ReGeo
ISSN: 2177-3246

# DINÂMICA GEOQUÍMICA DA FERTILIDADE DO SOLO NO ESTADO DO PARÁ: UMA ANÁLISE REGIONAL E TEMPORAL

# GEOCHEMICAL DYNAMICS OF SOIL FERTILITY IN THE STATE OF PARÁ: A REGIONAL AND TEMPORAL ANALYSIS

# DINÁMICA GEOQUÍMICA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN EL ESTADO DE PARÁ: UN ANÁLISIS REGIONAL Y TEMPORAL

10.56238/revgeov17n3-043

**Carlos Alberto Costa Veloso**
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

**Eduardo Jorge Maklouf Carvalho**
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

**Raimundo Cosme de Oliveira Junior**
Doutor em Geoquímica Ambiental
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

**Arystides Resende Silva**
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Milho e Sorgo
Endereço: Minas Gerais, Brasil
E-mail: arystides.silva@embrapa.br

**Austrelino Silveira Filho**
Doutor em Agronomia
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: austrelino.silveira@embrapa.br

ReGeo
ISSN: 2177-3246

**Daniel Rocha de Oliveira**
Mestre Clinica e Reprodução Animal
Instituição: Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ)
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: handvet@yahoo.com.br

**Darlisson Bentes dos Santos**
Mestre em Energia na Agricultura
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental (colaborador)
Endereço: Pará, Brasil
E-mail: engenheirodbs@hotmail.com

**RESUMO**
A fertilidade dos solos tropicais altamente intemperizados é condicionada por processos geoquímicos estruturais que limitam a disponibilidade de nutrientes e a eficiência dos sistemas agrícolas. Este estudo avaliou os atributos químicos do solo em duas escalas complementares: comparativa entre mesorregiões do Estado do Pará e temporal (2020–2022) na mesorregião do Nordeste Paraense, com base em banco de dados laboratorial regional. A análise regional evidenciou predominância de solos ácidos a moderadamente ácidos, com baixa saturação por bases, elevados teores de acidez potencial (H+Al) e reduzidos teores médios de $Ca^{2+}$, confirmando caráter distrófico típico de ambientes tropicais altamente lixiviados. No Nordeste Paraense, observou-se aumento da acidez potencial em 2022, associado à elevação da saturação por alumínio, indicando intensificação localizada da acidificação. A elevada variabilidade estatística dos atributos, especialmente para fósforo e saturação por bases, revelou heterogeneidade de manejo agrícola. A Análise de Componentes Principais identificou dois eixos estruturais da fertilidade: (i) acidez estrutural, dominada por pH, H+Al e $Al^{3+}$; e (ii) reserva nutricional, associada à matéria orgânica, $Ca^{2+}$ e fósforo disponível. A comparação com áreas do Cerrado brasileiro, África Subsaariana e Sudeste Asiático demonstrou convergência nos mecanismos geoquímicos que limitam a produtividade em solos de baixa atividade mineral. Conclui-se que a limitação química regional é estruturalmente vinculada à pedogênese tropical, sendo a correção sistemática da acidez e o manejo da matéria orgânica condições fundamentais para a intensificação sustentável da produção agrícola.

**Palavras-chave:** Fertilidade do Solo. Acidez. Saturação por Alumínio. Fósforo. Agricultura Tropical. Planejamento Territorial.

**ABSTRACT**
Soil fertility in highly weathered tropical environments is structurally constrained by geochemical processes that regulate nutrient availability and agricultural efficiency. This study evaluated soil chemical attributes at two complementary scales: (i) a regional comparison among mesoregions of Pará State (Brazil) and (ii) a temporal analysis (2020–2022) within the Northeast Pará mesoregion, based on a regional laboratory database. The regional assessment revealed predominance of acidic to moderately acidic soils, low base saturation, high potential acidity (H+Al), and reduced $Ca^{2+}$ contents, confirming a dystrophic condition typical of highly leached tropical environments. In Northeast Pará, potential acidity increased in 2022, accompanied by higher aluminum saturation, indicating localized intensification of soil acidification. High statistical variability—especially for available phosphorus and base saturation—highlighted strong spatial heterogeneity associated with agricultural

management. Principal Component Analysis identified two structural fertility axes: (i) structural acidity, dominated by pH, H+Al and exchangeable $Al^{3+}$; and (ii) nutrient reserve, associated with soil organic matter, $Ca^{2+}$ and available phosphorus. Comparative analysis with Oxisols of the Brazilian Cerrado, Sub-Saharan African Ferralsols, and Southeast Asian Ultisols demonstrated convergence in geochemical constraints typical of low-activity mineral soils. The results indicate that regional fertility limitations are structurally linked to tropical pedogenesis, and that systematic acidity correction combined with organic matter management constitutes a prerequisite for sustainable agricultural intensification.

**Keywords:** Soil Fertility. Soil Acidity. Aluminum Saturation. Phosphorus Availability. Tropical Soils. Territorial Planning.

**RESUMEN**

La fertilidad de los suelos tropicales altamente meteorizados está condicionada por procesos geoquímicos estructurales que limitan la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de los sistemas agrícolas. Este estudio evaluó los atributos químicos del suelo a dos escalas complementarias: comparativa entre mesorregiones del Estado de Pará y temporal (2020-2022) en la mesorregión del Nordeste de Pará, con base en una base de datos de laboratorio regional. El análisis regional mostró un predominio de suelos ácidos a moderadamente ácidos, con baja saturación de bases, altos niveles de acidez potencial (H+Al) y niveles promedio reducidos de $Ca^{2+}$, lo que confirma el carácter distrófico típico de los ambientes tropicales altamente lixiviados. En el Nordeste de Pará, se observó un aumento de la acidez potencial en 2022, asociado a un aumento de la saturación de aluminio, lo que indica una intensificación localizada de la acidificación. La alta variabilidad estadística de los atributos, especialmente para el fósforo y la saturación de bases, reveló heterogeneidad en la gestión agrícola. El Análisis de Componentes Principales identificó dos ejes estructurales de fertilidad: (i) acidez estructural, dominada por el pH, H+Al y $Al^{3+}$; y (ii) reserva nutricional, asociada a la materia orgánica, $Ca^{2+}$ y fósforo disponible. La comparación con áreas del Cerrado brasileño, África subsahariana y el Sudeste Asiático demostró convergencia en los mecanismos geoquímicos que limitan la productividad en suelos con baja actividad mineral. Se concluye que la limitación química regional está estructuralmente vinculada a la pedogénesis tropical, y que la corrección sistemática de la acidez y el manejo de la materia orgánica son condiciones fundamentales para la intensificación sostenible de la producción agrícola.

