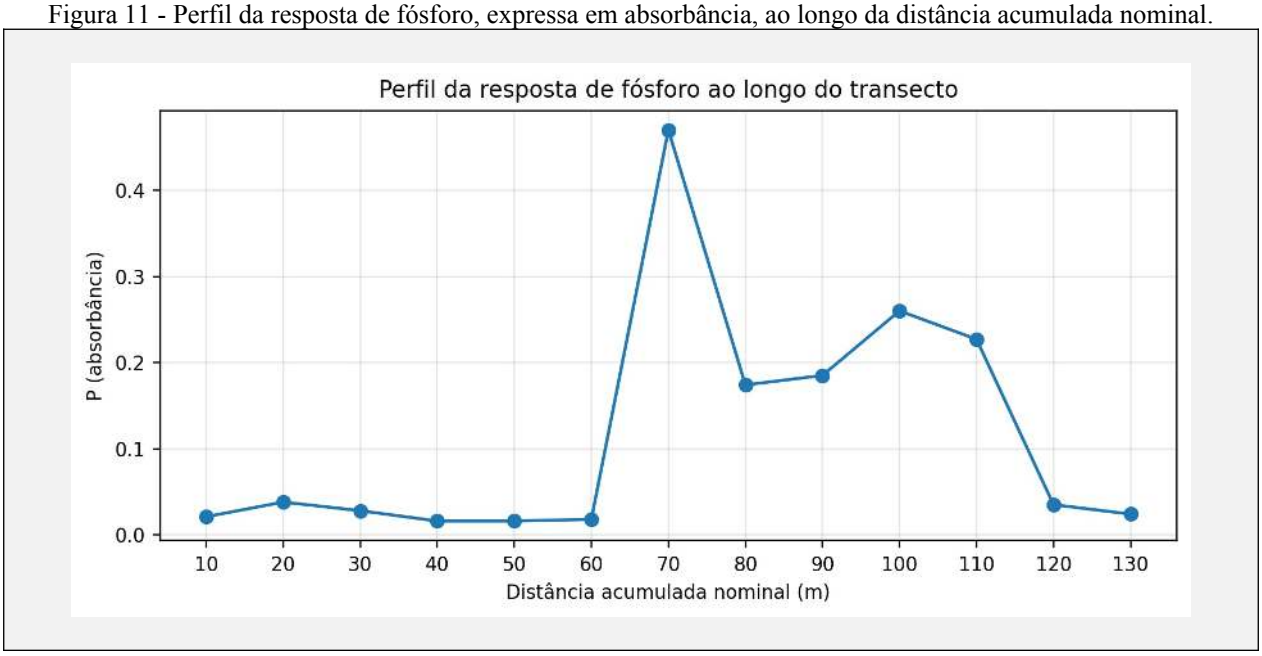
Figura 10 - Perfis das respostas instrumentais de K e Na ao longo da distância acumulada nominal



Fonte: elaboração dos autores (2026).

