

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Adsorção de fósforo em novas áreas de uso agrícola no Brasil**

**Pedro Ernesto Ronzani**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba  
2023**

**Pedro Ernesto Ronzani**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Adsorção de fósforo em novas áreas de uso agrícola no Brasil**  
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **PAULO SERGIO PAVINATO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba**  
**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Ronzani, Pedro Ernesto

Adsorção de fósforo de solos em novas áreas de uso agrícola no Brasil / Pedro Ernesto Ronzani. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

76 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Adsorção de fósforo 2. Isoterma de Langmuir 3. Adubação 4. Solos tropicais  
I. Título

## **DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais, Hélio e Bernadete,**

pelo exemplo, carinho e dedicação com que criaram a mim e meus irmãos

**Aos meus irmãos, João e Estêvão,**

que apesar da distância sempre foram grandes companheiros

**À minha esposa, Priscila,**

por toda paciência, suporte e exemplo que é em minha vida

**À minha pequena Catarina,**

te esperamos ansiosamente, minha filha

***DEDICO***

## AGRADECIMENTOS

À sociedade paulista, que possibilita, através de sua incansável força de trabalho, há mais de 100 anos, a existência e manutenção da Universidade de São Paulo e da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, um dos campus fundadores da USP e minha alma mater.

À Universidade de São Paulo, que me acolheu há 14 anos atrás, e hoje, novamente, me acolhe em seu campus Luiz de Queiroz.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, que através de todos os seus docentes, funcionários e discentes, me proporcionaram esta oportunidade de crescimento técnico-científico, profissional e pessoal, e especialmente a seus docentes que, após mais de uma década, promoveram significativas melhorias e aproximação com a sociedade no departamento de Ciência do Solo.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato, por todo o suporte e apoio durante este período, e que, mesmo à distância muitas vezes, sempre esteve disponível e disposto a me auxiliar em todos os temas e fornecer seu suporte e amizade, orientação e aconselhamento sem medir esforços.

Aos companheiros de pós-graduação e laboratório João Henrique Luz, Augusto Leão, Mateus Sangiovo, e especialmente à Ana Paula Bettoni Teles, uma das melhores profissionais com quem tive o prazer de trabalhar e que, assim como os demais, foi fundamental nesta jornada e sem os quais este trabalho jamais seria concluído.

A todos os profissionais que me auxiliaram na busca pelas amostras de solo com as quais a realização deste trabalho foi possível, e a todos que me ajudaram, direta ou indiretamente, ao longo de todo o percurso que resultou nesta dissertação.

**Muito obrigado!**

“Quem todo quer, todo perde”

Ditado popular do Brasil colônia rememorado por Mary del Priore

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO .....  | 7  |
| ABSTRACT .....  | 8  |
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 9  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 13 |
| 2.1. Importância do fósforo para cultivo em solos tropicais .....                   | 13 |
| 2.2. Dinâmica da adsorção de P em solos tropicais .....                             | 15 |
| 2.3. Modelagem da adsorção de P em solos tropicais .....                            | 16 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....   | 19 |
| 3.1. Determinação das áreas de estudo e caracterização .....                        | 19 |
| 3.2. Caracterização das amostras de solo .....                                      | 30 |
| 3.2.1. Atributos químicos e físicos .....   | 30 |
| 3.2.2. Adsorção de P .....  | 30 |
| 3.2.3. Mineralogia .....  | 34 |
| 3.3. Isoterma de Langmuir .....   | 34 |
| 3.4. Isoterma de Freundlich .....   | 37 |
| 3.5. Ajuste dos modelos aos dados experimentais .....                               | 40 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 41 |
| 4.1. Atributos físico-químicos .....  | 41 |
| 4.2. Adsorção de P .....  | 49 |
| 4.3. Curva de CMAP para as amostras analisadas, segmentadas por classe de uso ..... | 56 |
| 4.4. Correlação do P-rem com o teor de Argila dos solos analisados .....            | 58 |
| 4.5. Correlação da CMAP com atributos dos solos analisados .....                    | 58 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 69 |
| REFERÊNCIAS .....   | 71 |

## RESUMO

### Adsorção de fósforo em novas áreas de uso agrícola no Brasil

O teor de fósforo (P) disponível nos solos é, sabidamente, um dos principais fatores limitantes à produção agrícola em solos tropicais. O objetivo deste estudo foi compreender e quantificar a capacidade de adsorção e a reatividade de diversos solos brasileiros ao P, com enfoque em novas áreas de abertura distribuídas ao longo de 12 estados brasileiros nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, compreendendo as ordens dos Latossolos, Argissolos, Neossolos e Plintossolos em dois sistemas de manejo, solos cultivados e não cultivados. Foram determinadas as seguintes características de cada amostra: teor de argila, silte e areia; teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), matéria orgânica (M.O.), pH, acidez potencial (H + Al), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação da CTC por cátions básicos (V%); e também os teores de Ferro e Alumínio com os extratores oxalato de amônio ( $Fe_{ox}$  e  $Al_{ox}$ ) e ditionito-citrato-bicarbonato ( $Fe_{DCB}$  e  $Al_{DCB}$ ). posteriormente, foi determinado o P remanescente (P-rem) no solo, e a partir deste resultado os solos foram classificados em três classes para serem determinadas diferentes concentrações de P em solução para estimativa da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP). Os pontos foram então ajustados às isotermas de Langmuir e Freundlich através da linearização das equações e através de método não-linear, com o auxílio da ferramenta *solver* do MS Excel. O uso dos modelos não-lineares permitiu um ajuste levemente superior das isotermas aos dados experimentais, porém não significativo ( $p < 0,05$ ). O modelo proposto por Freundlich apresentou ajuste também levemente superior aos pontos experimentais, porém não permite, como o modelo de Langmuir, a determinação da CMAP. Os dados de CMAP não apresentaram distribuição normal, e a correlação de Spearman entre a CMAP e os teores de  $Al_{ox}$  e  $Al_{DCB}$  foi significativa a  $p < 0,001$  tanto para solos cultivados como não cultivados, já com o  $Fe_{DCB}$  a correlação foi significativa a  $p < 0,05$ . O teor de argila, a M.O. e o  $Fe_{ox}$  apresentaram correlação significativa com a CMAP a  $p < 0,001$  para solos cultivados, e a  $p < 0,01$  para solos não cultivados.

Palavras-chave: Fósforo, CMAP, Amazônia, Cerrado

## ABSTRACT

### Phosphorus adsorption in new areas of agriculture in Brazil

Phosphorus (P) content in soils is known to be one of the main limiting factors to agricultural production in tropical and humid soils. This study aims to better understand and quantify the adsorption capacity and reactivity of several Brazilian soils with P, focusing on a wide territorial reach distributed throughout 12 Brazilian states in the North, Midwest and Northeast regions and comprising the orders of the Latosols, Argisols, Neosols and Plinthssols in two management systems, cultivated and uncultivated soils. The remaining phosphorous (P-rem) was determined in each sample extracted from the first 20 centimeters of the soil, and, based on these results the soils were classified into three classes to, subsequently, have 11 well distributed points of initial and final P concentration determined. The soil was stirred for 24 hours with the P solution for subsequent centrifugation and determination of the P content in the supernatant solution. The points were adjusted to the Langmuir and Freundlich isotherms by linearization of equations or by nonlinear method, using MS Excel solver tool. The use of nonlinear models allowed a slightly superior adjustment of isotherms to experimental data, but not significant ( $p < 0.05$ ). The model proposed by Freundlich presented adjustment also slightly superior to the experimental points, but does not allow, as the Langmuir model, the determination of the Maximum Phosphorus Adsorption Capacity (CMAP). The following characteristics of each sample were also determined: clay, silt and sand content; calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), organic matter (O.M.), pH, potential acidity (H + Al), cation exchange capacity (CTC) and CTC saturation by basic cations (V%); and finally, the iron and aluminum contents with the extractors ammonium oxalate ( $Fe_{ox}$  and  $Al_{ox}$ ) and dithionite-citrate-bicarbonate ( $Fe_{DCB}$  and  $Al_{DCB}$ ). The CMAP data did not present normal distribution, and Spearman's correlation between CMAP and  $Al_{ox}$  and  $Al_{DCB}$  contents was significant at  $p < 0.001$  for both cultivated and uncultivated soils, while with  $Fe_{DCB}$  the correlation was significant at  $p < 0.05$  and was not significant with pH. The clay content, O.M. and  $Fe_{ox}$  showed significant correlation with CMAP at  $p < 0.001$  for cultivated soils, and  $p < 0.01$  for non-cultivated soils.

Keywords: Phosphorus, CMAP, Amazon, Cerrado

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial para todas as formas de vida conhecidas e um suprimento adequado é necessário nos solos agrícolas para atender às demandas das culturas (DALY et al., 2015). O P em sua forma ânion fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) é constituinte de inúmeras moléculas essenciais para a estrutura, metabolismo e para o próprio código genético das plantas. Esta essencialidade torna-se ainda mais evidente em ambientes onde sua disponibilidade para as formas de vida é limitada.

Ambientes como os solos brasileiros tropicais possuem, geralmente, teores disponíveis de P muito baixos para as culturas em condições naturais, sendo que a partir desta deficiência se dá a necessidade de correção dos teores deste nutriente.

A baixa disponibilidade de P nos solos brasileiros se deve, majoritariamente, à reatividade dos solos com o fosfato. Esta reatividade se dá através de alguns mecanismos, geralmente associados ao grau de intemperismo dos solos e ao seu material de origem.

Segundo Novais & Smyth (1999), com o aumento do grau de intemperismo, o solo tende a se tornar mais eletropositivo, sua capacidade de troca catiônica efetiva cai junto com a saturação por cátions básicos, e a adsorção aniônica aumenta, tendo como resultado solos como os Latossolos, que são ácidos, lixiviados e muito pobres em P disponível. O intemperismo tende a aumentar a concentração de elementos mais estáveis na fração argila, notadamente oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, em detrimento a frações mais suscetíveis ao intemperismo como argilominerais do tipo 1:1 (caulinita, por exemplo) e, especialmente, argilominerais do tipo 2:1.

Este fenômeno é particularmente importante para este estudo, uma vez que solos intemperizados representam a maioria dos solos agricultáveis no Brasil, especialmente na amazônia e no cerrado brasileiro, e o entendimento da dinâmica do P nestes solos é muito relevante pela limitação que este nutriente pode imprimir à produtividade das culturas nestas condições. De acordo com o mapeamento de solos do Brasil, a ordem dos Latossolos, sozinha, compreende mais de 32% de toda a extensão do território brasileiro com solos, sendo a ordem mais expressiva, seguida pelos Argissolos, que representa pouco mais de 27% (Embrapa Solos, 2020). Nos biomas Cerrado e Amazônia, locais do presente estudo, se concentram solos com níveis de correção ainda baixos para o P, que apresentam o maior potencial de resposta à adubação corretiva com este nutriente.

Maior detalhamento sobre a proporção da dominância de algumas ordens de solo nos biomas amazônia e cerrado podem ser obtidos com um cruzamento dos dados geográficos do

mapa de solos do Brasil em escala exploratória 1:5.000.000 (Embrapa Solos, 2020) e a delimitação oficial dos biomas brasileiros na escala 1:250.000 (IBGE, 2021) mostra que argissolos e latossolos perfazem cerca de 67% do território do bioma amazônico brasileiro, respectivamente ocupando 153,9 milhões de hectares e 124,5 milhões de hectares. Já para o cerrado, temos latossolos, neossolos, argissolos e plintossolos representando, cada um, mais de 10% do território ocupado pelo bioma, somando 86% de sua área total, e ocupando, respectivamente: 81,9; 47,3; 24,3 e 20,8 milhões de hectares.

Embora tenhamos uma preponderância de solos altamente intemperizados no território brasileiro e, especialmente, nos biomas Amazônia e cerrado, este quadro de baixa disponibilidade de P às culturas pode ser revertido através do aporte de adubos fosfatados no sistema de produção, de tal modo que em regiões com agricultura praticada há décadas, regiões tidas como de agricultura consolidada, os solos normalmente apresentam teores de nutrientes adequados para as culturas, inclusive teores de P. Por outro lado, em áreas com menor nível de intensificação, como por exemplo regiões de pecuária extensiva, geralmente os teores são ainda muito próximos dos naturais do solo (próximo aos teores de áreas nativas) ou mesmo inferiores aos teores encontrados antes da conversão em pastagem (LANGE et al., 2019).

Estes solos com uso agrícola consolidado tiveram seus teores de nutrientes aumentados através de práticas como calagem, gessagem e adubação mineral ao longo do seu tempo de cultivo. Ainda assim, entendermos de maneira adequada e quantificar o potencial de reação dos solos com os nutrientes, notadamente o P, é tarefa imperativa para otimizar a correção dos teores deste nutriente nos solos amazônicos e do cerrado, além de prover melhor base para estimar a quantidade necessária do nutriente para que se atinjam as concentrações desejadas no solo. Demattê et al. (2022) afirma que a compreensão do espaço é primordial para pensar nas melhores estratégias de manejo para a agricultura brasileira, e que o foco em fertilizantes, sem considerar outras variáveis do solo, está mudando para um novo, mais holístico, paradigma. Desta forma o autor destaca a necessidade de pensar a agricultura como um sistema complexo e dinâmico, onde as relações entre solo-planta-ambiente e interferências antrópicas, como a mudança do uso do solo, adição de corretivos e fertilizantes e introdução de culturas comerciais, tornam o sistema ainda mais complexo e uma abordagem restritiva não é adequada para obtenção das melhores estratégias de manejo para a agricultura brasileira.

O conhecimento da relação de equilíbrio entre a fração adsorvida e a fração disponível de P é uma abordagem eficiente para auxiliar o entendimento das melhores estratégias de

adubação das culturas e, principalmente, elevação do teor deste nutriente nos solos. Esta relação de equilíbrio pode ser entendida através de abordagens como a determinação da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), que pode ser calculada através do ajuste de dados experimentais a isoterma de adsorção de Langmuir (SOUZA et al., 2017). Há ainda a possibilidade de descrever o comportamento da adsorção de P no solo ajustando dados experimentais a outros modelos com excelente performance, como a isoterma de Freundlich, que segundo Farias et al. (2009) prevê a energia de adsorção do P à uma superfície sólida decrescendo de maneira logarítmica à medida que a superfície é coberta pelo soluto, o que a diferencia da equação de Langmuir, que modela o comportamento soluto-superfície com a premissa de uma energia de adsorção constante.

Toda esta lógica de intensificação faz sentido quando se coloca em perspectiva a pressão que estes biomas vêm sofrendo nas últimas décadas.