**Palabras clave:** Fertilidad del Suelo. Acidez. Saturación de Aluminio. Fósforo. Agricultura Tropical. Ordenamiento Territorial.

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura no Estado do Pará encontra-se em expansão, com ampliação da área plantada e introdução de novas culturas agrícolas e florestais. O Estado possui área territorial de 1.247.955,24 km² (IBGE, 2018), sob clima predominantemente quente e úmido, com elevada variabilidade geológica e geomorfológica. Embora os solos paraenses apresentem, de modo geral, condições físicas favoráveis, como adequada estrutura e porosidade, suas características químicas revelam forte limitação natural, sendo predominantemente ácidos e de baixa fertilidade. Entre as classes mais representativas destacam-se Latossolos, Argissolos e Gleissolos (Gama et al., 2007).

Em ambientes tropicais altamente intemperizados, como os da Amazônia Oriental, a baixa fertilidade natural está associada à predominância de minerais de baixa atividade, reduzida capacidade de troca de cátions (CTC), elevada acidez e forte adsorção de fósforo por óxidos de ferro e alumínio (Qafoku, 2015; Fageria; Baligar; Clark, 2017). Essas características estruturais condicionam limitações persistentes à produtividade agrícola, exigindo intervenções corretivas contínuas e manejo criterioso da fertilidade.

Nas últimas décadas, o Estado do Pará tem experimentado intensas transformações na paisagem, decorrentes da expansão agropecuária e da alteração do uso da terra. O manejo inadequado do solo pode resultar em processos de degradação química, física e biológica, comprometendo não apenas a produtividade agrícola, mas também os recursos hídricos e a qualidade ambiental (Moline; Coutinho, 2015). Nesse contexto, os atributos químicos do solo assumem papel central na sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A mesorregião Nordeste Paraense, com área aproximada de 83.316,02 km², destaca-se pela elevada relevância socioeconômica e pela predominância da agricultura familiar. A produção regional envolve culturas como mandioca, açaí, milho, feijão, banana, abacaxi, pimenta-do-reino, cacau e hortaliças (IBGE, 2022), desempenhando papel estratégico na geração de renda e na segurança alimentar.

Apesar dessa importância produtiva, ainda são escassos estudos regionais baseados em grandes bancos de dados laboratoriais que permitam compreender padrões espaciais e temporais da fertilidade do solo no Nordeste Paraense. A maioria das investigações concentra-se em áreas experimentais específicas, o que limita a extrapolação regional dos diagnósticos (Demattê et al., 2019; Silva et al., 2020). Assim, a sistematização de dados laboratoriais representa ferramenta estratégica para subsidiar recomendações técnicas, planejamento territorial e políticas públicas voltadas ao manejo sustentável.

Entre os atributos químicos limitantes em solos tropicais, destacam-se a acidez do solo e a saturação por alumínio. A toxidez por $Al^{3+}$ compromete o crescimento radicular, reduz a absorção de fósforo e cálcio e limita a exploração hídrica em profundidade, aumentando a vulnerabilidade das culturas a períodos de déficit hídrico (Kopittke et al., 2015; Bohnen; Kaminski; Silva, 2017). Em solos

distróficos, a elevada acidez potencial (H+Al) e a baixa saturação por bases restringem o ambiente radicular, exigindo práticas corretivas adequadas.

A matéria orgânica do solo (MOS) também desempenha papel fundamental na dinâmica de cargas, na retenção de nutrientes e na estabilidade estrutural, sendo reconhecida como indicador-chave de qualidade química em sistemas tropicais (Lal, 2016; Oliveira et al., 2021). Reduções nos teores de MOS estão frequentemente associadas à intensificação do uso do solo e à diminuição da resiliência produtiva.

Além da acidez e da baixa CTC, destacam-se limitações relacionadas à disponibilidade de macronutrientes primários (N, P e K), secundários (Ca, Mg e S) e micronutrientes (Zn e Cu), bem como o elevado poder de fixação de fósforo característico de solos altamente intemperizados. Em tais condições, o suprimento adequado de nutrientes depende fortemente da análise química periódica e da adoção de estratégias de manejo baseadas em evidências técnicas (Brasil et al., 2020).

Estudos conduzidos no Nordeste e em outras mesorregiões do Pará confirmam a predominância de solos distróficos, com pH variando de médio a baixo e elevados teores de alumínio trocável (Santos et al., 2020; Miranda et al., 2020). Em sistemas agroflorestais e silviculturais da região, observou-se que práticas de manejo adequadas podem elevar os teores de nutrientes e melhorar atributos químicos do solo (Rodrigues et al., 2016; Silva et al., 2020). Entretanto, tais estudos permanecem localizados, reforçando a necessidade de diagnósticos regionais abrangentes.

Diante desse cenário, a problemática central que orienta este estudo pode ser formulada nos seguintes termos: qual o padrão espacial e temporal dos atributos químicos limitantes da fertilidade nos solos do Nordeste Paraense, considerando dados laboratoriais sistematizados no período recente.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a fertilidade do solo na mesorregião do Nordeste Paraense a partir de resultados analíticos provenientes do banco de dados do Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental, referentes aos anos de 2020, 2021 e 2022.

Como hipótese científica, parte-se do pressuposto de que os solos do Nordeste Paraense apresentam predominância de condição distrófica, caracterizada por elevada acidez potencial, alta saturação por alumínio e baixos teores médios de fósforo e bases trocáveis, mantendo relativa estabilidade interanual desses atributos em função das condições pedogenéticas regionais.

Espera-se que os resultados contribuam para subsidiar recomendações regionais de calagem e adubação, apoiar estratégias de manejo sustentável voltadas à agricultura familiar, orientar ações de assistência técnica e extensão rural e fortalecer o planejamento do uso da terra com base em evidências técnico-científicas.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO E FONTE DOS DADOS

O presente estudo possui caráter quantitativo, descritivo e analítico, baseado na sistematização de resultados de análises químicas de solo provenientes do banco de dados do Laboratório de Análise de Solos da Embrapa Amazônia Oriental. Foram considerados registros compreendidos entre janeiro de 2020 e dezembro de 2022, oriundos de amostras encaminhadas por produtores rurais e propriedades agrícolas do estado do Pará.