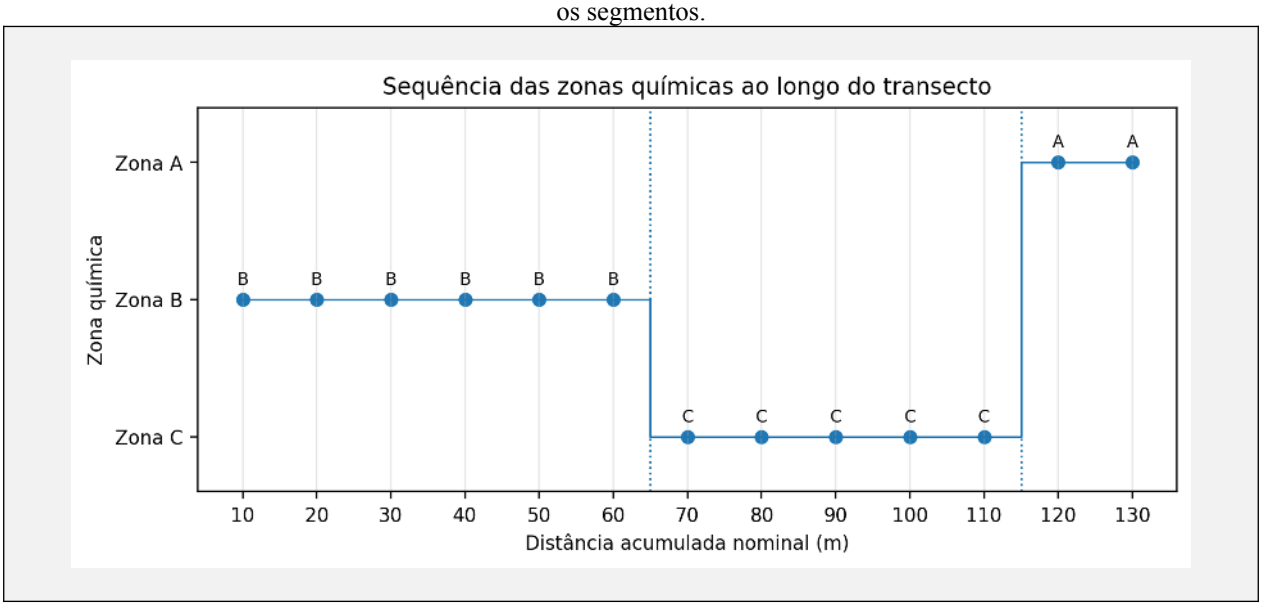
A Figura 10 demonstra que o potássio (K) apresentou maiores valores entre 10 e 60 m, seguido de redução na porção intermediária do transecto e discreta recuperação nos pontos finais. O sódio (Na) exibiu maior variabilidade espacial, com picos de concentração em 20, 100 e 120 m e menores valores entre 50 e 90 m. Embora ambos os elementos apresentem oscilações ao longo do gradiente amostral, não foi observada correspondência direta entre seus perfis de distribuição. Esses resultados refletem a influência conjunta das características mineralógicas do solo, da mobilidade dos cátions e das condições locais de manejo sobre a disponibilidade desses nutrientes.

Figura 11 - Perfil da resposta de fósforo, expressa em absorbância, ao longo da distância acumulada nominal.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 12 - Sequência das zonas químicas A, B e C ao longo do transecto. As linhas verticais indicam as transições entre os segmentos.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

5 DISCUSSÃO

5.1 GRADIENTE DE ACIDEZ E PROCESSOS PEDOGENÉTICOS

A predominância de pH levemente ácido em grande parte das amostras é compatível com condições tropicais úmidas, nas quais o intemperismo e a lixiviação removem cátions básicos e favorecem a acidificação. Solos amazônicos frequentemente apresentam baixa fertilidade natural, elevada acidez e forte influência de óxidos de Fe e Al na retenção de nutrientes, embora existam

exceções relacionadas ao material de origem, à drenagem e a intervenções antrópicas (SILVA et al., 2021).

A relação inversa entre pH e acidez potencial evidencia coerência interna dos resultados. As amostras 12 e 13, correspondentes aos pontos P13 e P14 no trecho final de 120 a 130 m, apresentaram pH superior a 7,2 e menor consumo de NaOH, configurando um segmento químico distinto. Sem informações de campo, pelo menos quatro hipóteses devem ser consideradas: presença de material de origem mais rico em bases; posição de acumulação na paisagem; aplicação recente ou residual de corretivo; ou aporte de cinzas e resíduos. A validação exige mapa de uso, histórico de manejo, profundidade de coleta e dados de relevo.

O contraste entre os segmentos pode refletir diferenças de drenagem, relevo ou manejo ao longo do eixo amostral. A passagem da Zona C para a Zona A entre 110 e 120 m coincide com aumento acentuado do pH e redução da acidez, enquanto a transição da Zona B para a Zona C entre 60 e 70 m coincide com queda do K e aumento do P. Essas mudanças são evidências de heterogeneidade ao longo do transecto, mas não permitem identificar o mecanismo causal nem a extensão lateral das zonas sem a sobreposição dos pontos ao modelo digital de elevação, à drenagem e às classes de uso da terra.