Dados do MapBiomas (2020) mostram que hoje o bioma Amazônico e o Cerrado possuem uma área de uso agrícola, pecuário ou silvícola de mais de 150 milhões de hectares, representando cerca de 25% da área somada destes dois biomas (619 milhões de hectares). Considerando esta ocupação desde 1985 e utilizando dados (já à época disponíveis) do satélite Landsat 5, pode ser observada a transição do tipo de cobertura vegetal nestes dois biomas de cobertura natural (florestas, savanas, campos abertos, entre outros) para áreas de exploração agrossilvipastoril ao longo de toda esta série histórica, com uma expansão da ordem de 2,15 vezes entre o começo da série e o ano de 2021.

Em 1985, a região apresentava uma área total com uso agrícola, pecuário ou ainda silvícola de cerca de 69,8 milhões de hectares. Grande parte da expansão no período supramencionado deu-se em áreas de formação florestal (55,5 milhões de hectares convertidos, ou cerca de 69% da expansão) e de formação savânica (18,5 milhões de hectares, ou 23%), formações que ocorrem dentro dos limites dos dois biomas, embora o bioma amazônico seja marcado por formações florestais (ocupando 88% do bioma em 1985), e o bioma cerrado, por sua vez, marcado por formações savânicas (formação que ocupava aproximadamente 38% do cerrado em 1985, ante 18% de formações florestais e 32% do território já antropizado à época). É importante destacar que desta área transformada, apenas uma parcela hoje tem uso agrícola, o maior vetor de transformação do uso do solo é a conversão em pastagens. De toda a área que foi convertida em uso agrossilvipastoril desde 1985, 75% foram transformadas em pastagens e apenas 18% em agricultura (os 7% restantes são classificados hoje ou como florestas plantadas – 2%, ou como mosaico de agricultura e

pastagem – 5%). Ainda dentro deste período, cerca de 7,7 milhões de hectares foram convertidos de pastagens para agricultura.

Em 2020 foram detectados mais de 100 milhões de hectares de pastagens nestes dois biomas, área que compõe um grande banco de terras parcialmente sub-explorado. Dados, também do MapBiomas (2020), nos ajudam a entender a qualidade destas pastagens através de três níveis de degradação (severa, moderada e sem degradação) cabendo destacar que, para estes dois biomas (Amazônia e Cerrado), 13% do total da área de pastagem está no nível de degradação severa (13 milhões de hectares), 37% no nível moderado (38 milhões de hectares) e 50% no nível sem degradação (51,6 milhões de hectares). Estas áreas altamente degradadas estão concentradas em regiões com baixa capacidade produtiva cujas limitações produtivas estão associadas principalmente à textura dos solos (muito arenosa), baixa capacidade de retenção de água, temperaturas elevadas e alta incidência de veranicos (períodos sem precipitação dentro da janela de cultivo).

Apesar de muitas vezes apresentarem limitações para intensificação através da agricultura, estas áreas têm potencial para ampliar a produção agrícola brasileira, e por isso a melhor compreensão das regiões onde este tipo de uso do solo mais se concentra é imperativa como arcabouço técnico para sua intensificação. Deste modo, a determinação da CMAP permite um entendimento bastante prático do potencial de adsorção de P destes solos e pode auxiliar na geração de recomendação de uso racional do nutriente para correção de seus teores no solo até níveis considerados suficientes, o que impacta diretamente no potencial produtivo destas regiões. Desta maneira, um estudo amplo em termos territoriais é uma importante fonte de informação para tomada de decisão e auxílio na intensificação do uso do solo.

O presente trabalho focou na coleta de amostras de solo de uso agrícola ou solos não antropizados (cobertura nativa), em diversas regiões do centro-norte brasileiro, abrangendo os biomas cerrado e amazônia e compreendendo 12 diferentes estados, de modo a possibilitar o estudo do comportamento do P nestes solos, bem como mensurar outras características do solo do ponto de vista físico, químico e mineralógico que possam afetar a disponibilidade do P às plantas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Importância do fósforo para cultivo em solos tropicais

O P como íon fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) é uma molécula integrante de diversos compostos importantes em células vegetais, tais como: fosfato-açúcares, intermediários da respiração e fotossíntese, fosfolipídios que compõe as membranas celulares, além de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (ATP) e no DNA e RNA (TAIZ; ZEIGER, 2013). Esta essencialidade é evidenciada em ambientes com restrição de disponibilidade do nutriente, tal como solos altamente intemperizados onde, devido à concentração de argilominerais altamente reativos com o fosfato, a disponibilidade deste nutriente às plantas é altamente restrita.

Esta dinâmica é particularmente importante no Brasil, uma vez que boa parte do território está sob condições de forte intemperismo (condições de elevadas temperaturas e precipitação), com exceções no semiárido nordestino e regiões de elevadas altitudes do sul e sudeste, segundo mapeamento feito por Fontes (2015). Este mesmo autor ainda conclui que é de se esperar solos intensamente lixiviados e mais desenvolvidos nestas regiões de intemperismo forte, como Latossolos e Argissolos.

Ainda nesta linha, segundo Novais e Smyth (1999) solos intensamente intemperizados apresentam uma dinâmica particular com o P, uma vez que a forma disponível para as plantas, os íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , apresentam forte interação com a fração coloidal, notadamente os óxidos de ferro e alumínio. Os mesmos autores ainda consideram que esta interação se dá de forma mais ou menos intensa, e é regulada por fatores como a própria mineralogia do solo, pH, teor de P aportado, e tempo de reação. A tendência, com o passar do tempo, é que o fosfato forme ligações cada vez mais fortes com a fração argila, que passam a ser irreversíveis em condições naturais. É comum que cerca de 90% do P seja fixado logo na primeira hora de contato com o solo, embora a reação possa durar ainda por dias ou meses (SANCHEZ; UEHARA, 1980). Esta interação faz com que o P aplicado no solo possua baixa eficiência agronômica, e quanto maior a superfície de contato, mais rápida é a reação de adsorção. Solos com baixos teores de P disponível apresentam esta característica como um dos principais fatores limitantes à produtividade das culturas.

O manejo de P em solos tropicais pode ser subdividido em práticas corretivas, que seriam necessárias apenas uma única vez caso a estratégia adotada seja de correção total, e práticas de manutenção, feitas geralmente de forma anual nas culturas. Solos sem correção de

P apresentam, muitas vezes, um baixo estímulo ao crescimento e multiplicação de raízes, por isso práticas corretivas são importantes, a fim de garantir uma maior exploração inicial do volume de solo pelas culturas e, conseqüentemente, melhorando a disponibilidade de outros nutrientes e também de água (AMY BONSER; LYNCH, 1996; DREW, 1975; GERSANI; SACHS, 1992; LYNCH; BEEBE, 1995; LYNCH; BROWN, 2001).

Nas regiões dos biomas Cerrado e Amazônia, além dos solos altamente intemperizados, o regime pluviométrico apresenta sazonalidade semelhante, com períodos de seca e de chuvas bem definidos. A safra ocorre durante o período úmido, e este período é caracterizado pela ocorrência de intervalos sem precipitação, os chamados veranicos, em maior ou menor intensidade e frequência de acordo com a localidade dentro do bioma (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008). Durante estes períodos, uma exploração adequada do perfil do solo pelas raízes permite um melhor uso da água disponível e constitui estratégia para mitigar o impacto de períodos sem precipitação.

Uma dimensão da preponderância de solos altamente intemperizados no território brasileiro, como Latossolos, Argissolos e Plintossolos, pode ser observada na tabela 1, onde foi calculada a área de cada ordem de solo de acordo com o mapeamento exploratório de solos da Embrapa. Nesta tabela vemos que quase um terço de todo o território nacional coberto por solos tem como ordem dominante os Latossolos, seguida por proporção quase igual para Argissolos. Estes são solos que, por definição, apresentam baixa fertilidade química, notadamente um nível de saturação de sua capacidade de retenção de cátions (CTC) inferior a 50%, o que os classifica como distróficos, característica fruto de seu alto nível de intemperismo.

Tabela 1 - Área coberta por cada ordem de solo no Brasil.

| <b>ORDEM</b>           | <b>Área (ha)</b>   | <b>% do território brasileiro</b> |
|------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Latossolos             | 268.156.980        | 32,2                              |
| Argissolos             | 228.537.327        | 27,4                              |
| Neossolos              | 112.259.415        | 13,5                              |
| Plintossolos           | 58.970.137         | 7,1                               |
| Cambissolos            | 44.654.435         | 5,4                               |
| Gleissolos             | 39.764.164         | 4,8                               |
| Luvissolos             | 24.190.800         | 2,9                               |
| Planossolos            | 22.655.986         | 2,7                               |
| Espodossolos           | 16.750.652         | 2,0                               |
| Nitossolos             | 9.653.248          | 1,2                               |
| Chernossolos           | 3.720.603          | 0,4                               |
| Vertissolos            | 1.763.087          | 0,2                               |
| Afloramentos de rochas | 1.082.755          | 0,1                               |
| Dunas                  | 430.103            | 0,1                               |
| Organossolos           | 223.132            | 0,0                               |
| <b>TOTAL</b>           | <b>832.812.823</b> | <b>100,0</b>                      |

Fonte: Embrapa Solos (2020)

## 2.2. Dinâmica da adsorção de P em solos tropicais

A disponibilidade de P nos solos é regulada por inúmeros fatores, como: material de origem, estágio de intemperismo (NOVAIS; SMYTH, 1999), mineralogia, pH, teor de matéria orgânica, entre outros (DE CAMARGO et al., 2010; NOVAIS et al., 2007). O fator intemperismo contribui para a remoção de elementos químicos e para a formação de novos materiais, sendo comum a perda de compostos mais facilmente solubilizados, contendo silício e cátions básicos (RAIJ, 2011). Segundo Kämpf, Curi, e Marques (2019) o processo de remoção de silício dos minerais do solo através da hidrólise faz com que os minerais primários sejam despolimerizados, ocasionando a liberação de  $H_4SiO_4$  e cátions básicos. Sob condições intensas de intemperismo, boa parte do Si é lixiviado, e a fração que precipita o faz sob a forma de caulinita, além da formação de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, sendo a natureza e a frequência dos minerais precipitados diretamente dependentes das condições de

pluviometria e drenagem. Estes minerais formados sob forte intemperismo possuem sítios de ligação com forte afinidade pelo fosfato (SPOSITO, 2008).

A área específica dos argilominerais é fator determinante para a densidade de sítios com atividade iônica e, conseqüentemente, capacidade de adsorção. Em revisão publicada por Gérard (2016), foram levantados dados de área superficial específica para a caulinita variando entre 9,1 e 44 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, predominando valores próximos ao limite inferior, e valores entre 40 e 120 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> para óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Gibbsita, Goethita e Hematita). Esta grande área superficial específica dos sesquióxidos os faz ter uma capacidade de adsorção de fosfato muito superior à da caulinita, o que explica uma variabilidade na CMAP mesmo em situações com teor de argila semelhantes em solos muito intemperizados. Se o solo tiver um caráter mais oxidico tenderá a ter uma CMAP maior do que a de um solo com caráter mais caulínítico, porém de teor de argila semelhante. Ainda, foram encontrados valores de capacidade de ligação de fosfato (em mg P mg<sup>-1</sup>) até mil vezes superiores em óxido pouco cristalinos de Al (Bohemita) quando comparado com caulinita (GÉRARD, 2016).

Complementarmente, o fator tempo promove uma ligação mais forte entre o fosfato e a fração argila do solo. Mais de 90% do P aplicado pode ser fixado logo na primeira hora de contato com o solo (GONÇALVES et al., 1989), e esta primeira fase é seguida, então, por uma segunda, bem mais lenta (NOVAIS et al., 2007). Esta cinética de adsorção do P foi estudada por diversos autores e, segundo Novais, Smyth e Nunes, (2007), esta adsorção em fases é caracterizada por uma atração eletrostática inicial bastante rápida do ânion fosfato à superfície dos argilominerais e que com a aproximação do P à superfície adsorvente, ocorre uma troca de ligantes com a formação de ligações coordenadas simples. A segunda fase, mais lenta, envolve a formação de uma ligação adicional à primeira, chamada de ligação bidentada ou binuclear, pela troca de mais um ligante OH<sup>-</sup> da superfície do mineral por um oxigênio do fosfato, formando uma ligação irreversível e compondo a fração de P não-lábil do solo (HINGSTON; POSNER; QUIRK, 1974; MUNNS; FOX, 1976; PARFITT; RUSSELL, 1977).

### **2.3. Modelagem da adsorção de P em solos tropicais**

A cinética de interação entre o P e os argilominerais é frequentemente descrita através das isotermas propostas por Langmuir (1918) e Freundlich et al. (1906). Segundo Olsen e Watanabe (1957), a isoterma de Langmuir se ajustou melhor à experimentos para avaliação da adsorção de P com soluções diluídas e permite uma abordagem teórica sobre indicadores de

retenção de P no solo. Dentre estes fatores, os autores citam a possibilidade de determinação de uma constante relacionada à capacidade máxima de adsorção de P (CMAP). Holford, Wedderburn e Mattingly (1974), chegaram a conclusão semelhante estudando solos da Inglaterra e do leste australiano, onde a isoterma de Langmuir foi um excelente modelo para descrever o processo de adsorção de P ao solo utilizando soluções de baixa concentração e assumindo que o processo acontece em duas fases com energias de ligação contrastantes.

A isoterma de Langmuir é uma função hiperbólica descrita pela equação  $Q = abC/(1 + aC)$ , em que C é a concentração de P na solução de equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ), Q é a quantidade de P adsorvido ao solo ( $\text{mg g}^{-1}$ ), b é a capacidade máxima de adsorção de P ( $\text{mg g}^{-1}$ ) e a é a constante relacionada com a energia de adsorção ( $\text{L mg}^{-1}$ ) de P ao solo (DE FARIAS et al., 2009).

Dentre os principais indicadores utilizados para caracterizar o comportamento adsorptivo do solo, podemos destacar a CMAP e a capacidade tampão do solo (CT) ou fator capacidade de P (FCP). O FCP ou poder tampão de fosfato, é definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P-lábil (Q) e o P em solução (I) e representa uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P em solução. As características e o teor dos constituintes minerais da fração argila são responsáveis pela velocidade do processo de passagem do P lábil para o P não-lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999). Os autores, citando Novais e Kamprath (1978) e Ozanne (1980), ainda consideram que este equilíbrio entre as duas frações de P (relação Q/I) é razoavelmente constante, sendo uma propriedade intrínseca do solo. Segundo Broggi et al. (2011), as características dos solos que melhor refletem o FCP foram o P remanescente (P-rem), CMAP e teor de argila.