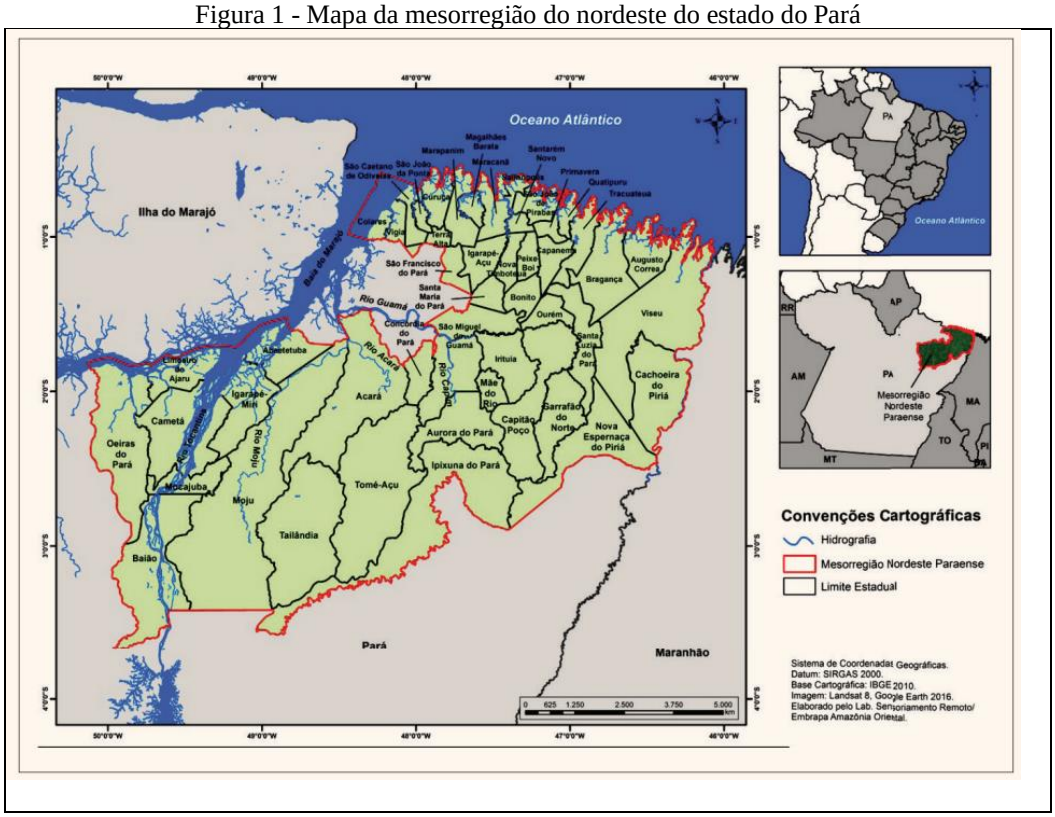
O banco de dados analisado é composto por 2.140 amostras, distribuídas ao longo dos três anos avaliados.

### 2.2 ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A área de estudo compreende a mesorregião do Nordeste Paraense, subdividida em cinco microrregiões: Bragantina, Cametá, Guamá, Salgado e Tomé-Açu, totalizando 49 municípios (Figura 1). Essa mesorregião abrange aproximadamente 83.316,02 km² e apresenta clima do tipo Am (Köppen), com precipitação média anual em torno de 2.538 mm.

Do ponto de vista pedológico, predominam Latossolos Amarelos de textura média, além de ocorrências de Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos, Plintossolos e Gleissolos, caracterizados, de modo geral, por elevada acidez, baixa saturação por bases e reduzida capacidade de troca de cátions (CTC), atributos típicos de solos altamente intemperizados.

Figura 1 - Mapa da mesorregião do nordeste do estado do Pará




Fonte: IBGE, 2010

## 2.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO, CAMADA DIAGNÓSTICA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Foram utilizados exclusivamente os resultados referentes à camada de 0 -20 cm, considerada diagnóstica para fins de recomendação de calagem e adubação em sistemas agrícolas.

O banco de dados foi submetido a procedimentos de triagem e padronização, incluindo: verificação de consistência das unidades analíticas; exclusão de registros incompletos ou inconsistentes; conferência de valores extremos incompatíveis com a natureza química do solo; organização dos dados por ano e, quando aplicável, por unidade territorial.

Após a etapa de conferência e validação, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas para posterior tratamento estatístico.

## 2.4 ATRIBUTOS QUÍMICOS AVALIADOS

Foram considerados os principais atributos químicos utilizados na avaliação da fertilidade do solo em sistemas agrícolas, a saber: pH em água; fósforo disponível (P); potássio (K); cálcio ($Ca^{2+}$); magnésio ($Mg^{2+}$); alumínio trocável ($Al^{3+}$); soma de bases (SB); acidez potencial (H+Al); capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC pH=7); capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva); matéria orgânica do solo (MO); carbono orgânico (C.Org); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%) (Tabela 1).

## 2.5 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental, seguindo os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (Embrapa, 2017), incluindo: determinação do pH em água; extração de P e K por método Mehlich-1; determinação de $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ e $Al^{3+}$ por extração com KCl 1 mol $L^{-1}$; determinação da matéria orgânica por método colorimétrico ou equivalente validado pelo laboratório.

Os cálculos de SB, CTC efetiva, CTC a pH 7, V% e m% foram realizados conforme as equações convencionais adotadas nos manuais oficiais de recomendação de adubação e calagem.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

A interpretação dos resultados foi realizada com base no Manual de Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado do Pará (Brasil et al., 2020), considerando: classes texturais quando aplicável; níveis críticos de P e K; classes de acidez (pH); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%); necessidade de calagem.

Os dados foram classificados em faixas de fertilidade (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), conforme critérios estabelecidos pelo manual regional.

## 2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo calculadas: média; mediana; desvio padrão; coeficiente de variação; valores mínimo e máximo; assimetria.

Foram elaborados histogramas de frequência para avaliação da distribuição dos atributos químicos.

Quando pertinente, procedeu-se à agregação dos dados por ano e por unidade territorial, visando identificar padrões espaciais e temporais da fertilidade do solo na mesorregião estudada.

Adicionalmente, foi realizada Análise de Componentes Principais (PCA) com os principais atributos químicos padronizados, com o objetivo de identificar os eixos estruturais que controlam a variabilidade da fertilidade do solo e integrar os mecanismos geoquímicos associados à acidez e à reserva nutricional.

## 2.8 SÍNTESE ESPACIAL DOS DADOS

A distribuição espacial das análises foi sintetizada por microrregião e por município, conforme disponibilidade de identificação territorial no banco de dados

Foram elaboradas representações gráficas e mapas temáticos para demonstrar a cobertura espacial das análises e a variabilidade regional dos atributos químicos avaliados.