5.2 DISTRIBUIÇÃO DE Ca, Mg, K E Na

Os maiores volumes de EDTA observados nas amostras 12 e 13, correspondentes aos pontos P13 e P14 e localizados entre 120 e 130 m do transecto, corroboram a maior disponibilidade relativa de bases nesse segmento da área de estudo. A presença de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) exerce papel fundamental na manutenção do equilíbrio químico do solo, contribuindo para o balanço de cargas, a neutralização da acidez e o adequado suprimento nutricional das plantas. Embora áreas com menores concentrações desses cátions possam demandar práticas de calagem, recomendações agronômicas somente podem ser realizadas após a conversão dos resultados para cmolc dm^{-3}, bem como o cálculo da capacidade de troca catiônica (CTC), da saturação por bases e a consideração das exigências específicas da cultura de interesse (Raij, 2011).

A distribuição espacial do potássio (K) evidenciou diferenças marcantes entre o trecho inicial da Zona B, compreendido entre 10 e 60 m, e o trecho intermediário da Zona C, localizado entre 70 e 110 m. As maiores concentrações registradas nos pontos P02 a P07 podem estar associadas à influência de práticas de fertilização, ao retorno de resíduos vegetais, às características mineralógicas locais ou à menor intensidade dos processos de erosão e lixiviação.

Em ambientes tropicais úmidos, o potássio apresenta elevada mobilidade, sendo facilmente removido quando permanece na solução do solo, especialmente em materiais com baixa capacidade de

troca catiônica. Nesse contexto, estratégias de manejo localizado devem priorizar a reposição e a conservação desse nutriente no segmento intermediário, onde foram observadas as menores concentrações, evitando aplicações uniformes que possam aumentar custos de produção e favorecer perdas por lixiviação.

Os teores de sódio (Na) permaneceram relativamente baixos em todas as amostras avaliadas; entretanto, esse comportamento, isoladamente, não permite inferir a ausência de processos de sodicidade ou salinização do solo. Uma avaliação mais consistente dessas condições requer informações complementares, incluindo a unidade analítica dos resultados, a condutividade elétrica, a porcentagem de sódio trocável (PST) e, quando pertinente, a razão de adsorção de sódio (RAS). Dessa forma, no presente estudo, o sódio foi empregado exclusivamente como variável discriminante nas análises estatísticas multivariadas, contribuindo para a diferenciação dos padrões químicos observados entre os segmentos do transecto.

5.3 HETEROGENEIDADE DO FÓSFORO

O fósforo foi o atributo com maior variabilidade relativa e apresentou organização espacial marcante ao longo do transecto. Os maiores valores concentraram-se entre 70 e 110 m, com máximo na amostra 7/P08, a 70 m, enquanto os trechos de 10 a 60 m e de 120 a 130 m apresentaram respostas muito menores. Em solos tropicais altamente intemperizados, a disponibilidade de P é controlada por adsorção em óxidos de Fe e Al, mineralogia, matéria orgânica, pH e histórico de fertilização. O segmento enriquecido pode estar associado a aportes localizados, acúmulo de matéria orgânica, resíduos ou diferenças mineralógicas, e não necessariamente a uma condição geral de maior fertilidade.

A correlação negativa entre K e P é coerente com a separação espacial observada: K predominou no trecho inicial de 10 a 60 m, enquanto P se concentrou no segmento intermediário de 70 a 110 m. Esse padrão é relevante para o manejo: uma recomendação uniforme poderia superestimar a necessidade de P no segmento intermediário ou subestimar a de K, enquanto o inverso ocorreria no trecho inicial. A validação desse contraste requer repetição amostral, unidades agronômicas, histórico de adubação e caracterização do uso da terra.

5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA E PLANEJAMENTO TERRITORIAL

A PCA demonstrou que grande parte da variação pode ser sintetizada em dois gradientes, reduzindo a complexidade do conjunto. O primeiro gradiente representa o balanço acidez-bases; o segundo, a oposição entre K e P. Esse resultado confirma a utilidade da estatística multivariada para reconhecer padrões que não seriam evidentes pela análise isolada de cada variável. Abordagens

semelhantes têm sido empregadas em estudos de solos e geoquímica para integrar atributos, identificar fontes e apoiar o delineamento de zonas homogêneas (LU *et al.,* 2012).