A CMAP é um parâmetro bastante útil para caracterizar a capacidade total de adsorção de P de um solo (MENOTTI et al., 2014). A quantidade máxima de adsorção de P de um dado solo é interpretada, geralmente, como uma constante, e trata-se do máximo da fração P-lábil (Q) do solo.

Isotermas de adsorção de P têm sido amplamente utilizadas para caracterizar o status do P e para estabelecer a necessidade de fertilizantes fosfatados nos solos (ANGHINONI; BALIGAR; WRIGHT, 1996). Com base nisto, a modelagem do comportamento adsorptivo do P em solos é imprescindível para uma boa compreensão da dinâmica deste nutriente em diferentes faixas de concentração, o que permite entender qual o comportamento esperado para o P ao longo de diversas concentrações iniciais.



### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Determinação das áreas de estudo e caracterização**

A determinação das áreas de interesse para este estudo seguiu uma avaliação do mapeamento de uso da terra no Brasil (IBGE, 2020a), onde 15 classes de uso do solo são determinadas pelo processamento de diversas imagens do sensor OLI/Landsat-8 associadas a insumos complementares, como a Base Cartográfica Contínua do IBGE (BC250) e o mapa de vegetação do IBGE (IBGE, 2020b), para se chegar à classificação final revisada.

As áreas selecionadas ficam em novas frentes de expansão agrícola nos biomas Cerrado e Amazônia, com objetivo de obter-se ao menos duas amostras de solo por região, sendo: 1) Pontos sob vegetação nativa, ou seja, solos não antropizados (e na ausência ou alta dificuldade de obtenção de amostra de solo não antropizado, a amostra foi coletada em área de pastagem sob manejo extensivo), e 2) Pontos em áreas de agricultura consolidada.

Estas regiões estão mapeadas e descritas na figura 1a e 1b, onde é possível observar sua sobreposição com duas camadas. Na figura 1a pode ser observada a distribuição dos pontos em comparação com o uso do solo em parte do território nacional, o que ajuda a ilustrar a distribuição das áreas de pastagens em relação aos pontos amostrados. Já na figura 1b, temos a mesma sobreposição dos pontos amostrados, porém com os diferentes biomas brasileiros.

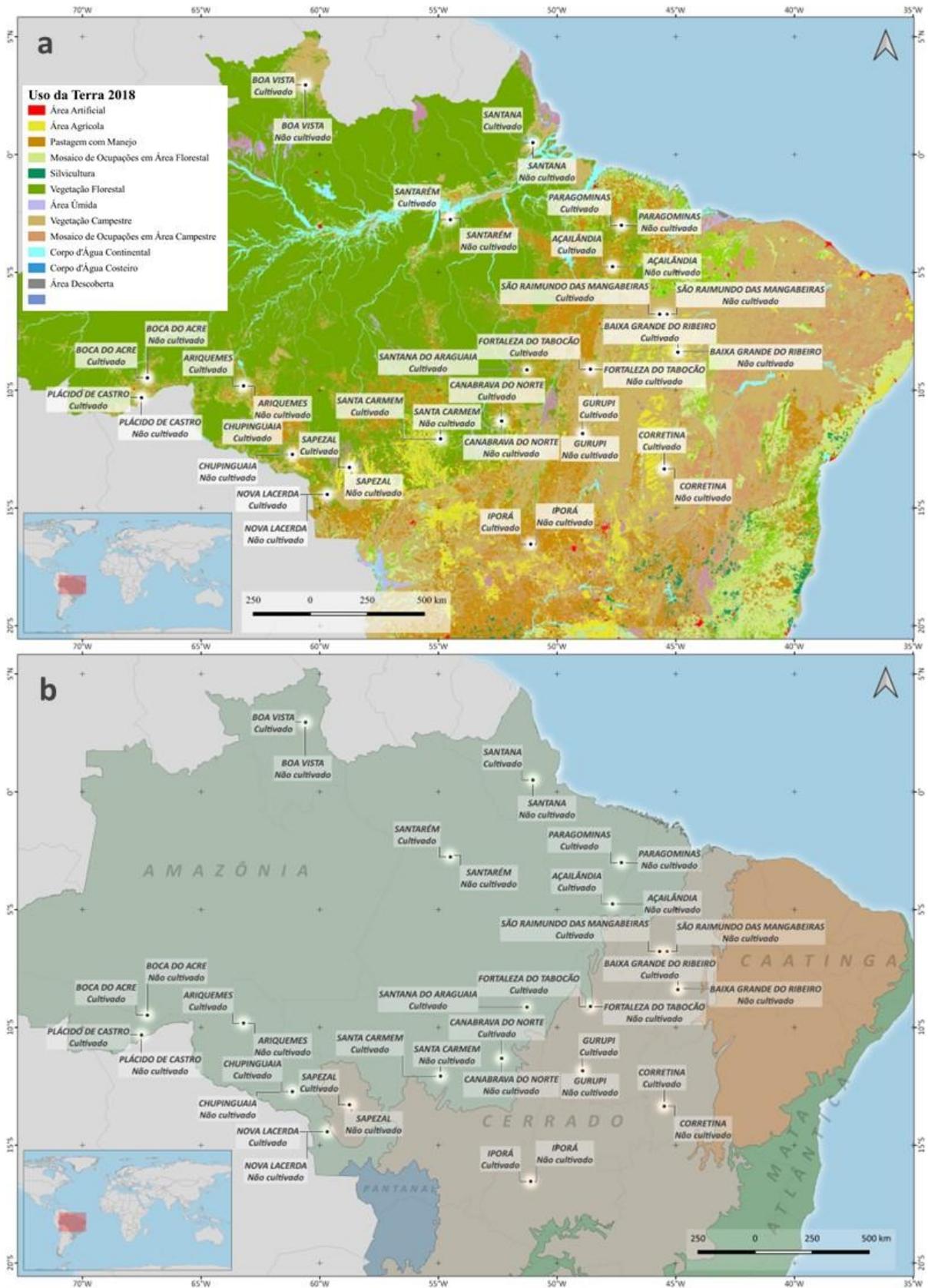


Figura 1 - Distribuição dos pontos amostrados em relação à classificação de uso do solo no Brasil (1a) e em relação aos biomas brasileiros (1b)

Fonte: IBGE (2018)

Após a determinação das áreas de interesse, que resultaram em 40 distintos pontos amostrais, seguiu-se a amostragem através de parceria com inúmeras instituições e profissionais que auxiliaram a execução desta fase do projeto. Todos foram orientados quanto à metodologia de coleta de subamostras para compor cada ponto amostral e determinação da coordenada do local.

As amostras foram coletadas com o uso de uma pá de corte e retiradas da camada superficial de 0-20 cm (Figura 2). Cada amostra foi composta por oito subamostras coletadas todas a distâncias próximas entre si, com a finalidade de melhor representar a região e minimizar potenciais fontes de contaminação. As subamostras foram homogeneizadas em um balde e posteriormente acondicionadas em embalagem plástica com identificação de: nome do amostrador; município da coleta; coordenadas geográficas; tipo de uso do solo; observações. A metodologia de amostragem foi embasada no que está preconizado no *Manual de descrição e coleta do solo no campo* (SANTOS et al., 2005). Após o acondicionamento as amostras foram enviadas todas às dependências da ESALQ-USP, de modo que fossem todas posteriormente analisadas no mesmo laboratório.

Na figura 2 podem ser observadas algumas fotos dos locais de coleta em diferentes regiões, com diferentes tipos de uso do solo. Na tabela 2 está uma descrição detalhada de todos os pontos amostrados, com município, UF, o responsável pela amostragem e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada ponto.



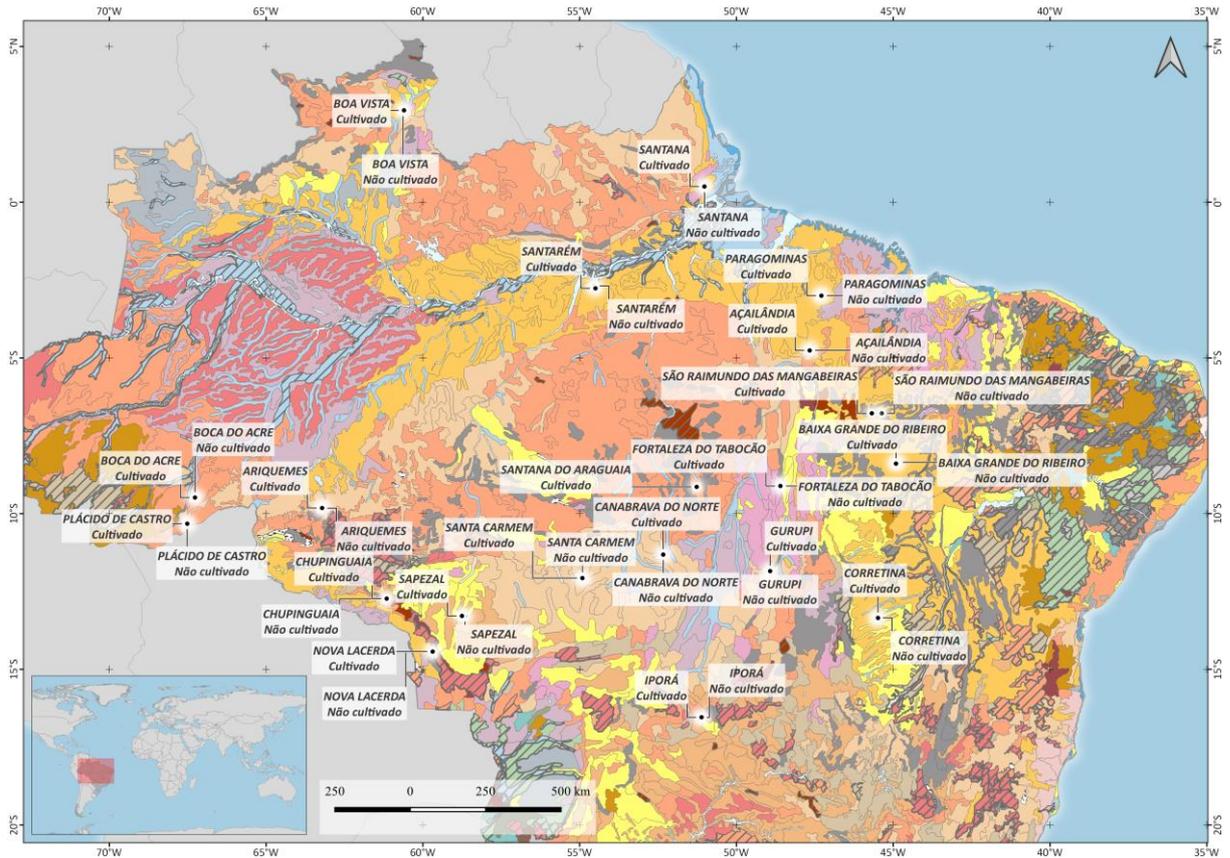
Figura 2 - Detalhe de alguns pontos onde foram coletadas as amostras do município de Gurupi – TO em área de agricultura (2a) e de mata nativa (2b), e no município de Iporá – GO em área de agricultura (2c – coleta realizada na entressafra, com capim de cobertura instalado) e de mata nativa (2d).

Tabela 2 – Municípios dos pontos amostrados e sua localização em função do tipo de uso do solo

| MUNICÍPIO                    | UF | Sem cultivo |          | Cultivo  |          |
|------------------------------|----|-------------|----------|----------|----------|
|                              |    | Lat         | Long     | Lat      | Long     |
| Açailândia                   | MA | -4,7589     | -47,6614 | -4,7589  | -47,6614 |
| Ariquemes                    | RO | -9,824      | -63,2172 | -9,8196  | -63,213  |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI | -8,3463     | -44,8633 | -8,3936  | -44,9098 |
| Boa Vista                    | RR | 2,9384      | -60,6292 | 2,9532   | -60,5999 |
| Boca do Acre                 | AM | -9,4836     | -67,2669 | -9,4836  | -67,2669 |
| Canabrava do Norte           | MT | -10,3238    | -67,5187 | -10,3242 | -67,5134 |
| Chupinguaia                  | RO | -12,7396    | -61,153  | -12,7295 | -61,1531 |
| Correntina                   | BA | -13,3454    | -45,5005 | -13,3498 | -45,483  |
| Fortaleza do Tabocão         | TO | -9,1115     | -48,5908 | -9,112   | -48,5959 |
| Gurupi                       | TO | -11,8466    | -48,9224 | -11,8451 | -48,9228 |
| Iporá                        | GO | -16,5428    | -51,1195 | -16,5398 | -51,1109 |
| Nova Lacerda                 | MT | -14,4347    | -59,6808 | -14,4308 | -59,6851 |
| Paragominas                  | PA | -3,0007     | -47,2881 | -3,0007  | -47,2881 |
| Plácido de Castro            | AC | -10,3238    | -67,5187 | -10,3242 | -67,5134 |
| Santa Carmem                 | MT | -12,0603    | -54,9082 | -12,0698 | -54,9103 |
| Santana                      | AP | 0,1541      | -51,3614 | 0,1404   | -51,3799 |
| Santana do Araguaia          | PA | -9,141      | -51,2671 | -9,141   | -51,2671 |
| Santarém                     | PA | -2,685      | -54,5293 | -2,7637  | -54,4948 |
| São Raimundo das Mangabeiras | MA | -6,7768     | -45,3656 | -6,7779  | -45,6797 |
| Sapezal                      | MT | -13,2939    | -58,6547 | -13,2856 | -58,7517 |

Nota: Nos casos em que não foi possível a obtenção de amostra em área de solo nativo, não antropizado, foi coletada amostra em área de pastagem extensiva. As áreas de cultivo eram cultivadas com soja como cultura principal, e milho ou culturas de cobertura na sucessão da soja

Apesar de não ter sido feita a classificação do tipo de solo em cada ponto amostral, é possível fazer uma inferência da ordem mais provável de solos com o cruzamento entre as coordenadas geográficas coordenadas e o mapa de solos disponibilizado pela Embrapa, Embrapa Solos (2020). Na figura 3 podemos observar as diferentes ordens de solo em toda a região do estudo, bem como os pontos representando onde foi feita cada coleta de solo.