Tabela 1 - Atributos químicos avaliados com mais frequência para avaliação da fertilidade do solo em sistemas agrícolas.

| ATRIBUTOS QUÍMICOS | DESCRIÇÃO | UNIDADE |
|---|---|---|
| pH em água | Potencial Hidrogeniônico | |
| P | Fósforo | mg $dm^{-3}$ |
| K | Potássio | |
| $Ca^{+2}$ | Cálcio | cmolc $dm^{-3}$ |
| $Mg^{+2}$ | Magnésio | |
| $Al^{+3}$ | Alumínio | |
| SB | Soma de Bases | |
| H+Al | Acidez Potencial | |
| CTC pH=7 | Capacidade de troca de cátions total | |
| $CTC_{efetiva}$ | Capacidade de troca de cátions efetiva | |
| M.O | Matéria Orgânica no solo | g $kg^{-1}$ |
| C.Org | Carbono orgânico | |
| V% | Saturação por Bases | % |
| m% | Saturação por Alumínio | |

Fonte: Adaptado, Raij (1981

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação da qualidade química do solo constitui etapa fundamental para o diagnóstico da sustentabilidade de sistemas agrícolas em regiões tropicais altamente intemperizadas. Neste estudo, os

atributos químicos foram analisados em duas escalas complementares: (i) comparativa entre mesorregiões do Estado do Pará e (ii) temporal na mesorregião do Nordeste Paraense (2020 a 2022), permitindo integrar variabilidade espacial e estabilidade pedogenética.

## 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO NAS MESORREGIÕES DO PARÁ

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos principais atributos químicos nas mesorregiões do Estado do Pará. Esta Tabela 2 apresenta exclusivamente valores médios regionais, permitindo comparação estrutural entre mesorregiões, enquanto a variabilidade estatística intra-regional é detalhada posteriormente na Tabela 4.

A heterogeneidade observada evidencia que a fertilidade regional é controlada predominantemente por fatores pedogenéticos — material de origem, grau de intemperismo e mineralogia dominante — modulados secundariamente pela intensidade de manejo agrícola.

Os valores de pH variaram de 4,83 (Marajó) a 5,53 (Sudeste Paraense), caracterizando predominância de solos ácidos a moderadamente ácidos. Em especial, Marajó e Sudoeste Paraense apresentaram acidez elevada, condição associada à maior atividade de $Al^{3+}$ e restrição ao desenvolvimento radicular (Brasil et al., 2020; Prezotti et al., 2013).

Os teores médios de $Ca^{2+}$ e Ca+Mg mantiveram-se baixos na maior parte das regiões, refletindo reduzida saturação por bases. Paralelamente, os valores elevados de H+Al confirmam a predominância de solos distróficos, típicos de ambientes tropicais altamente lixiviados.

A matéria orgânica (MO) apresentou ampla variação (9,90 a 28,85 g $kg^{-1}$), indicando forte influência do uso e manejo. Regiões com maior presença de sistemas perenes ou menor revolvimento tendem a apresentar maiores teores de MO, corroborando evidências de que sistemas conservacionistas favorecem a manutenção do carbono e da capacidade de troca de cátions (Lal, 2016; Melo et al., 2021).

A combinação entre baixa saturação por bases, teores reduzidos de $Ca^{2+}$ e elevada acidez potencial confirma que a limitação química regional está estruturalmente associada à mineralogia de baixa atividade, dominada por caulinita e óxidos de Fe e Al (Fink et al., 2016).

Tabela 2 - Teores médios encontrados nas regiões do estado do Pará.

| Indicador / Região | Nordeste Paraense | Sudeste Paraense | Metropolitana de Belém | Marajó | Sudoeste Paraense | Baixo Amazonas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MO (g/kg) | 16,87 | 17,06 | 18,00 | 28,85 | 9,90 | 26,14 |
| P (mg/dm³) | 19,52 | 9,27 | 55,80 | 2,06 | 5,12 | 42,92 |
| K (mg/dm³) | 32,86 | 47,68 | 33,88 | 19,62 | 38,18 | 53,54 |
| Na (mg/dm³) | 10,51 | 13,94 | 14,14 | 10,96 | 6,73 | 29,96 |
| Zn (mg/kg) | 4,33 | 10,50 | 38,65 | 4,93 | 16,63 | 23,25 |
| Cu (mg/kg) | 1,97 | 45,47 | 15,31 | 5,14 | 4,40 | 7,69 |
| Mn (mg/kg) | 5,43 | 31,75 | 4,92 | 1,47 | 2,85 | 36,45 |
| Fe (mg/kg) | 184,60 | 152,46 | 287,55 | 248,77 | 430,19 | 207,74 |
| N (g/kg) | 0,75 | 0,51 | 3,24 | 1,09 | 0,74 | 1,09 |
| Al (cmolc/dm³) | 0,55 | 0,59 | 0,60 | 1,74 | 0,73 | 0,87 |
| Ca (cmolc/dm³) | 1,03 | 1,18 | 1,59 | 0,32 | 1,45 | 3,10 |
| Ca + Mg (cmolc/dm³) | 1,45 | 1,63 | 2,36 | 0,87 | 2,27 | 4,74 |
| pH (água) | 5,13 | 5,53 | 5,18 | 4,83 | 4,99 | 5,37 |
| H + Al (cmolc/dm³) | 4,36 | 4,29 | 7,14 | 7,80 | 3,70 | 4,95 |

Fonte: Autores, 2026

## 3.2 DINÂMICA TEMPORAL DA ACIDEZ E CAPACIDADE DE TROCA NO NORDESTE PARAENSE

A Tabela 3 apresenta os atributos relacionados à acidez e à capacidade de troca no período 2020–2022.

A acidez potencial (H+Al) manteve-se estável entre 2020 e 2021 (~4,0 cmolc $dm^{-3}$), mas apresentou aumento expressivo em 2022 (7,72 cmolc $dm^{-3}$). Esse incremento, associado à elevação da saturação por alumínio (m%), indica intensificação localizada da acidificação, possivelmente vinculada à exportação de bases via colheita ou à ausência de reaplicação de corretivos.

Em solos de carga variável, pequenas reduções no pH promovem aumento exponencial da atividade do $Al^{3+}$ em solução, alterando o ambiente radicular e reduzindo a eficiência de absorção de nutrientes (Sposito, 2016; Ofoe et al., 2023). A forte interdependência entre pH, H+Al e m% confirma que a acidez ativa e potencial constitui o primeiro eixo estruturante da fertilidade regional.

A CTC total apresentou valores médios baixos a moderados (5,52–6,65 cmolc $dm^{-3}$), coerentes com solos de textura média e teores moderados de matéria orgânica. A saturação por bases (V%) permaneceu abaixo de 50% em todos os anos, classificando os solos como predominantemente distróficos.

Esses resultados indicam que a limitação química regional não decorre apenas de deficiência nutricional específica, mas de um ambiente químico estruturalmente dominado por $H^+$ e $Al^{3+}$ no complexo de troca.