Na Amazônia, a variabilidade espacial dos solos tem implicações diretas para experimentação e manejo. Cerri et al. (2004) demonstraram que a distribuição das propriedades do solo em pastagem amazônica deve ser considerada na seleção de áreas experimentais. Oliveira *et al.* (2015) verificaram organização espacial de atributos em Argissolos de Manicoré, enquanto Silva *et al.* (2023) identificaram dependência espacial de atributos químicos em sistema agroflorestal. Esses estudos reforçam que a média geral não representa adequadamente toda a área.

Sob a perspectiva do planejamento territorial, os agrupamentos identificados representam segmentos lineares de comportamento químico ao longo do transecto amostral, não devendo ser interpretados como zonas de manejo espacialmente delimitadas em duas dimensões. O segmento intermediário, caracterizado por maior acidez e menores concentrações de potássio, demanda investigações complementares para subsidiar estratégias de correção da fertilidade e práticas conservacionistas compatíveis com suas limitações edáficas.

Em contrapartida, o segmento final, que apresentou maior pH e maior disponibilidade relativa de bases, requer estudos adicionais para determinar a origem desse enriquecimento químico e verificar sua estabilidade espacial e temporal.

Ressalta-se que a definição de áreas para uso agrícola ou manejo intensivo deve considerar, de forma integrada, atributos químicos, físicos e ambientais, incluindo relevo, suscetibilidade à erosão, condições de drenagem, disponibilidade hídrica e conservação da biodiversidade. Dessa forma, a delimitação de unidades de manejo espacialmente representativas depende da ampliação da malha amostral em duas dimensões e da aplicação de técnicas geoestatísticas que permitam caracterizar com maior precisão a continuidade espacial dos atributos do solo.

6 CONCLUSÃO

A análise integrada dos atributos químicos do solo evidenciou que a área estudada apresenta elevada heterogeneidade espacial, refletida principalmente pela variabilidade dos teores de fósforo, potássio, sódio e acidez complementar, enquanto o pH apresentou comportamento relativamente mais uniforme. A forte relação inversa entre o pH e a acidez potencial demonstrou a existência de um gradiente químico consistente, indicando diferenças na disponibilidade de bases e na intensidade da acidez ao longo do transecto. Esses resultados reforçam a importância da variabilidade espacial dos atributos edáficos como fator determinante para a compreensão da dinâmica química do solo e para o planejamento do seu manejo.

A Análise de Componentes Principais mostrou elevada capacidade de síntese dos dados, explicando 83,2% da variabilidade total nas duas primeiras componentes, permitindo identificar os principais processos responsáveis pela diferenciação química das amostras. De forma complementar, a análise de agrupamento evidenciou a existência de três zonas químicas distintas e espacialmente organizadas, caracterizadas por diferentes níveis de acidez, disponibilidade de potássio e enriquecimento relativo de fósforo. A incorporação das coordenadas geográficas confirmou que essas zonas se distribuem de maneira contínua ao longo do transecto, com transições químicas bem definidas, evidenciando a influência da posição espacial sobre a distribuição dos atributos do solo.

Em conjunto, os resultados demonstram que a integração entre análises estatísticas multivariadas e informações espaciais constitui uma abordagem eficiente para caracterizar a variabilidade química do solo, identificar padrões de distribuição dos atributos e subsidiar estratégias de manejo localizado. Entretanto, recomenda-se, em estudos futuros, a confirmação do datum geodésico, a padronização das distâncias entre os pontos amostrais, a revisão dos procedimentos analíticos laboratoriais e a ampliação da malha de amostragem em duas dimensões, permitindo a aplicação de métodos geoestatísticos e a elaboração de mapas de variabilidade com maior robustez. Essas ações contribuirão para aprimorar a interpretação dos processos edáficos e fornecer bases técnicas mais consistentes para o manejo sustentável e para a avaliação da aptidão agrícola da área estudada.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DOS DADOS

Os dados laboratoriais utilizados nesta versão derivam do relatório “Análise química do solo para quantificação de pH, acidez potencial, fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio”, elaborado em 2026 pelos autores. As coordenadas dos pontos P01 a P13, a referência P01 e as distâncias acumuladas nominais foram incorporadas ao Quadro 1, adotando-se correspondência sequencial entre amostras e pontos. O datum geodésico, os metadados completos da amostragem, a conferência das distâncias e as unidades analíticas finais deverão acompanhar a versão submetida como material suplementar.