**Classes de Solos 1:5.000.000**

- FFc1 - Plintossolos Petricos Concrecionarios
- FFc18 - Plintossolos Petricos Concrecionarios + Cambissolos Haplicos Tb Distroficicos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- LAd1 - Latossolos Amarelos Distroficicos
- LAd10 - Latossolos Amarelos Distroficicos + Plintossolos Petricos Concrecionarios
- LAd32 - Latossolos Amarelos Distroficicos + Neossolos Quartzarenicos Orticos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- LAd5 - Latossolos Amarelos Distroficicos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- LAd8 - Latossolos Amarelos Distroficicos + Gleissolos Haplicos Tb Distroficicos
- LVAd11 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Plintossolos Petricos Concrecionarios
- LVAd19 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Latossolos Vermelhos Distroficicos + Neossolos Quartzarenicos Orticos
- LVAd3 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Latossolos Vermelhos Distroficicos
- LVAd40 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Cambissolos Haplicos Tb Distroficicos + Neossolos Litolicos Distroficicos
- LVAd5 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- LVd22 - Latossolos Vermelhos Distroficicos + Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Neossolos Quartzarenicos Orticos
- PVAd4 - Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- PVAd45 - Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutroficicos + Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficicos
- PVAd9 - Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficicos + Cambissolos Haplicos Tb Distroficicos
- PVe2 - Argissolos Vermelhos Eutroficicos + Nitossolos Vermelhos Eutroficicos
- RLd8 - Neossolos Litolicos Distroficicos + Plintossolos Petricos Concrecionarios
- RQg1 - Neossolos Quartzarenicos Hidromorficos

Figura 3 - Classes de solos dominantes e associados, de acordo com Embrapa Solos (2020), nas regiões onde foram coletadas as amostras do presente estudo.

Fonte: Embrapa Solos (2020)

Cada ponto de área cultivada foi submetido a uma análise de padrão de comportamento temporal de vegetação através do processamento de dados sensor MODIS para o período compreendido entre 2004 e 2022 com a finalidade de obter a detecção de quando o padrão de uso do solo mudou de vegetação nativa ou pastagem para agricultura. A metodologia utilizada consistiu na comparação das séries temporais obtidas com a biblioteca de padrões disponível no Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg) da Embrapa e a metodologia descrita por Galford et al. (2008). O método consiste na extração de uma série temporal dos valores de NDVI (*normalized difference vegetation index*) quinzenais obtidos pelo satélite MODIS e disponibilizado pela NASA, para posterior processamento desta série de modo a indicar, para cada um dos anos que a compõe, se houve cultura agrícola na área ou não. O padrão de mudança de uso do solo de vegetação nativa ou pastagem para agricultura é bem definido, conforme a figura 4, a seguir:

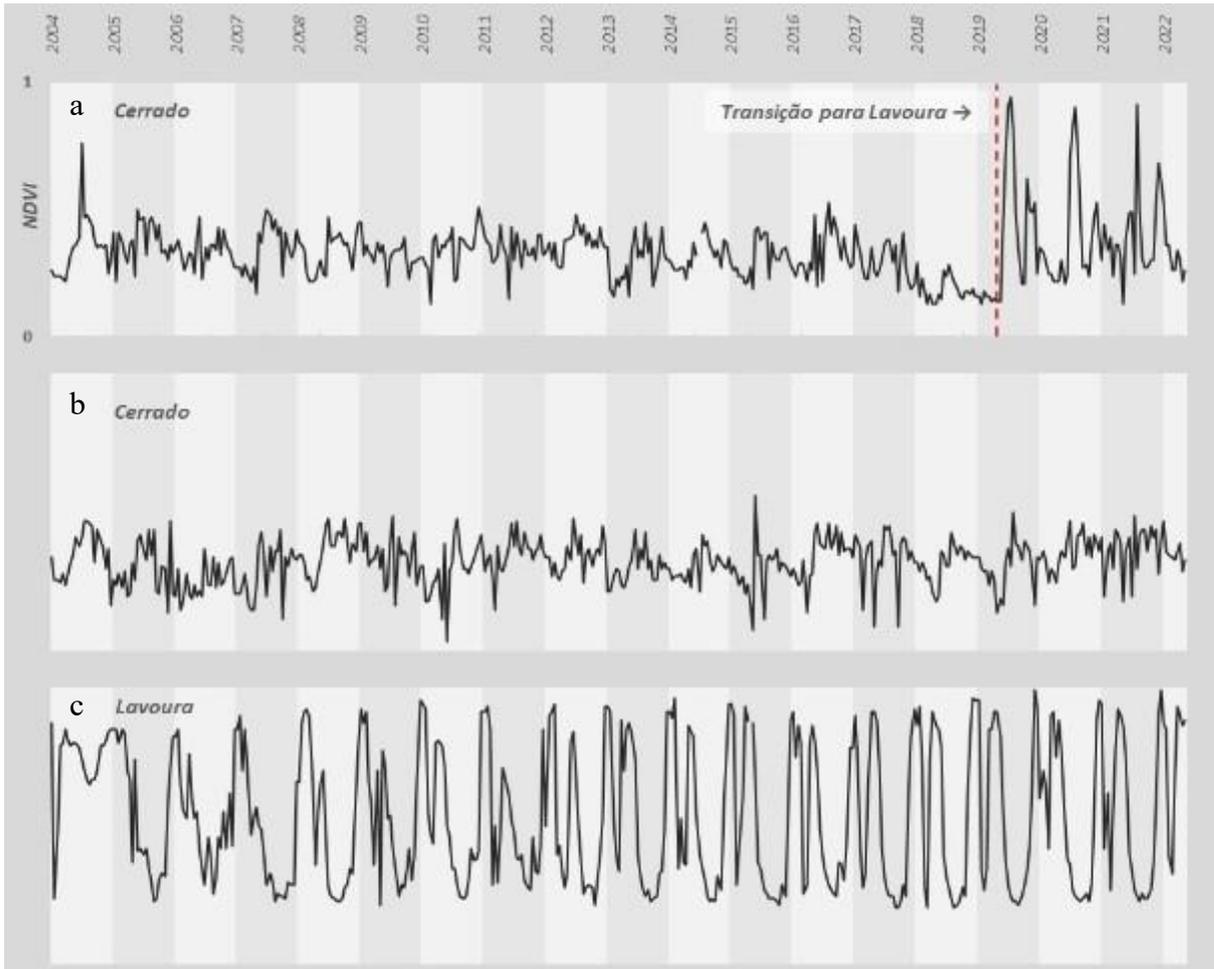


Figura 4 - Padrões de comportamento temporal da cobertura vegetal de diferentes tipos de uso do solo. Transição de cerrado para lavoura na safra de 2019-2020 (3a); Padrão contínuo de cerrado durante a série observada (3b); Padrão contínuo de lavoura durante toda a série analisada (3c).

Fonte: Autor

Na figura 5a está expresso o resultado do cálculo da amplitude (diferença entre o valor máximo e o mínimo de NDVI em dado ano) obtendo-se ao final um histograma de distribuição bimodal dos valores de amplitude anual, considerando todos os pontos amostrados e com dados calculados entre os anos de 2004 e 2022, além do histograma (de distribuição também bimodal) de desvio padrão (Figura 5b), onde pode-se observar o quão variável foi o vigor de vegetação em dado ano, sendo altos valores de desvio padrão associados com o uso agrícola, como já foi ilustrado na figura 4c (picos altos de vigor vegetativo seguidos de vales profundos de vigor vegetativo muito baixo).

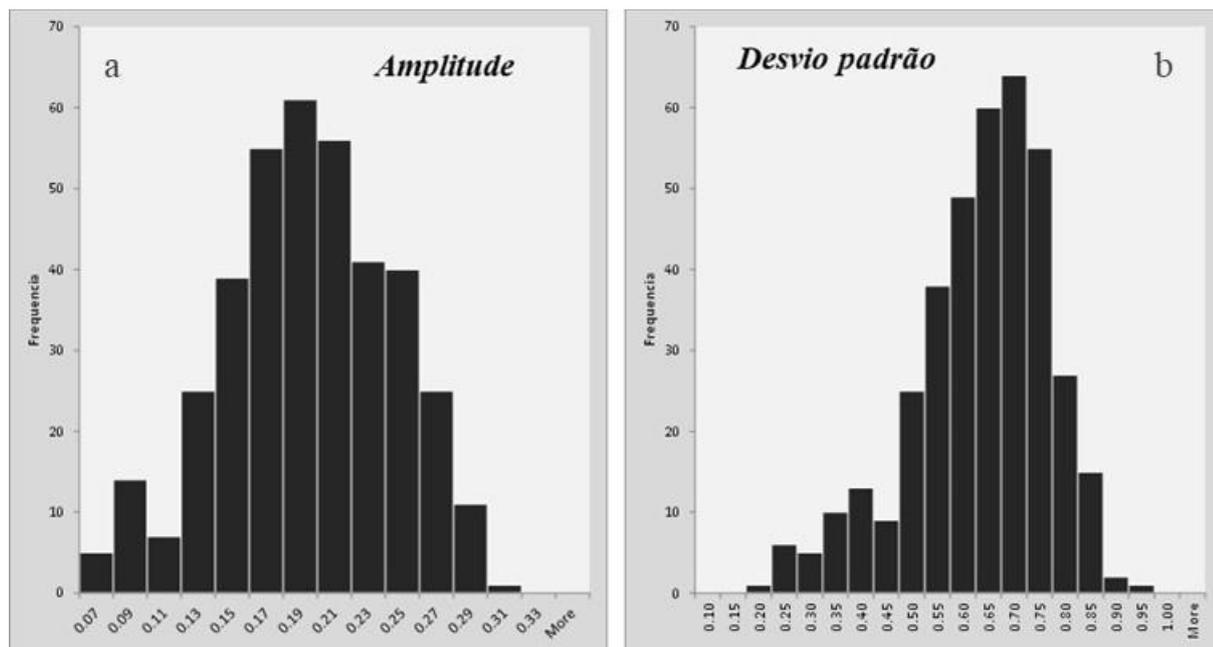


Figura 5 –Histograma da amplitude (figura 5a) e do desvio padrão (figura 5b) do NDVI calculado nas coordenadas das amostras de área agrícola.

Fonte: Autor

Foi analisada toda a série histórica disponível (desde o ano de 2004) e foi considerado o ano inicial da transição do uso do solo (de área de mata ou de pastagem para uso agrícola) o ano que apresentou um desvio padrão dos valores quinzenais de NDVI superior a 0,13, além de amplitude (valor máximo observado subtraído do valor mínimo) superior a 0,45. Caso um determinado ano tenha atendido estas duas condições, ele é considerado como um ano agrícola.

Houve cinco casos em que um ano de agricultura foi seguido por um ou mais anos de outro uso não agrícola do solo. Isso pode ocorrer devido ao baixo potencial produtivo da lavoura em um dado ano, abandono da área ou retorno para pastagem. Nestes casos, foi feita uma correção nos dados de maneira manual com observação de imagens de satélites de média resolução. O tempo de cultivo obtido para cada ponto de área cultivada está descrito na tabela 3, assim como o primeiro ano de detecção de cultura agrícola.

Tabela 3 - Tempo de cultivo de cada um dos pontos com uso do solo agrícola consolidado.

| <b>MUNICÍPIO</b>             | <b>UF</b> | <b>1º Ano</b> | <b>Idade</b> |
|------------------------------|-----------|---------------|--------------|
| Açailândia                   | MA        | 2006          | 17 ou mais   |
| Ariquemes                    | RO        | 2019          | 4            |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI        | 2013          | 10           |
| Boa Vista                    | RR        | 2021          | 2            |
| Boca Do Acre                 | AM        | 2010          | 13           |
| Canabrava do Norte           | MT        | 2012          | 11           |
| Chupinguaia                  | RO        | 2009          | 14           |
| Corretina                    | BA        | 2006          | 17 ou mais   |
| Fortaleza do Tabocão         | TO        | 2006          | 17 ou mais   |
| Gurupi                       | TO        | 2016          | 7            |
| Iporá                        | GO        | 2016          | 7            |
| Nova Lacerda                 | MT        | 2006          | 17 ou mais   |
| Paragominas                  | PA        | 2006          | 17 ou mais   |
| Plácido de Castro            | AC        | 2021          | 2            |
| Santa Carmem                 | MT        | 2006          | 17 ou mais   |
| Santana                      | AP        | 2006          | 17 ou mais   |
| Santana do Araguaia          | PA        | 2015          | 8            |
| Santarém                     | PA        | 2006          | 17 ou mais   |
| São Raimundo das Mangabeiras | MA        | 2006          | 17 ou mais   |
| Sapezal                      | MT        | 2006          | 17 ou mais   |

Os pontos amostrados têm idade de cultivo variando entre 2 (pontos de Boa Vista – RR, e Plácido de Castro – AC) e 17 anos ou mais (10 pontos). Mesmo tratando as regiões amostradas como “novas fronteira”, observamos o predomínio de áreas com mais de 10 anos de cultivo, o que permite inferir que áreas ainda sub-exploradas provavelmente têm outras restrições de uso, seja de ordem ambiental, pedológica ou outras.

## **3.2. Caracterização das amostras de solo**

### **3.2.1. Atributos químicos e físicos**

As amostras coletadas tiveram suas características químicas e físicas determinadas seguindo metodologia recomendada para o estado de São Paulo, descritas em Raij et al. (2001), realizadas nos laboratórios de rotina de análises de solo da ESALQ-USP.

Foram determinados: pH em  $\text{CaCl}_2$ ; Ca, Mg e Al por  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ ; P e K por resina; H + Al pelo método SMP; Matéria Orgânica pelo método colorimétrico. Além de calculados: Saturação por Al = m%; CTC pelo somatório de cátions e  $\text{H}^+$  do solo (K + Ca + Mg + H + Al); e V% = porcentagem da CTC ocupada por K, Mg e Ca trocável. A determinação da granulometria das amostras foi feita após o peneiramento em peneiras de malha 2mm das amostras de terra fina seca ao ar (TFSA).

### **3.2.2. Adsorção de P**

As amostras foram submetidas a análise de P-rem com a finalidade de segmentá-los em classes de adsorção de P através de metodologia mais simples, para que então fossem estimados os pontos de concentração de P para determinação da CMAP. A metodologia proposta por Alvarez et al. (2000) foi modificada e utilizada para determinação de 3 grupos de solos com base em similaridade dos resultados do P-rem, conforme descrito na tabela 4, na coluna “grupos”.