Tabela 3 - Teores médios de acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases trocáveis (V%) por ano do nordeste paraense.

| ANO | DESCRITORES | H+Al | CTC | | V | m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Total | Efetiva | Saturação | |
| | | | cmolc dm-3 | | % | |
| 2020 | MÉDIA | 4,05 | 5,91 | 2,53 | 29,06 | 36,23 |
| | DESVIO PADRÃO | 2,51 | 3,29 | 2,13 | 22,27 | 29,50 |
| | MÁXIMO | 26,06 | 28,16 | 17,11 | 179,18 | 93,55 |
| | MÍNIMO | 0,00 | 0,00 | 0,36 | 1,44 | 0,00 |
| 2021 | MÉDIA | 4,04 | 6,65 | 2,71 | 29,78 | 32,32 |
| | DESVIO PADRÃO | 2,54 | 3,07 | 2,18 | 21,85 | 31,16 |
| | MÁXIMO | 19,5 | 29,46 | 23,77 | 100 | 144,95 |
| | MÍNIMO | 0 | 0,63 | 0,09 | 6,47 | 0,64 |
| 2022 | MÉDIA | 7,72 | 5,52 | 10,59 | 35,27 | 48,76 |
| | DESVIO PADRÃO | 13,97 | 1,91 | 38,65 | 80,75 | 29,61 |
| | MÁXIMO | 65,29 | 12,22 | 170,00 | 362,00 | 128,00 |
| | MÍNIMO | 3,08 | 2,06 | 0,50 | 3,55 | 0,54 |

Fonte: Autores, 2026.

## 3.3 ATRIBUTOS QUÍMICOS E DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES

Além da acidez estrutural discutida na seção anterior, a disponibilidade de nutrientes essenciais constitui o segundo eixo determinante da fertilidade regional.

Os teores médios de matéria orgânica (17,38 a 20,98 g $kg^{-1}$) confirmam condição de baixa a moderada reserva orgânica, reforçando sua importância como principal fonte de cargas negativas em solos de mineralogia caulinítica (Lal, 2016).

O fósforo apresentou médias baixas e elevada variabilidade (CV > 100%), refletindo tanto manejo localizado quanto elevada capacidade de fixação. Em Oxisols e Ferralsols tropicais, o P aplicado é rapidamente adsorvido por óxidos de Fe e Al, migrando para frações menos lábeis (Hanyabui et al., 2020; Rodrigues et al., 2023).

Esse comportamento indica que a limitação fosfatada regional é predominantemente geoquímica, associada à adsorção específica e à carga variável dependente do pH.

O potássio apresentou médias moderadas, porém com grande amplitude, sugerindo influência de adubações pontuais. Os teores de $Ca^{2+}$ mantiveram-se baixos, compatíveis com a reduzida saturação por bases observada.

## 3.4 VARIABILIDADE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

A estatística descritiva apresentada na Tabela 4 evidencia elevada variabilidade espacial dos atributos químicos avaliados no período 2020–2022. A amplitude observada para pH (valores mínimos próximos a 3,7 e máximos superiores a 8,0) indica coexistência de ambientes extremamente ácidos e áreas sob forte influência de calagem, revelando heterogeneidade de manejo na mesorregião.

Os coeficientes de variação elevados para fósforo disponível (CV > 100%) e saturação por bases reforçam a presença de intervenções pontuais de adubação e correção, que produzem valores máximos significativamente superiores às médias regionais. Esse padrão sugere que a construção da

fertilidade ocorre de forma localizada, não representando ainda condição consolidada em escala mesorregional.

A elevada dispersão observada para H+Al e $Al^{3+}$ confirma que a acidez potencial não é uniforme no território, refletindo tanto diferenças pedogenéticas quanto histórico de uso da terra. Em sistemas dominados por minerais de carga variável, pequenas alterações no pH podem provocar variações substanciais na atividade do alumínio em solução, amplificando a heterogeneidade química do ambiente radicular (Sposito, 2016).

Adicionalmente, a variabilidade nos teores de matéria orgânica reforça a influência diferenciada dos sistemas de manejo. Áreas sob sistemas conservacionistas tendem a apresentar maior estabilidade química e menor amplitude nos atributos associados à reserva nutricional, enquanto áreas sob manejo intensivo apresentam maior oscilação nos parâmetros de acidez e saturação por bases.

A expressiva variabilidade estatística observada fornece suporte empírico para a aplicação de técnicas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (Figura 6), permitindo sintetizar os padrões estruturais que governam a fertilidade regional. A Tabela 4, não apenas descreve dispersão numérica, mas evidencia a coexistência de dois regimes químicos distintos: um dominante, caracterizado por acidez estrutural elevada, e outro pontual, associado à construção antrópica da fertilidade.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (N, M.O., P, K, Na, Al, Ca, SB, Ca+Mg e pH em água) nos anos de 2020, 2021 e 2022, expressa por média, desvio padrão, valores máximo e mínimo.

| ANO | DESCRITORES | N | MO | P | K | Na | Al | Ca | Ca+Mg | pH. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | g/kg | | mg/dm3 | | | cmolc/dm3 | | | água |
| 2020 | MÉDIA | 0,70 | 17,38 | 22,75 | 41,87 | 14,23 | 0,67 | 1,09 | 1,76 | 5,53 |
| | DESVIO PADRÃO | 0,62 | 36,95 | 62,07 | 51,86 | 23,13 | 0,65 | 1,49 | 2,28 | 1,27 |
| | MÁXIMO | 4,80 | 556,44 | 799,56 | 771,16 | 380,22 | 6,70 | 15,29 | 24,42 | 10,28 |
| | MÍNIMO | 0,05 | 3,77 | 0,13 | 1,11 | 0,79 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 2,58 |
| 2021 | MÉDIA | 0,76 | 20,98 | 24 | 71 | 22 | 0,68 | 1,17 | 1,76 | 5,29 |
| | DESVIO PADRÃO | 0,58 | 20,76 | 62,75 | 158,30 | 63,04 | 1,05 | 1,68 | 2,38 | 1,07 |
| | MÁXIMO | 4,03 | 330,36 | 467 | 2129 | 1403 | 9,71 | 26,02 | 39,02 | 7,91 |
| | MÍNIMO | 0,01 | 40,86 | 0,14 | 0,21 | 0,00 | 0,45 | 0,09 | 0,21 | 0,00 |
| 2022 | MÉDIA | x | x | 7,3 | 48,6 | 7,5 | 0,32 | 3,09 | 4,80 | 5,36 |
| | DESVIO PADRÃO | x | x | 18,35 | 46,50 | 3,21 | 0,45 | 2,32 | 3,33 | 0,27 |
| | MÁXIMO | x | x | 145,3 | 198,3 | 22,2 | 2,38 | 8,24 | 10,84 | 5,94 |
| | MÍNIMO | x | x | 0,4 | 4,5 | 4,1 | 0,00 | 0,06 | 0,15 | 4,65 |

Fonte: Autores, 2026.