REFERÊNCIAS

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CERRI, C. E. P. et al. Agricultural impacts on soil organic carbon stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 79, p. 1–11, 2004.

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. Geoderma, v. 123, n. 1-2, p. 51-68, 2004. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.01.027.

JENNY, H. *Factors of Soil Formation*. New York: McGraw-Hill, 1941.

LU, A.; WANG, J.; QIN, X.; WANG, K.; HAN, P.; ZHANG, S. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. Science of the Total Environment, v. 425, p. 66-74, 2012. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.003.

LU, D. et al. Spatial analysis of soil properties using GIS and geostatistics. *Geoderma*, v. 189–190, p. 25–38, 2012.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
QUESADA, C. A. et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, v. 8, p. 1415–1440, 2011.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20140496.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAIJ, B. van. *Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

SANTOS, H. G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
SILVA, F. C. da. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA, F. C. et al. Aplicação de geotecnologias na avaliação da fertilidade dos solos da Amazônia. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 66, 2023.

SILVA, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em ambientes agrícolas amazônicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2021.

SILVA, G. C.; OLIVEIRA, T. K.; AMARAL, E. F.; BERKEMBROCK, J.; SILVA, D. V. Atributos do solo e desempenho do cupuaçuzeiro consorciado com espécies florestais sob duas densidades de pupunheira. Ciência Florestal, v. 33, n. 3, e68207, 2023. DOI: 10.5902/1980509868207.

SILVA, L. M.; PEREIRA, M. G.; SCHLINDWEIN, J. A.; POLIDORO, J. C. (ed.). Solos da Amazônia Ocidental: base da sustentabilidade agrícola e ambiental. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

TEIXEIRA, P. C. et al. (org.). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

APÊNDICE A - MATRIZ DE DADOS LABORATORIAIS UTILIZADA NAS ANÁLISES EXPLORATÓRIAS

Os valores são apresentados exatamente na forma disponível no relatório. "-" indica dado ausente. K e Na permanecem sem unidade confirmada; Ca, Ca+Mg, H+Al e acidez complementar são volumes de titulante; P é absorbância. Nesta revisão, as amostras 1 a 13 foram associadas sequencialmente aos pontos P02 a P14 e às distâncias acumuladas nominais de 10 a 130 m, conforme o Quadro 1.

Tabela A1 - Dados laboratoriais e zonas químicas exploratórias.

Amostra	pH	H+Al (mL)	Acidez comp. (mL)	Ca (mL EDTA)	Ca+Mg (mL EDTA)	K	Na	P (abs.)	Zona
1	6.00	6.00	0.80	4.30	4.60	26.40	1.90	0.021	B
2	5.92	6.40	0.60	3.70	5.80	30.70	3.40	0.038	B
3	5.83	5.50	0.70	3.90	4.90	25.80	1.90	0.028	B
4	6.23	6.20	0.50	3.70	4.40	28.00	1.80	0.016	B
5	6.27	6.00	0.70	2.90	5.30	25.00	1.30	0.016	B
6	6.30	6.30	0.90	-	-	27.50	1.80	0.018	B
7	5.80	6.40	1.40	2.80	4.50	15.70	2.20	0.470	C
8	5.90	6.50	1.10	3.50	5.50	15.10	1.70	0.174	C
9	5.81	6.30	1.30	3.70	3.90	14.00	1.50	0.185	C
10	6.23	4.50	0.50	5.10	5.50	15.40	2.40	0.260	C
11	6.32	4.50	1.60	5.50	4.50	12.70	1.70	0.227	C
12	7.27	3.00	0.00	6.20	6.80	15.30	3.50	0.035	A
13	7.50	3.10	0.00	6.60	7.30	18.30	2.90	0.024	A

Fonte: elaboração dos autores com base no relatório experimental (2026).