Tabela 4 - Resultados de P-rem e agrupamento das amostras de áreas cultivadas e não cultivadas para posterior determinação da CMAP.

| MUNICÍPIO                    | P-rem (mg dm <sup>-3</sup> ) ARGILA (g kg <sup>-1</sup> ) GRUPO <sup>(a)</sup> |       |   | P-rem (mg dm <sup>-3</sup> ) ARGILA (g kg <sup>-1</sup> ) GRUPO <sup>(a)</sup> |       |   |
|------------------------------|--|-------|---|--|-------|---|
|                              | Áreas não cultivadas   |       |   | Áreas cultivadas   |       |   |
| Açailândia                   | 37,2   | 831,4 | 2 | 34,3   | 874,3 | 2 |
| Ariquemes                    | 28,2   | 502,5 | 2 | 34,8   | 554,2 | 2 |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 35,9   | 333,9 | 2 | 44,2   | 267,1 | 1 |
| Boa Vista                    | 53,2   | 125,2 | 1 | 57,7   | 80,8  | 1 |
| Boca Do Acre                 | 31,0   | 302,3 | 2 | 43,9   | 228,0 | 2 |
| Canabrava do Norte           | 14,6   | 458,8 | 3 | 26,0   | 386,4 | 2 |
| Chupinguaia                  | 35,7   | 138,2 | 2 | 41,7   | 139,1 | 2 |
| Corretina                    | 37,7   | 240,4 | 2 | 46,8   | 144,6 | 1 |
| Fortaleza do Tabocão         | 4,6  | 511,1 | 3 | 8,1  | 581,4 | 3 |
| Gurupi                       | 35,3   | 278,8 | 2 | 58,1   | 64,7  | 1 |
| Iporá                        | 27,9   | 329,7 | 2 | 33,4   | 275,9 | 2 |
| Nova Lacerda                 | 40,9   | 278,9 | 2 | 40,6   | 302,8 | 2 |
| Paragominas                  | 26,7   | 861,6 | 2 | 32,2   | 826,4 | 2 |
| Plácido de Castro            | 24,3   | 633,5 | 2 | 30,4   | 587,5 | 2 |
| Santa Carmem                 | 20,4   | 430,5 | 2 | 26,5   | 419,3 | 2 |
| Santana                      | 15,0   | 443,6 | 3 | 30,6   | 259,9 | 2 |
| Santana do Araguaia          | -  | -     | - | 42,0   | 202,8 | 2 |
| Santarém                     | 29,0   | 533,1 | 2 | 38,1   | 840,6 | 2 |
| São Raimundo das Mangabeiras | 20,0   | 309,5 | 2 | 29,5   | 533,4 | 2 |
| Sapezal                      | 2,2  | 531,5 | 3 | 31,0   | 622,0 | 2 |

<sup>(a)</sup> Os grupos correspondem a diferentes intervalos de concentração de P máxima utilizada na determinação da curva da CMAP, sendo: Grupo 1, concentração máxima de 60 mg.L<sup>-1</sup>; Grupo 2, concentração máxima de 150 mg.L<sup>-1</sup>; Grupo 3, concentração máxima de 400 mg.L<sup>-1</sup>

O primeiro grupo compreende solos de baixa reatividade com P, onde o resultado do P-rem ficou entre 44 e 60 mg L<sup>-1</sup>, e a concentração máxima inicial de P adotada para calcular as isotermas de adsorção foi de 60 mg L<sup>-1</sup>, os demais pontos de concentração inicial foram calculados como frações desta concentração máxima e estão descritos na tabela 5. Já o segundo grupo é composto pelos solos com resultados de P-rem variando entre 19 e 44 mg L<sup>-1</sup>, e com concentração inicial máxima de 150 mg L<sup>-1</sup> de P, e por fim o terceiro grupo é composto pelos solos mais reativos ao P, com resultados de P-rem variando entre 0 e 19 mg L<sup>-1</sup>, e com concentração inicial de P máxima de 400 mg L<sup>-1</sup>.

Estes grupos foram modificados da proposta de Alvarez et al. (2000) com a finalidade de uma melhor determinação experimental do comportamento do solo com relação a adsorção de P. Os pontos ficaram melhor ajustados a um espectro maior de concentrações de P, o que permite uma boa verificação da qualidade dos modelos utilizados para descrever a capacidade de adsorção em função da concentração inicial de P na solução utilizada. A metodologia previu três classes de concentração máxima de P na solução inicial, e para cada uma destas classes os pontos intermediários entre a concentração de 0 mg P kg<sup>-1</sup> e a concentração máxima foram determinados como relativos à concentração máxima nas seguintes proporções: 5, 10, 15, 25, 35, 45, 55, 70 e 85% da concentração máxima, resultando em 11 pontos para cada amostra, conforme descrito na tabela 5.

Os pontos foram determinados em triplicata, utilizando 1,0 g de solo transferido para tubos Falcon de 15 mL de capacidade. Posteriormente foram adicionados 10 mL de solução de CaCl<sub>2</sub> a 0,01 mol L<sup>-1</sup>, contendo concentrações crescentes de P na forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, conforme descrito anteriormente, e na relação solo:solução 1:10. Posteriormente os tubos foram mantidos em agitador por 24h, e após este período, foram centrifugados por 15 minutos a 3.000 rotações por minuto. A solução sobrenadante foi então analisada para determinação da concentração de P, a fim de se determinar a quantidade adsorvida pelo solo.

A análise do sobrenadante seguiu a metodologia proposta por Murphy & Riley (1962), a diferentes níveis de diluição do extrato, para que a absorbância fosse lida em espectrofotômetro. As leituras foram feitas ao longo de oito dias, sendo sempre precedidas pela leitura de uma curva de calibração para posterior cálculo da concentração de P no extrato.

Os resultados experimentais obtidos foram posteriormente ajustados às isotermas de Langmuir e Freundlich pelo método de ajuste linear e não-linear.

Tabela 5 - Concentrações de P utilizadas em solução para a determinação da curva de adsorção para cada uma das Grupos de solos estudados.

| <b>% da concentração<br/>máxima de P</b> | <b>Grupo 1</b> | <b>Grupo 2</b><br>---- mg.L <sup>-1</sup> P ---- | <b>Grupo 3</b> |
|--|----------------|--|----------------|
| 0%                                       | 0              | 0  | 0              |
| 5%                                       | 3              | 7,5  | 20             |
| 10%                                      | 6              | 15   | 40             |
| 15%                                      | 9              | 22,5   | 60             |
| 25%                                      | 15             | 37,5   | 100            |
| 35%                                      | 21             | 52,5   | 140            |
| 45%                                      | 27             | 67,5   | 180            |
| 55%                                      | 33             | 82,5   | 220            |
| 70%                                      | 42             | 105  | 280            |
| 85%                                      | 51             | 127,5  | 340            |
| 100%                                     | 60             | 150  | 400            |

<sup>(a)</sup> P remanescente mg L<sup>-1</sup>; <sup>(b)</sup> Concentração máxima de P na solução utilizada para a determinação da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP)

A linearização adotada para os modelos propostos por Langmuir (1918) e Freundlich (1906) foi a de região única, baseando-se nos resultados de Menotti et al. (2014) para a isoterma de Langmuir, que mostraram a melhor correlação entre a CMAP estimada. Os resultados foram também utilizados como “sementes” para o cálculo das isotermas pelo ajuste não-linear, utilizando o complemento SOLVER do Microsoft Excel e organizada em uma planilha eletrônica disponível através do seguinte endereço web: <https://bit.ly/3zeYQHA> e disponível como material suplementar a esta dissertação. O complemento SOLVER disponibiliza modelos de otimização que podem ser utilizados, como no caso do presente estudo, para maximizar o valor de uma variável. O foco de sua utilização foi a busca pelo máximo valor de R<sup>2</sup> em cada cálculo das constantes dos modelos de Langmuir e Freundlich, de modo que para cada ponto amostral fosse obtido o melhor ajuste possível do modelo aos dados experimentais calculados.

Esta abordagem tende a melhorar levemente o ajuste dos modelos aos dados experimentais quando comparada com o cálculo das constantes através da linearização dos dados experimentais. Todos os quatro modelos avaliados tiveram a qualidade do seu ajuste aos dados experimentais calculada pelo R<sup>2</sup>, definido como a equação 1.

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Soma do Erro Quadrado}}{\text{Soma da diferença quadrada}} \quad (1)$$

### 3.2.3. Mineralogia

A determinação da mineralogia foi feita seguindo a metodologia proposta por Camargo et al. (2009). Segundo o autor, a extração de ferro através do uso de substâncias como o oxalato ácido de amônio ( $\text{Fe}_{\text{ox}}$ ) e o ditionito-citrato-bicarbonato ( $\text{Fe}_{\text{DCB}}$ ) tem como principais objetivos a remoção de óxidos de ferro do material para facilitar a análise da fração de filossilicatos por difratometria de raios X, bem como separar a parte mais reativa dos compostos ferrosos do solo, especialmente quantificar a fração de óxidos amorfos aos raios X, objetivo de particular interesse para este estudo.

Foram quantificados os teores de Fe e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , assim como de Al e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) extraídos através de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB). Também foi determinado o teor de Fe,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Al e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) extraídos através de oxalato ácido de amônio (ox).

### 3.3. Isoterma de Langmuir

A determinação da isoterma de Langmuir seguiu o modelo proposto a seguir, tendo como principais resultados a constante  $K_L$  e a constante  $q_{\text{max}}$ , definida também como a capacidade máxima de adsorção de P do solo (CMAP).

A determinação da quantidade de adsorbato adsorvido em equilíbrio ( $q_e$ ) para cada ponto experimental seguiu a equação 2.

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{M} \times V \quad (2)$$

Onde:

$C_i$  = Concentração inicial de P na solução, em  $\text{mg L}^{-1}$

$C_e$  = Concentração de equilíbrio de P no extrato, em  $\text{mg L}^{-1}$

V = Volume de trabalho em Litros

M = Massa do adsorbato (solo) em gramas

Já a estimativa da  $q_e$  ( $q_e'$ ) pelo modelo de Langmuir seguiu a equação 3:

$$q_e' = q_{max} \times \frac{K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad (3)$$

Onde:

$q_{max}$  = quantidade máxima de P que pode ser adsorvida (CMAP do solo), em  $mg\ g^{-1}$

$K_L$  = Constante de Langmuir, relacionada com a energia de ligação do P ao solo

Para a determinação da  $q_{max}$  e da  $K_L$  foi feita a linearização dos dados experimentais, considerando a  $C_e$  como o eixo x do gráfico, e a relação  $C_e/q_e$  como o eixo y. Estes dados podem ser ajustados a uma regressão linear do tipo  $y = ax + b$ , e o ponto de intersecção da reta com o eixo y ( $x = 0$ ) [b] e o coeficiente angular da reta [a] são utilizados para determinar os valores da  $q_{max}$  e  $K_L$ , conforme as equações 4 e 5.

$$q_{max} = 1/[a] \quad (4)$$

$$K_L = [a]/[b] \quad (5)$$

Na figura 6 podemos ver os dados experimentais de uma amostra (Sapezal – MT | Não Cultivada), linearizados, com valores de  $[a] = 0.2729$  e  $[b] = 0.8127$ , com o intuito de exemplificar a metodologia utilizada para o cálculo das constantes  $q_{max}$  e  $K_L$ .

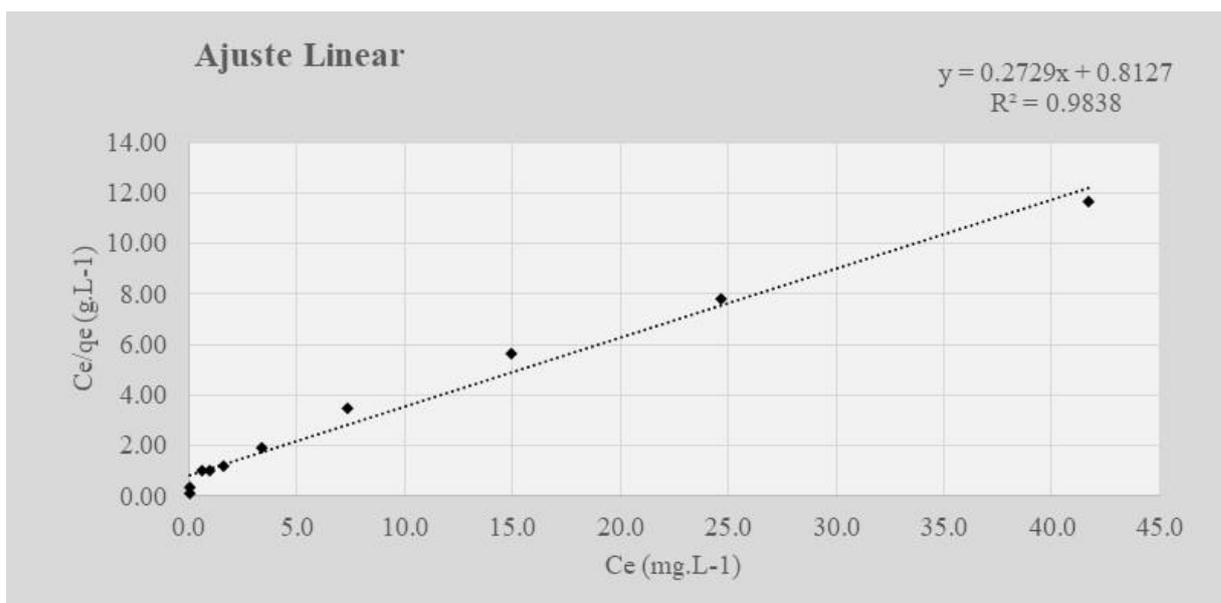


Figura 6 - Método de linearização dos dados para calcular as constantes  $q_{max}$  e  $K_L$ , exemplo com dados reais.

Fonte: Autor

Uma vez calculadas as constantes  $q_{\max}$  (3.6639) e  $K_L$  (0.3358), o modelo de Langmuir é calculado como  $q_e' = 3.6639 \times \frac{0.3358 \times C_e}{1 + 0.3358 \times C_e}$ , e os mesmos dados experimentais, assim como o modelo calculado, se ajustam conforme a figura 7.