## 3.5 INTEGRAÇÃO MULTIVARIADA DA FERTILIDADE

A Análise de Componentes Principais (Figura 2) sintetiza estatisticamente os gradientes estruturais previamente identificados nas análises univariadas.

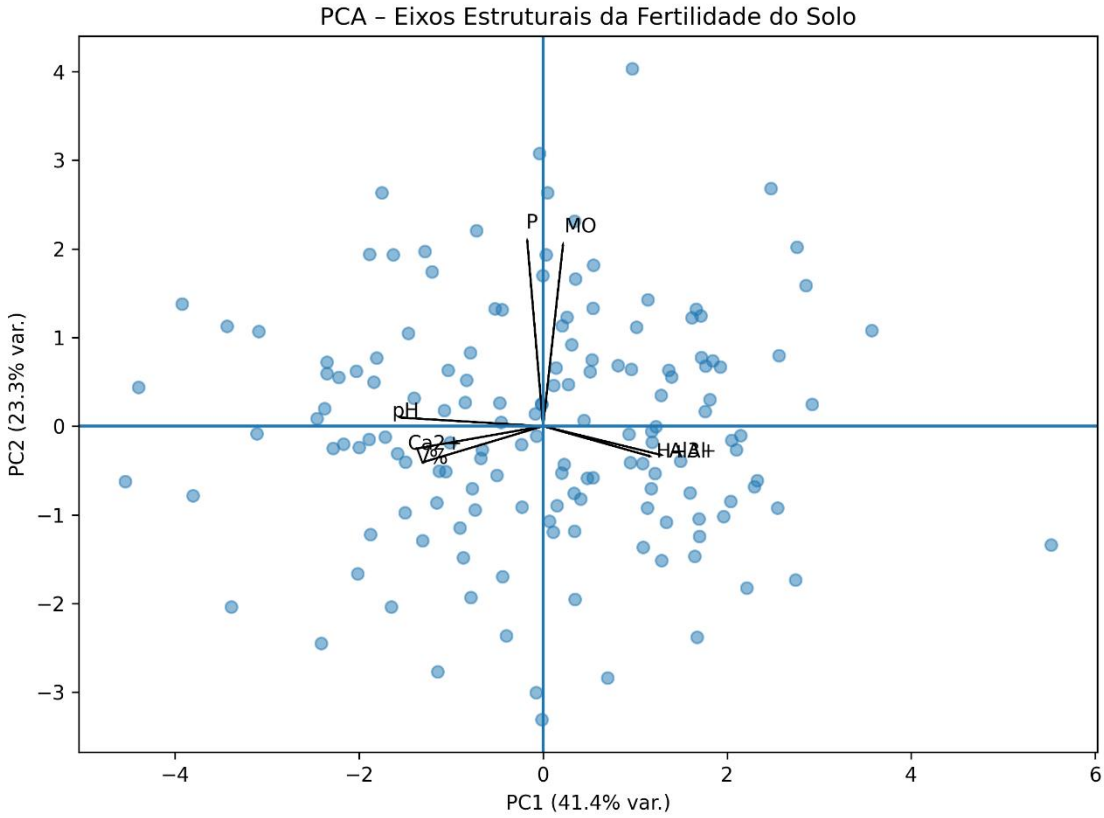
O primeiro componente principal (PC1) representa o eixo da acidez estrutural, caracterizado por associação positiva com H+Al e $Al^{3+}$ e oposição a pH, $Ca^{2+}$ e V%. Esse componente evidencia que a atividade do alumínio constitui o principal controlador do ambiente químico radicular.

O segundo componente principal (PC2) está associado à matéria orgânica e ao fósforo disponível, caracterizando o eixo da reserva e disponibilidade de nutrientes.

A ortogonalidade parcial entre esses eixos indica que a fertilidade regional é governada por dois mecanismos geoquímicos relativamente independentes: (i) controle da acidez ativa e potencial; (ii) controle da reserva nutricional dependente do complexo sortivo.

Os escores evidenciam elevada variabilidade espacial, confirmando heterogeneidade de manejo agrícola na mesorregião.

Figura 2. Análise de Componentes Principais (PCA) dos atributos químicos estruturais da fertilidade do solo no Nordeste Paraense (2020–2022).




Fonte: Autores, 2026

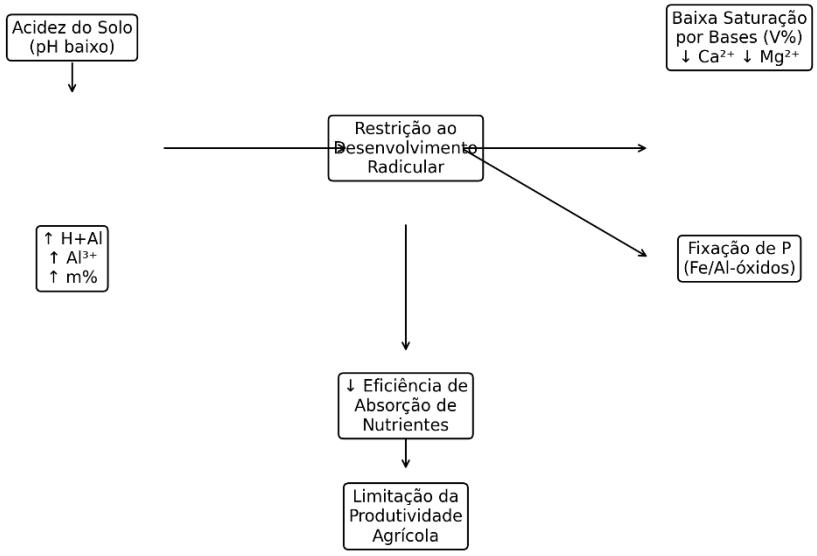
## 3.6 MODELO CONCEITUAL DA LIMITAÇÃO QUÍMICA

O modelo conceitual apresentado na Figura 3 integra os processos identificados empiricamente. A interação entre pH baixo, elevação de H+Al e aumento da saturação por alumínio promove maior atividade de $Al^{3+}$ no complexo de troca, restringindo o desenvolvimento radicular e reduzindo a eficiência de absorção de nutrientes.

Paralelamente, a baixa saturação por bases e a limitada reserva de matéria orgânica reduzem a capacidade tamponante do sistema. A forte fixação de fósforo por óxidos de Fe e Al atua como mecanismo adicional de restrição.

A integração entre o modelo conceitual (Figura 3) e a PCA (Figura 2) demonstra consistência entre interpretação teórica e evidência estatística.

Figura 3. Modelo conceitual dos principais mecanismos de limitação química da fertilidade nos solos do Nordeste Paraense.




Fonte: Autores, 2026.

## 3.7 SÍNTESE E IMPLICAÇÕES PARA O MANEJO SUSTENTÁVEL

A fertilidade dos solos do Nordeste Paraense é estruturada por dois eixos principais: acidez estrutural e reserva nutricional. A correção da acidez constitui condição estruturante para a construção da fertilidade em sistemas tropicais de carga variável (Sposito, 2016).

A elevada variabilidade espacial observada indica que práticas de manejo ocorrem de forma heterogênea, reforçando a necessidade de estratégias baseadas em diagnóstico local, como agricultura de precisão e sistemas conservacionistas (plantio direto e ILPF).

Os resultados demonstram que a limitação química regional não é circunstancial, mas estruturalmente vinculada à pedogênese tropical. Assim, a intensificação sustentável da produção agrícola depende de manejo sistemático da acidez, manutenção da matéria orgânica e reposição criteriosa de bases.

## 3.8 COMPARAÇÃO COM CERRADO, ÁFRICA TROPICAL E ÁSIA TROPICAL

Os padrões observados no Nordeste Paraense são consistentes com os descritos em Oxisols do Cerrado brasileiro, onde acidez elevada, baixa saturação por bases e forte fixação de fósforo constituem limitações estruturais à produtividade. Estudos demonstram que a construção da fertilidade no Cerrado

foi baseada na correção sistemática da acidez e no manejo integrado de nutrientes (Rodrighero et al., 2015).

Na África Subsaariana, Ferralsols apresentam combinação semelhante de elevada acidez e deficiência de fósforo, afetando a segurança alimentar regional (Agegnehu et al., 2021). A principal diferença reside na menor disponibilidade de corretivos agrícolas.

Em Ultisols e Acrisols do Sudeste Asiático, a fertilidade é fortemente controlada pela especiação do alumínio e pela adsorção específica de fósforo (McLeod et al., 2021). A elevação controlada do pH e o aumento da matéria orgânica reduzem a atividade de $Al^{3+}$ e ampliam a eficiência do fósforo aplicado.

A convergência entre Amazônia Oriental, Cerrado brasileiro, África tropical e Sudeste Asiático indica que a limitação química observada no Nordeste Paraense integra um padrão geoquímico global associado à intensa meteorização, dominância de minerais de baixa atividade e carga variável dependente do pH.

## 4 CONCLUSÃO

A sistematização dos dados do Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental confirmou que os solos do Nordeste Paraense apresentam predominância de condição distrófica, caracterizada por elevada acidez potencial, alta saturação por alumínio e baixos teores médios de fósforo e bases trocáveis.

A análise integrada dos atributos químicos, corroborada pela Análise de Componentes Principais (Figura 6), demonstrou que a fertilidade regional é estruturada por dois eixos geoquímicos principais: (i) o eixo da acidez estrutural, associado à interação entre pH, H+Al e $Al^{3+}$ e determinante do ambiente químico radicular; e (ii) o eixo da reserva e disponibilidade de nutrientes, dependente da matéria orgânica, da saturação por bases e da dinâmica de adsorção de fósforo.

A estabilidade interanual observada para a maioria dos atributos confirma o forte controle pedogenético sobre a fertilidade regional, enquanto a elevada variabilidade espacial evidencia influência diferenciada do manejo agrícola, especialmente quanto à aplicação de corretivos e fertilizantes.

Os resultados indicam que a limitação química da fertilidade não decorre apenas de deficiências nutricionais isoladas, mas de um sistema geoquímico dominado por minerais de carga variável, no qual a atividade do alumínio exerce papel central na regulação da disponibilidade de nutrientes. Nesse contexto, a correção da acidez constitui etapa habilitadora para a eficiência de uso da adubação fosfatada e potássica.

Do ponto de vista metodológico, a utilização de banco regional de análises laboratoriais mostrou-se ferramenta robusta para diagnóstico mesorregional da fertilidade, permitindo identificar

padrões estruturais e subsidiar decisões técnicas baseadas em evidências.

Portanto, a intensificação sustentável da produção agrícola no Nordeste Paraense depende de manejo sistemático da acidez, reposição adequada de bases e estratégias que promovam a manutenção da matéria orgânica do solo. A fertilidade regional deve ser compreendida como construção progressiva, orientada por fundamentos geoquímicos e sustentada por políticas públicas e assistência técnica continuada.

## 5 IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

Os resultados demonstram que a limitação química da fertilidade dos solos do Nordeste Paraense não constitui fenômeno pontual ou episódico, mas expressão estrutural de processos pedogenéticos típicos de ambientes altamente intemperizados. A predominância de solos distróficos, organizados em torno do eixo da acidez estrutural e do eixo da reserva nutricional, indica que intervenções isoladas sobre nutrientes específicos tendem a apresentar baixa eficiência quando não precedidas pela correção sistemática da acidez.

Nesse contexto, a correção da acidez do solo deve ser tratada como política agrícola estruturante, e não apenas como recomendação técnica individualizada. Programas públicos de apoio à agricultura familiar podem incorporar estratégias de incentivo à calagem orientada por diagnóstico laboratorial, incluindo subsídios ao transporte e à aquisição de corretivos agrícolas, especialmente em regiões com menor acesso logístico.

A evidência multivariada apresentada pela PCA (Figura 6) reforça que a eficiência de uso de fertilizantes depende diretamente da condição química prévia do solo. Assim, políticas públicas voltadas ao aumento da produtividade devem integrar: (i) diagnóstico sistemático da fertilidade; (ii) correção da acidez como etapa habilitadora; (iii) manejo da matéria orgânica para fortalecimento do complexo sortivo; (iv) uso racional e localizado de fertilizantes fosfatados e potássicos.

A elevada variabilidade espacial observada sugere que programas regionais padronizados podem apresentar eficiência limitada se não considerarem a heterogeneidade edáfica. Nesse sentido, a utilização contínua de bancos de dados laboratoriais institucionais como ferramenta de monitoramento territorial permite subsidiar planejamento agrícola baseado em evidências, identificar áreas prioritárias para intervenção e avaliar tendências temporais da fertilidade.

Adicionalmente, estratégias alinhadas ao Plano ABC+ e às políticas de agricultura de baixa emissão de carbono devem priorizar sistemas conservacionistas — como plantio direto e integração lavoura-pecuária-floresta — capazes de elevar a matéria orgânica do solo e ampliar a estabilidade química do sistema produtivo.