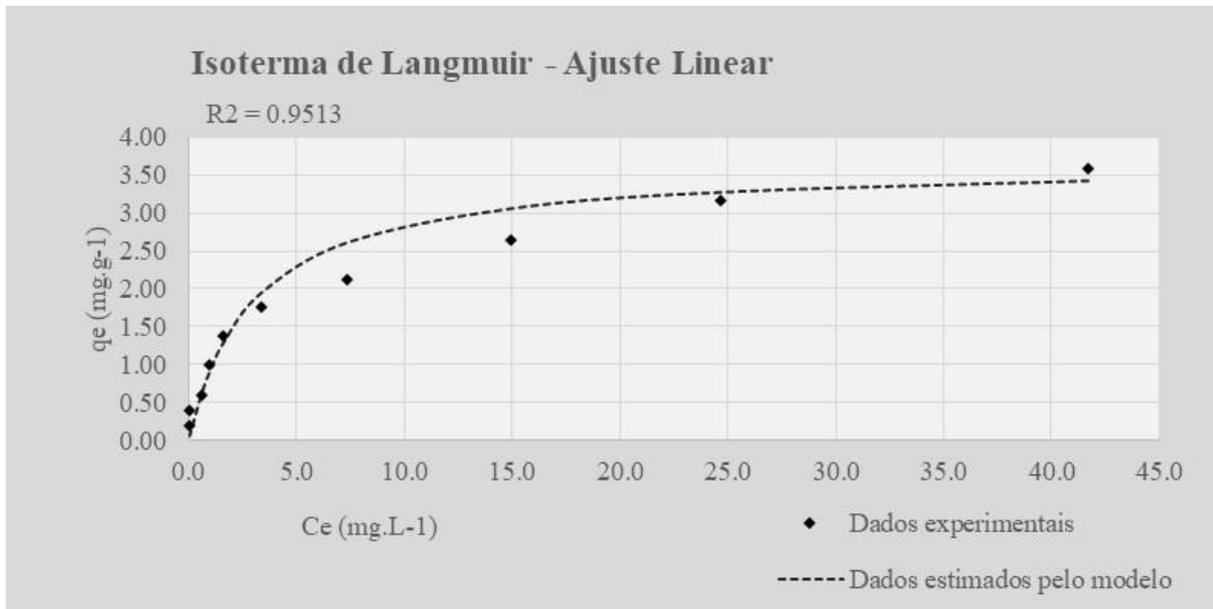


Figura 7 - Exemplo de ajuste da Isoterma de Langmuir a dados experimentais, exemplo com dados reais.

Fonte: Autor

É possível notar que o modelo proposto por Langmuir se ajusta bem a algumas das concentrações, porém o erro quadrado é bastante expressivo nas concentrações intermediárias. O modelo é, de toda forma, muito útil uma vez que a partir dele é possível estimar um ponto onde a adsorção é máxima, ou seja, o adsorbato (solo) está saturado ( $q_{\max}$ ), definido como a capacidade máxima de adsorção de P neste trabalho. Dados obtidos por Menotti et al. (2014) mostram uma relação muito boa entre a CMAP estimada pela isoterma de Langmuir, tanto com modelo linear quanto não-linear, e a CMAP observada com pontos complementares ao primeiro experimento, afim de se caracterizar o ponto em que o incremento do teor de P no extrato passa a ser linear em função da concentração de P na solução inicial utilizada.

As constantes  $q_{\max}$  e  $K_L$  podem também ser estimadas por tentativa e erro, compondo o método de ajuste não-linear. A fim de se otimizar as tentativas e erros foi desenvolvida uma integração dados experimentais com complemento de otimização Solver do Microsoft Excel. Foi escolhido o algoritmo GRG não-linear para estimativa dos valores ótimos de  $q_{\max}$  e  $K_L$ , sendo a função objetivo maximizar o valor calculado do  $R^2$ , e assim obter o melhor ajuste

possível do modelo aos dados experimentais. A plotagem da isoterma com estas constantes estimadas pelo método não-linear pode ser observada na figura 8.

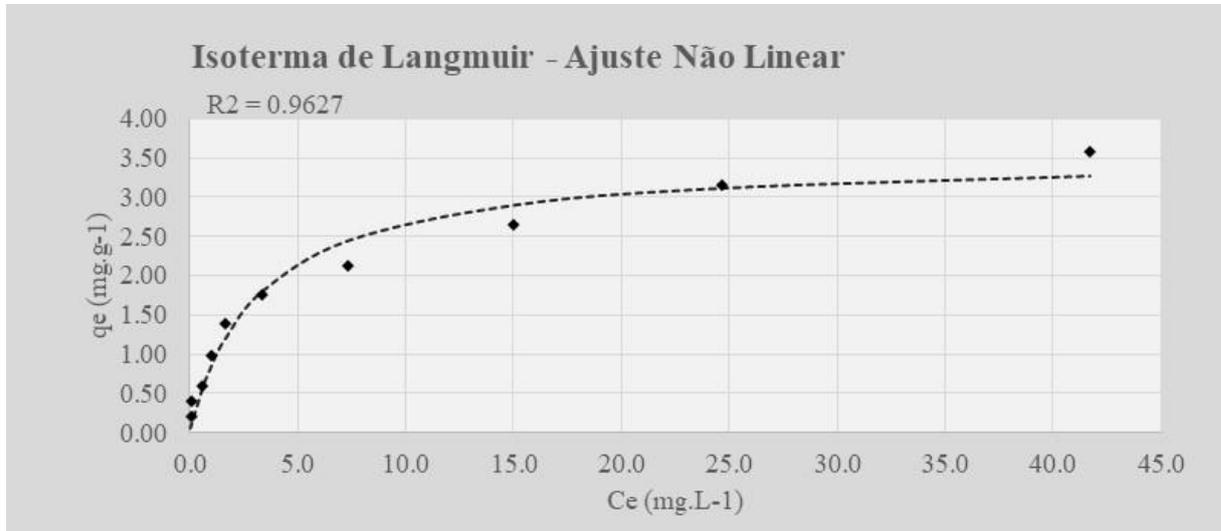


Figura 8 - Determinação das constantes  $q_{\max}$  e  $K_L$  pelo método não-linear, com leve melhoria do ajuste da isoterma aos dados experimentais.

Fonte: Autor

Nota-se que com este método houve uma melhoria do  $R^2$  em comparação com o ajuste linear. Isso foi observado ao longo de praticamente todo o universo de amostras, com incremento mediano da ordem de 1,2% em comparação com o método linear.

### 3.4. Isotherma de Freundlich

A determinação da isoterma de Freundlich foi feita conforme o modelo proposto a seguir, e os seus principais resultados são a constante  $K_F$  e a constante  $n$ .

A determinação da quantidade de adsorbato adsorvido em equilíbrio ( $q_e$ ) para cada ponto experimental seguiu a mesma equação 2 da seção anterior.

Já a estimativa da  $q_e$  ( $q_e'$ ) pelo modelo de Freundlich seguiu a equação 6:

$$q_e' = K_F \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Onde:

$K_F$  = constante de capacidade de adsorção de Freundlich, em  $\text{mg g}^{-1}$

$n$  = constante relacionada à heterogeneidade da superfície

Para a determinação de  $K_F$  e  $n$  foi feita a linearização dos dados experimentais, considerando o logaritmo natural de  $C_e$  como o eixo x do gráfico, e o eixo y do gráfico como logaritmo natural da  $C_e$ . Estes dados podem ser ajustados a uma regressão linear do tipo  $y = ax + b$ , e o ponto de intersecção da reta com o eixo y ( $x = 0$ ) [b] e o coeficiente angular da reta [a] são utilizados para determinar os valores de  $K_F$  e  $n$ , conforme as equações 7 e 8.

$$K_F = e^{[b]} \quad (7)$$

$$n = 1/[a] \quad (8)$$

Na figura 9 podemos ver os dados experimentais de uma amostra (Sapezal – MT | Não Cultivada), linearizados, com valores de [a] = 0.4021 e [b] = 0.0929, com o intuito de exemplificar o processo de cálculo das constantes de Freundlich.

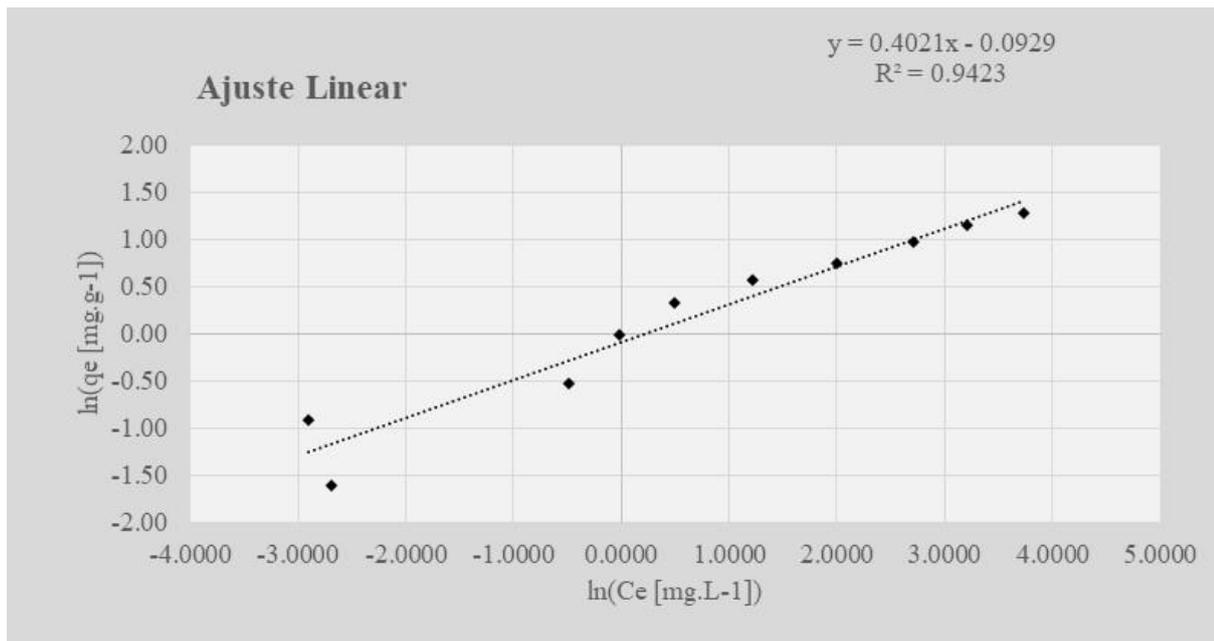


Figura 9 – Exemplo de linearização dos dados experimentais para cálculo das constantes  $K_F$  e  $n$ , exemplo com dados reais.

Fonte: Autor

Uma vez calculadas as constantes  $K_F$  (0.9112) e  $n$  (2.4870), o modelo de Freundlich é calculado como  $q'_e = 0.9112 \times C_e^{\frac{1}{2.4870}}$ , e os mesmos dados experimentais, assim como o modelo calculado, se ajustam conforme a figura 10.

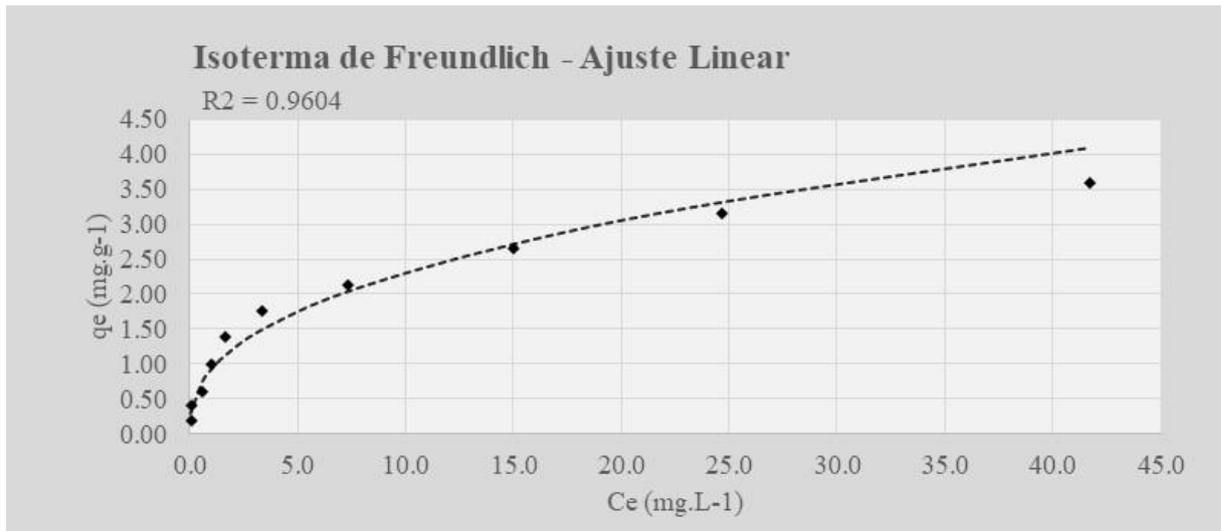


Figura 10 - Exemplo do ajuste da isoterma de Freundlich aos dados experimentais, exemplo com dados reais.

Fonte: Autor

É possível notar que o modelo proposto por Freundlich tende a se ajustar melhor aos dados experimentais em praticamente todas as concentrações. Segundo Neto, (2019), isso pode ser explicado pelo fato de o modelo considerar superfícies heterogêneas possuindo uma distribuição exponencial para os sítios de adsorção, que por sua vez possuem diferentes energias de ligação, e considera também que alguns dos sítios de adsorção têm alta energia de ligação, motivo pelo qual o modelo tem um comportamento exponencial. O modelo é muito útil para modelar o comportamento do P nos solos estudados em diversas concentrações iniciais de P na solução.

Da mesma maneira, as constantes  $K_F$  e  $n$  podem também ser estimadas por tentativa e erro. A metodologia adotada foi igual a adotada para o modelo não-linear de ajuste da isoterma de Langmuir, sendo a função objetivo também de maximização do valor calculado de  $R^2$ . A plotagem da isoterma de Freundlich com estas constantes estimadas pelo método não-linear pode ser observada na figura 11.

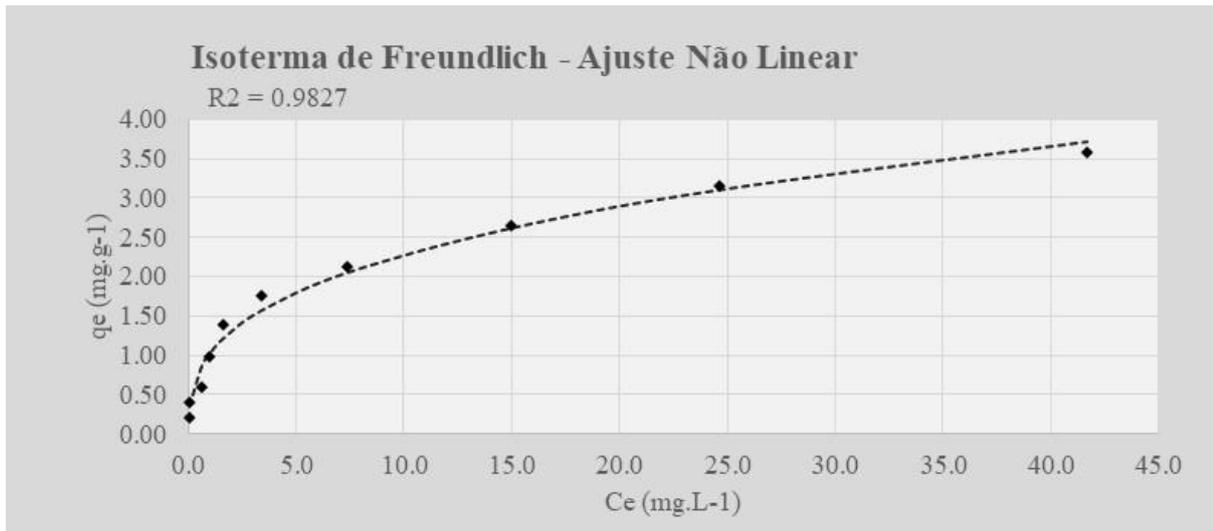


Figura 11 - Ajuste da isoterma de Freundlich aos dados experimentais com o cálculo das constantes  $K_F$  e  $n$  feito pelo método não-linear, com leve melhoria do  $R^2$  em relação aos demais modelos de ajuste testados.

Fonte: Autor

Nota-se que com este método houve uma leve melhoria do  $R^2$  em comparação com o ajuste linear no exemplo da figura 10. Ao contrário do que foi observado com a isoterma de Langmuir, o método de ajuste não-linear da isoterma de Freundlich foi superior ao de ajuste linear em apenas 60% das amostras analisadas.

### 3.5. Ajuste dos modelos aos dados experimentais

Foi calculado o valor de  $R^2$  para todos os modelos, de tal forma que pudesse ser feita uma comparação entre a qualidade de ajuste dos modelos aos dados experimentais comparando os dois diferentes modelos (Langmuir e Freundlich) e os dois distintos métodos de cálculo das constantes (linear e não-linear).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Atributos físico-químicos

Os solos amostrados possuem teores de argila, silte e areia, assim como a classe de solo dominante (COMP1) e secundária (COMP2) conforme descrito nas tabelas 6 e 7. Estas classes de solos são derivadas de um cruzamento dos dados disponibilizados pela Embrapa Solos (2020) com as coordenadas de cada ponto amostral, e servem como uma referência para os tipos de solo predominantes da região, e não devem ser interpretadas como um diagnóstico do tipo de solo encontrado em cada ponto amostral. Na figura 3, na seção de material e métodos, já foi apresentada a representação gráfica da distribuição espacial dos solos brasileiros na escala 1:5.000.000 e os pontos amostrais coletados, cruzamento de dados este que resultou nas tabelas 6 e 7.

De todos os pontos amostrados, 24 têm os Latossolos como ordem dominante, representando pouco mais de 60% do total de amostras e sete são Argissolos, o que representa cerca de 18% das amostras. Já os pontos de Boa Vista – RR se enquadram como Neossolos quartzarênicos e perfazem 5% das amostras, e para a região de São Raimundo das Mangabeiras – MA, o cruzamento de dados resultou em Neossolos litólicos distróficos como classe dominante, porém pelo menos a área cultivada é sabidamente um Latossolo. Por fim, os pontos da região de Fortaleza do Tabocão - TO e Santana – AP estão em regiões com predomínio de Plintossolos pétricos. De modo geral, as ordens a seguir, que representam os tipos de solo dominante de cada região, tem representatividade de: Latossolos (62%), Argissolos (18%), Neossolos (10%) e Plintossolos (10%) (Tabelas 6 e 7).

Os Latossolos, Argissolos e Plintossolos são solos altamente intemperizados e distróficos, sendo que Plintossolos são solos que sofreram alterações morfológicas e químicas, especialmente na sua fração oxídica (OLIVEIRA; JACOMINE; COUTO, 2017). O solo não cultivado de Fortaleza do Tabocão apresentou o valor mais elevado de  $Al_{DCB}$  de todas as amostras analisadas, e o solo cultivado apresentou o segundo maior teor de  $Al_{DCB}$ , como pode ser observado na tabela 10. Os valores de  $Al_{ox}$  observados nesta mesma região também estão entre os mais elevados de todas as observações, superados apenas pelo solo não cultivado da região de Sapezal – MT. Já para os valores de  $Fe_{ox}$ , a região também apresentou altos valores, sendo superados apenas pelo solo cultivado da região de Plácido de Castro – AC.

Tabela 6 - Classes prováveis de solo com base no mapeamento disponibilizado pela Embrapa Solos (2020) – mapa exploratório de solos do Brasil -, e atributos físicos dos solos **de áreas cultivadas**. COMP1 e COMP2 se refere às classes dominantes de solos resultante do cruzamento das coordenadas geográficas de cada ponto com o mapa exploratório de solos do Brasil supramencionado.

| <b>MUNICÍPIO</b>             | <b>UF</b> | <b>COMP1</b>                          | <b>COMP2</b>                              | <b>Argila</b> | <b>Silte</b> | <b>Areia</b> |
|------------------------------|-----------|---------------------------------------|---|---------------|--------------|--------------|
| Açailândia                   | MA        | Neossolos Litolicos Dist              | Plintossolos Petricos Concrecionarios     | 53            | 1            | 45           |
| Ariquemes                    | RO        | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist         | 55            | 3            | 42           |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI        | Latossolos Amarelos Dist              |   | 14            | 1            | 84           |
| Boa Vista                    | RR        | Neossolos Quartz Hidromorficos        |   | 8             | 2            | 90           |
| Boca Do Acre                 | AM        | Latossolos Amarelos Dist              | Plintossolos Petricos Concrecionarios     | 83            | 13           | 4            |
| Canabrava do Norte           | MT        | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | Latossolos Vermelhos Dist                 | 39            | 2            | 60           |
| Chupinguaia                  | RO        | Argissolos Vermelhos Eutroficicos     | Nitossolos Vermelhos Eutroficicos         | 14            | 1            | 85           |
| Corretina                    | BA        | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | Cambissolos Haplicos Tb Dist              | 28            | 4            | 68           |
| Fortaleza do Tabocão         | TO        | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist     | Argissolos Vermelho-Amarelos Eutroficicos | 20            | 9            | 70           |
| Gurupi                       | TO        | Plintossolos Petricos Concrecionarios | Cambissolos Haplicos Tb Dist              | 58            | 8            | 34           |
| Iporá                        | GO        | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | Plintossolos Petricos Concrecionarios     | 6             | 3            | 91           |
| Nova Lacerda                 | MT        | Latossolos Amarelos Dist              | Gleissolos Haplicos Tb Dist               | 30            | 4            | 66           |
| Paragominas                  | PA        | Latossolos Amarelos Dist              | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist         | 87            | 6            | 6            |
| Plácido de Castro            | AC        | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist     | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist         |               |              |              |
| Santa Carmem                 | MT        | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | Latossolos Vermelhos Dist                 | 42            | 5            | 53           |
| Santana                      | AP        | Plintossolos Petricos Concrecionarios |   | 26            | 2            | 72           |
| Santana do Araguaia          | PA        | Latossolos Amarelos Dist              |   | 84            | 3            | 13           |
| Santarém                     | MA        | Latossolos Amarelos Dist              | Neossolos Quartzarenicos Orticos          | 27            | 2            | 71           |
| São Raimundo das Mangabeiras | MT        | Latossolos Vermelhos Dist             | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist         | 62            | 11           | 26           |

Tabela 7 - Classes prováveis de solo com base no mapeamento disponibilizado pela Embrapa Solos (2020) – mapa exploratório de solos do Brasil -, e atributos físicos dos solos **de áreas não cultivadas**. COMP1 e COMP2 se refere às classes dominantes de solos resultante do cruzamento das coordenadas geográficas de cada ponto com o mapa exploratório de solos do Brasil supramencionado.

| MUNICÍPIO                    | UF | COMP1                                  | COMP2                                 | Argila | Silte | Areia |
|------------------------------|----|--|---------------------------------------|--------|-------|-------|
| Açailândia                   | MA | Latossolos Amarelos Dist               | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist     | 83     | 13    | 4     |
| Ariquemes                    | RO | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist      | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist     | 50     | 9     | 41    |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI | Latossolos Amarelos Dist               | Neossolos Quartzarenicos Orticos      | 33     | 6     | 61    |
| Boa Vista                    | RR | Neossolos Quartzarenicos Hidromorficos |                                       | 13     | 1     | 86    |
| Boca Do Acre                 | AM | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist      | Cambissolos Haplicos Tb Dist          | 30     | 14    | 56    |
| Canabrava do Norte           | MT | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist      | Latossolos Vermelhos Dist             | 46     | 3     | 51    |
| Chupinguaia                  | RO | Argissolos Vermelhos Eutroficicos      | Nitossolos Vermelhos Eutroficicos     | 14     | 2     | 84    |
| Corretina                    | BA | Latossolos Amarelos Dist               |                                       | 24     | 1     | 75    |
| Fortaleza do Tabocão         | TO | Plintossolos Petricos Concrecionarios  | Cambissolos Haplicos Tb Dist          | 51     | 14    | 35    |
| Gurupi                       | TO | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist      | Plintossolos Petricos Concrecionarios | 28     | 11    | 61    |
| Iporá                        | GO | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist      | Cambissolos Haplicos Tb Dist          | 33     | 13    | 54    |
| Nova Lacerda                 | MT | Latossolos Amarelos Dist               | Gleissolos Haplicos Tb Dist           | 28     | 7     | 65    |
| Paragominas                  | PA | Latossolos Amarelos Dist               | Plintossolos Petricos Concrecionarios | 86     | 5     | 8     |
| Plácido de Castro            | AC | Argissolos Vermelho-Amarelos Dist      | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     |        |       |       |
| Santa Carmem                 | MT | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist      | Latossolos Vermelhos Dist             | 43     | 8     | 49    |
| Santana                      | AP | Plintossolos Petricos Concrecionarios  |                                       | 44     | 3     | 52    |
| Santana do Araguaia          | PA | Latossolos Amarelos Dist               |                                       | 53     | 31    | 16    |
| Santarém                     | MA | Neossolos Litolicos Dist               | Plintossolos Petricos Concrecionarios | 31     | 2     | 67    |
| São Raimundo das Mangabeiras | MT | Latossolos Vermelhos Dist              | Latossolos Vermelho-Amarelos Dist     | 53     | 13    | 34    |

Latossolos, Argissolos e Plintossolos tem sua fração argila altamente reativa com o P. Os neossolos quartzarênicos, apesar do baixo teor de argila inerente à classe, podem apresentar esta mesma fração também com alta reatividade ao P, uma vez que são também, em sua maioria, altamente intemperizados. O manejo de P para estes solos deve levar sempre em consideração a sua textura, e além desta variável, fatores como presença mais elevada de óxidos de Fe e Al, bem como o grau de cristalinidade destes óxidos, irão apresentar alto impacto na sua capacidade de fixação deste elemento, como será discutido a seguir.

Do ponto de vista químico, os resultados das amostras estão caracterizados conforme as tabelas 8 e 9 apresentando, nas áreas não cultivadas, características de elevado grau de intemperismo, com solos em sua maioria pobres quimicamente, com exceção aos solos das regiões de Açailândia – MA e Nova Lacerda – MT, que apresentam características eutróficas, com teores adequados de Ca, Mg, V% e pH, sem presença de Al tóxico, e que podem ter sua fertilidade melhorada significativamente através da elevação do teor de P e K. Estes solos apresentam alta probabilidade de resposta à correção dos níveis de fósforo, uma vez que este é o principal nutriente limitante à produção dos cultivos nestes solos. O conhecimento do padrão de comportamento do fósforo no solo nestes casos torna-se ainda mais necessário, uma vez que apresentam elevado potencial de intensificação produtiva logo após a correção dos teores deste nutriente. Além disso, o fato de não serem quimicamente pobres pode representar uma condição pedogenética distinta da observada em solos altamente intemperizados, afetando inclusive a concentração de elementos altamente reativos com o fósforo na fração argila, tais como óxidos pouco cristalinos de Fe e Al, que não teriam condições de se acumular em concentrações similares às observadas em solos quimicamente mais pobres.

Já os demais solos apresentam características distróficas, com presença de Al tóxico em teores elevados, Ca e Mg em teores baixos ou muito baixos, V% também baixa ou muito baixa, bem como pH desfavorável ao pleno desenvolvimento dos cultivos, e teores limitantes de P e K, ficando clara a necessidade de correção química destes solos para seu aproveitamento agrícola e intensificação de pastagens.

Segundo Bernardi et al. (1999) e Cherubin et al. (2011), os principais insumos utilizados para esta correção química seriam, em ordem de importância, o calcário agrícola, sendo necessário o correto cálculo de necessidade de calagem e do tipo de calcário em relação a teores de óxidos de cálcio e mg (CaO e MgO), fertilizantes fosfatados para correção do teor de P, sendo a fonte preferencial a que apresentar melhor relação custo-benefício em relação ao P. Tradicionalmente são utilizados fertilizantes como o superfosfato simples, fosfato

monoamônico ou fontes de fosfato natural reativo, sendo estas últimas de eficiência variável em função de sua solubilidade.

O calcário é um insumo tradicionalmente barato, principalmente quando analisado pela ótica de custo-benefício às culturas. Já o fósforo e os fertilizantes fosfatados apresentam custo muito mais elevado, seja devido à toda necessidade de processamento físico-químico para elevar a concentração e solubilidade de P nestes fertilizantes, seja também pela logística, uma vez que os polos produtores são muito menos abundantes em território nacional do que as minas de calcário, por exemplo. A necessidade de otimizar o nível de P aplicado aos solos visando a elevação do teor do nutriente é maximizada em função do custo que esta operação pode ter, e uma das melhores maneiras de entender o comportamento do P nos solos é através da determinação, em condições experimentais, do tamanho da fração inicial de P adicionado ao solo através de uma solução que ficará disponível após contato com o solo, e qual o tamanho da fração que estará indisponível às culturas e, portanto, fixada no solo. Quando este estudo é feito em concentrações crescentes de P na solução inicial, é possível a obtenção de uma série de pontos experimentais que, após ajustados a uma função (hiperbólica, como no caso da isoterma de Langmuir, e exponencial, no caso da isoterma de Freundlich), permitem uma descrição razoavelmente precisa do comportamento esperado do P solúvel adicionado a estes solos.

Por fim, a capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos foi bastante variável uma vez que a fração argila e a matéria orgânica dos solos foi muito variável e é a fração responsável pela CTC dos solos, variando desde  $20,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no caso do solo não cultivado da região de Boa Vista – RR até  $115,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no caso do solo não cultivado de Santarém – PA.