Considerando a predominância da agricultura familiar na mesorregião, políticas públicas que integrem diagnóstico químico regional, assistência técnica continuada e incentivos à correção da

acidez podem contribuir diretamente para aumento sustentável da produtividade, redução de custos com fertilizantes, maior eficiência no uso de nutrientes e fortalecimento da segurança alimentar.

Em síntese, a fertilidade do solo no Nordeste Paraense deve ser compreendida como elemento central da estratégia de desenvolvimento agrícola regional, exigindo articulação entre ciência do solo, extensão rural e formulação de políticas públicas baseadas em dados técnico-científicos robustos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, M. H. D.; COSTA, A. R.de S.; SILVA, K.W. dos S.; SOUSA JÚNIOR, P.M. de; TEIXEIRA, O.M.M.; GONÇALVES, A.C. da S.; CARVALHO, L.T. da S.;BRAZ, A.M.S. Levantamento das propriedades químicas do solo com diferentes usos agrícolas no baixo Amazonas, Pará. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 12, p. 28983- 28996, 2019.

AGEGNEHU, G.; AMEDE, T.; ERKOSSA, T.; YIRGA, C.; HENRY, C.; TYLER, R.; SILESHI, G. W. Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 71*(9), 852-869, 2021.

BOHNEN, H.; KAMINSKI, J.; SILVA, L. S. **Calagem e adubação em solos ácidos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2017.**

BRASIL, E.C.; CRAVO, M.S.; VIÉGAS, I.J.M**. Recomendações de calagem e adubação para o Estado do Pará**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419p.

DEMATTÊ, J. A. M.; DOTTO, A. C.; PAIVA, A. F. S.; et al. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma**, v. 354, p. 113793, 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. **Physiology of crop production.** 2017.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil and Tillage Research*, *155*, 62-68, 2016.

GAMA, J.R.N.F.; VALENTE, M.A.; OLIVEIRA JÚNIOR, R.C.O.; CRAVO, M.S.; CARVALHO, E.J.M.; RODRIGUES, T.E. **Solos do Estado do Pará.** IN: BRASIL, E.C.; CRAVO, M.S.; VIÉGAS, I.J.M. (Editoress.) - **Recomendações de adubação e calagem para o Estado Pará. (2ª. Ed).** Belém, Pará: Embrapa Amazônia Oriental, p. 25–46, 2020.

HANYABUI, E.; APORI, S.O.; FRIMPONG, K.A.; et al. Phosphorus sorption in tropical soils: mechanisms and implications for availability and management. *AIMS Agriculture and Food*, v.5, n.4, p.599–616, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2018**.

KOPITTKE, P. M.; MO**ORE, K.L.; LOMBI, E.; GIANONCELLI, A.; FERGUSON, B. J.; BLAMEY, F.P.C.; MENZIES, N. W.; NICHOLSON, T. M.; MCKENNA, P. W.; GRESSHOFF, P. M.; KOUROUSIAS, G.; WEBB, R. I.; GREEN, K.; TOLLENAERE, A. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots**. Plant Physiology, 2015.

LAL, R. **Soil health and carbon management. Soil & Tillage Research, 2016.**
LIMA, T. M. D. E. et al. Diagnose of soil fertility properties of a representative … (Cerrado). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2024.

MCLEOD, M.K; SUFARDI, S.; HARDEN, S. Soil fertility constraints and management to increase crop yields in the dryland farming systems of Aceh, Indonesia. Soil Research. v.59, n.1, n.68-82, 2021.

MARQUES, J. D. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. D. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 232-242, 2015.

MELO, V. S. de; MARQUES, J. D.; SILVA JÚNIOR, M. L. da; MEYER, L. F. F., DIAS; V. H. R.; AGUIAR, T. de S.; TEIXEIRA, O. M. M. Atributos físicos e químicos de solos sob diferentes tipos de uso e manejo no assentamento Abril Vermelho, Amazônia Oriental. **Conjecturas**, v.22, n.1, p79–97, 2021.

MIRANDA, B. M.; SILVA, A. R.; FALESI, I. C.; SCHWARTZ, G. Classificação e caracterização de solos em três diferentes tipos de manejo no Nordeste paraense. In: RIBEIRO, J. C.; SANTOS, C. A. dos (Org.). Competência técnica e responsabilidade social e ambiental nas ciências agrárias. Ponta D.de F.;Grossa, PR: **Atena Editora**, Cap.1, p. 1-10, 2020.

MOLINE, E. F.V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista Ciências Agrarias**., v.58, n.58, n.1, p.14-20, 2015.

OFOE, R.; THOMAS, RH.; ASIEDU, SK,; WANG-PRUSKI, G.; FOFANA, B.; ABBEY, L Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. Front. Plant Sci. 13:1085998, 2023.

OLIVEIRA, A.P.; CARVALHO, A.M.de; RONCHETI, E.F.S.; SECCADIO, L.L.; FERREIRA, L.V.M. Caracterização química e textural de solos sob diferentes manejos em área de assentamento da reforma agrária no Sudeste Paraense, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 1, 2021.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p.

**QAFOKU, N. P. Climate-change effects on soils. Advances in Agronomy, 2015.**

RODRIGUES, P. G.; RUIVO, M.de L.P.; PICCININ, J.L.; JARDIM, M. A. G. Contribuição dos atributos químicos do solo no desenvolvimento vegetativo do paricá em diferentes sistemas de cultivo. **Ciência Florestal**, v. 26, n.1, p. 59-68, 2016.

RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.;ABDALA, D.B.; EBULE, V.O.; THOSS, V.; WITHERS, P.J.A.;PAVINATO, P.S. Long-term land use and tillage influence on phosphorus interactions in tropical Oxisols. *Soil & Tillage Research*,V.229, 2023.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Surface application of lime with different magnesium contents and particle sizes under a no-till system. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, *39*(6), 1723-1736, 2015.

SANTOS, N. K. F. dos ; MELLO, A. H. de; SILVA, J. da S. S.; ARAUJO, E.V.N.; AMORIM, I. A.; MATOS, T. E. S.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, A. P. A ocupação territorial da Amazônia e do sudeste Paraense: Políticas e projetos de desenvolvimento, reforma agrária e impactos socioambientais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 18424-18439, 2020.

SILVA, M. de O.; VELOSO, C.L.; NASCIMENTO, D.L. do; OLIVEIRA, J. de; PEREIRA, D. de F.; COSTA, K. D. da S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SPOSITO, G. *The Chemistry of Soils*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2016. 272 p. ISBN 978-0190630881

VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; SANTOS, J. A. F.; ARANTES, S. A. C. M. Phosphorus adsorption in soils of tropical regions. 2021.