Tabela 8 - Atributos químicos das amostras de solo de áreas **não cultivadas**.

| MUNICÍPIO                    | UF | Al <sup>(a)</sup> | Ca <sup>(b)</sup> | CTC <sup>(c)</sup> | P <sup>(d)</sup> | H+Al <sup>(e)</sup> | M.O. <sup>(f)</sup> | Mg <sup>(g)</sup> | pH <sup>(h)</sup> | K <sup>(i)</sup> | V <sup>(j)</sup> |
|------------------------------|----|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                              |    | %                 | *                 | *                  | *                | %                   | *                   | *                 | *                 | *                | *                |
| Açailândia                   | MA | 0,0               | 66,2              | 107,9              | 8,9              | 27,1                | 51,9                | 13,0              | 5,2               | 1,6              | 75,0             |
| Ariquemes                    | RO | 2,8               | 12,6              | 49,0               | 5,1              | 31,8                | 28,8                | 3,6               | 4,5               | 1,0              | 35,0             |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI | 8,0               | 3,1               | 42,7               | 4,1              | 37,2                | 13,0                | 1,5               | 4,0               | 0,9              | 13,0             |
| Boa Vista                    | RR | 3,5               | 1,8               | 20,6               | 4,3              | 16,5                | 10,1                | 1,6               | 4,2               | 0,7              | 20,0             |
| Boca do Acre                 | AM | 24,3              | 2,2               | 71,3               | 5,8              | 65,7                | 17,8                | 2,3               | 3,8               | 1,1              | 8,0              |
| Canabrava do Norte           | MT | 17,8              | 2,2               | 74,7               | 6,2              | 70,0                | 42,7                | 1,6               | 4,0               | 0,9              | 6,0              |
| Chupinguaia                  | RO | 10,3              | <1                | 35,9               | 3,9              | 33,8                | 10,4                | 0,7               | 4,2               | 0,7              | 6,0              |
| Correntina                   | BA | 9,5               | 2,5               | 44,8               | 5,0              | 40,9                | 20,5                | 0,9               | 3,9               | 0,5              | 9,0              |
| Fortaleza do Tabocão         | TO | 3,8               | 3,8               | 67,7               | 5,0              | 60,4                | 48,3                | 2,5               | 4,5               | 1,0              | 11,0             |
| Gurupi                       | TO | 15,8              | 4,8               | 63,6               | 6,7              | 54,9                | 17,5                | 3,0               | 3,9               | 0,9              | 14,0             |
| Iporá                        | GO | 5,8               | 10,0              | 65,9               | 6,7              | 45,9                | 37,3                | 7,7               | 4,4               | 2,3              | 30,0             |
| Nova Lacerda                 | MT | 0,0               | 68,7              | 107,7              | 10,0             | 22,9                | 47,1                | 14,2              | 5,7               | 1,9              | 79,0             |
| Paragominas                  | PA | 3,0               | 24,7              | 72,2               | 6,9              | 39,2                | 28,8                | 7,3               | 4,5               | 1,0              | 46,0             |
| Plácido de Castro            | AC | 11,0              | 29,1              | 104,3              | 8,4              | 60,4                | 41,5                | 12,1              | 4,4               | 2,7              | 42,0             |
| Santa Carmem                 | MT | 10,0              | 1,4               | 52,8               | 4,3              | 49,4                | 29,0                | 1,0               | 4,2               | 1,0              | 6,0              |
| Santana                      | AP | 8,8               | <1                | 36,9               | 2,6              | 35,3                | 19,3                | 0,9               | 4,2               | 0,4              | 4,0              |
| Santarém                     | PA | 27,0              | 1,4               | 115,5              | 10,3             | 111,3               | 42,4                | 1,8               | 3,7               | 1,0              | 4,0              |
| São Raimundo das Mangabeiras | MA | 18,8              | <1                | 73,3               | 3,8              | 72,2                | 37,6                | 0,7               | 4,0               | 0,4              | 2,0              |
| Sapezal                      | MT | 2,3               | 6,5               | 64,2               | 3,4              | 52,1                | 52,5                | 3,9               | 4,7               | 1,7              | 19,0             |

\*mmolc.dm<sup>3</sup>; <sup>(a)</sup>Alumínio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(b)</sup>Cálcio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(c)</sup> somatório de cátions e H<sup>+</sup> do solo (K + Ca + Mg + H + Al); <sup>(d)</sup> P Resina; <sup>(e)</sup> Método SMP; <sup>(f)</sup> Matéria Orgânica pelo método colorimétrico; <sup>(g)</sup> Magnésio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(h)</sup> pH em CaCl<sub>2</sub>; <sup>(i)</sup> Potássio determinado em resina; <sup>(j)</sup> porcentagem da CTC ocupada por K, Mg e Ca trocável

Tabela 9 - Atributos químicos das amostras de solo de áreas **cultivadas**.

| MUNICÍPIO                    | UF | Al <sup>(a)</sup> | Ca <sup>(b)</sup> | CTC <sup>(c)</sup> | P <sup>(d)</sup> | H+Al <sup>(e)</sup> | M.O. <sup>(f)</sup> | Mg <sup>(g)</sup> | pH <sup>(h)</sup> | K <sup>(i)</sup> | V <sup>(j)</sup> |
|------------------------------|----|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                              |    | %                 | *                 | *                  | *                | %                   | *                   | *                 | *                 | *                | %                |
| Açailândia                   | MA | 4,0               | 25,9              | 79,3               | 23,9             | 45,4                | 35,0                | 5,6               | 4,5               | 2,4              | 43,0             |
| Ariquemes                    | RO | 0,0               | 30,7              | 61,3               | 14,6             | 22,2                | 29,3                | 6,5               | 5,2               | 1,9              | 64,0             |
| Baixa Grande do Ribeiro      | PI | 0,0               | 28,1              | 75,9               | 22,7             | 38,8                | 27,3                | 7,0               | 4,6               | 2,0              | 49,0             |
| Boa Vista                    | RR | 0,0               | 10,5              | 23,5               | 3,9              | 10,8                | 8,3                 | 1,1               | 5,2               | 1,1              | 54,0             |
| Boca do Acre                 | AM | 0,0               | 22,1              | 58,7               | 38,5             | 24,1                | 19,6                | 10,7              | 5,2               | 1,8              | 59,0             |
| Canabrava do Norte           | MT | 4,5               | 22,2              | 87,9               | 13,4             | 56,1                | 43,3                | 8,3               | 4,6               | 1,3              | 36,0             |
| Chupinguaia                  | RO | 6,5               | 10,2              | 48,6               | 13,7             | 33,1                | 14,5                | 2,2               | 4,4               | 3,1              | 32,0             |
| Correntina                   | BA | 2,5               | 16,0              | 53,0               | 27,2             | 31,4                | 19,0                | 4,0               | 4,6               | 1,6              | 41,0             |
| Fortaleza do Tabocão         | TO | 0,0               | 35,8              | 105,8              | 19,4             | 53,8                | 68,8                | 13,2              | 5,0               | 3,0              | 49,0             |
| Gurupi                       | TO | 0,0               | 12,6              | 30,7               | 15,6             | 10,2                | 11,0                | 6,3               | 5,2               | 1,6              | 67,0             |
| Iporá                        | GO | 3,5               | 13,7              | 54,3               | 14,1             | 32,1                | 22,2                | 6,8               | 4,5               | 1,7              | 41,0             |
| Nova Lacerda                 | MT | 0,0               | 35,5              | 78,1               | 21,5             | 30,8                | 35,9                | 7,7               | 5,2               | 4,1              | 61,0             |
| Paragominas                  | PA | 0,0               | 33,3              | 73,9               | 21,3             | 28,6                | 25,8                | 10,8              | 5,1               | 1,2              | 61,0             |
| Plácido de Castro            | AC | 9,0               | 27,4              | 106,1              | 7,6              | 66,4                | 37,9                | 9,5               | 4,4               | 2,8              | 37,0             |
| Santa Carmem                 | MT | 0,0               | 30,2              | 69,3               | 16,2             | 27,4                | 34,1                | 10,8              | 5,3               | 0,9              | 60,0             |
| Santana                      | AP | 0,0               | 17,7              | 45,4               | 6,7              | 20,8                | 15,4                | 6,2               | 5,3               | 0,7              | 54,0             |
| Santana do Araguaia          | PA | 0,0               | 25,7              | 49,2               | 5,8              | 15,2                | 16,3                | 6,7               | 5,6               | 1,6              | 69,0             |
| Santarém                     | PA | 0,0               | 45,8              | 79,6               | 16,0             | 18,6                | 31,4                | 13,3              | 5,8               | 1,9              | 77,0             |
| São Raimundo das Mangabeiras | MA | 2,0               | 37,9              | 103,5              | 43,5             | 56,1                | 43,9                | 8,6               | 4,7               | 0,9              | 46,0             |
| Sapezal                      | MT | 4,0               | 25,9              | 79,3               | 23,9             | 45,4                | 35,0                | 5,6               | 4,5               | 2,4              | 43,0             |

\*mmolc.dm<sup>3</sup>; <sup>(a)</sup>Alumínio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(b)</sup>Cálcio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(c)</sup> somatório de cátions e H<sup>+</sup> do solo (K + Ca + Mg + H + Al); <sup>(d)</sup> P Resina; <sup>(e)</sup> Método SMP; <sup>(f)</sup> Matéria Orgânica pelo método colorimétrico; <sup>(g)</sup> Magnésio KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(h)</sup> pH em CaCl<sub>2</sub>; <sup>(i)</sup> Potássio determinado em resina; <sup>(j)</sup> porcentagem da CTC ocupada por K, Mg e Ca trocável

Tabela 10 - Teores de Fe e Al extraídos por oxalato de amônio e ditionito-citrato-bicarbonato

| MUNICÍPIO                    | Al <sub>DCB</sub> | Não cultivada<br>(g.kg <sup>-1</sup> ) |                   | Fe <sub>DCB</sub> | Fe <sub>OX</sub> | Cultivada<br>(g.kg <sup>-1</sup> ) |                   | Fe <sub>DCB</sub> | Fe <sub>OX</sub> |
|------------------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                              |                   | Alox                                   | Al <sub>DCB</sub> |                   |                  | Alox                               | Al <sub>DCB</sub> |                   |                  |
| Açailândia                   | 8,24              | 0,96                                   | 27,90             | 1,25              | 10,14            | 1,21                               | 27,20             | 1,83              |                  |
| Ariquemes                    | 11,26             | 1,21                                   | 49,00             | 2,38              | 12,54            | 1,01                               | 48,10             | 1,65              |                  |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 3,14              | 0,63                                   | 16,20             | 0,55              | 6,12             | 0,63                               | 16,90             | 0,78              |                  |
| Boa Vista                    | 1,98              | 0,28                                   | 1,50              | 0,05              | 3,94             | 0,41                               | 2,10              | 0,25              |                  |
| Boca do Acre                 | 6,24              | 0,26                                   | 19,30             | 1,48              | 6,52             | 0,37                               | 15,00             | 1,83              |                  |
| Canabrava do Norte           | 7,94              | 2,98                                   | 14,90             | 2,43              | 8,62             | 2,39                               | 12,50             | 1,88              |                  |
| Chupinguaia                  | 2,22              | 0,84                                   | 3,40              | 0,70              | 4,74             | 1,69                               | 8,80              | 1,25              |                  |
| Correntina                   | 6,10              | 0,36                                   | 14,90             | 0,70              | 6,56             | 0,32                               | 11,60             | 0,63              |                  |
| Fortaleza do Tabocão         | 24,94             | 5,69                                   | 42,70             | 2,43              | 17,46            | 7,11                               | 44,50             | 3,48              |                  |
| Gurupi                       | 3,12              | 0,81                                   | 0,80              | 0,48              | 4,18             | 0,31                               | 1,50              | 0,48              |                  |
| Iporá                        | 7,72              | 1,89                                   | 23,80             | 1,55              | 6,84             | 1,30                               | 23,20             | 1,35              |                  |
| Nova Lacerda                 | 7,56              | 0,73                                   | 19,80             | 0,98              | 8,42             | 1,26                               | 31,70             | 1,80              |                  |
| Paragominas                  | 6,48              | 1,68                                   | 15,60             | 1,48              | 8,68             | 2,10                               | 14,40             | 2,00              |                  |
| Plácido de Castro            | 10,76             | 1,32                                   | 31,10             | 1,40              | 10,90            | 2,09                               | 28,60             | 3,60              |                  |
| Santa Carmem                 | 9,26              | 2,60                                   | 19,70             | 1,75              | 11,10            | 2,38                               | 22,40             | 2,10              |                  |
| Santana                      | 12,68             | 1,51                                   | 31,80             | 0,70              | 8,68             | 1,05                               | 18,90             | 0,55              |                  |
| Santana do Araguaia          |                   |  |                   |                   | 6,72             | 0,45                               | 28,90             | 1,93              |                  |
| Santarém                     | 3,52              | 1,41                                   | 7,50              | 1,58              | 9,04             | 0,82                               | 20,20             | 0,65              |                  |
| São Raimundo das Mangabeiras | 6,08              | 2,32                                   | 18,40             | 1,23              | 9,48             | 2,46                               | 23,00             | 1,58              |                  |
| Sapezal                      | 11,92             | 7,49                                   | 36,30             | 1,70              | 14,16            | 4,04                               | 39,50             | 1,88              |                  |

Os solos não cultivados apresentam teores baixos de nutrientes, e por consequência baixa saturação por bases (V%). Exceções marcantes ficam para os solos de Nova Lacerda – MT e Açailândia, que apresentam valores considerados altos para a V%, bem como teores considerados adequados para Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg). Estes mesmos solos apresentam valores insignificantes de alumínio trocável (Al) e pH superior a cinco, o que já é considerado adequado. São solos naturalmente férteis

do ponto de vista químico, onde seria recomendado apenas incremento nos valores de P, até que se atinjam valores adequados. Os demais solos não cultivados são bastante pobres, comumente apresentando V% inferior a 10, e demandam altas doses de calcário para sua correção química (elevação dos teores de bases, pH, e diminuição do Al tóxico), bem como fosfatagem para correção dos teores de P.

Os solos cultivados apresentam teores mais adequados ao uso agrícola, porém diversos pontos apresentaram teores baixos de Ca, Mg, V%, pH e P. Uma melhora nos teores destes nutrientes e diminuição do teor de Al tóxico trará grandes benefícios aos cultivos agrícolas, e um dos desafios para estas regiões, no que se refere à melhoria química dos solos, é a dificuldade de acesso, distância de centros produtores de insumos, e o consequente elevado valor dos mesmos para os produtores. De toda maneira, o uso de calcário, dolomítico ou calcítico, gesso agrícola e fontes concentradas de P como o superfosfato simples (SSP) tendem a apresentar bons retornos na produtividade das culturas.

Por fim, são solos que comumente apresentam baixos teores de matéria orgânica e CTC, evidenciando a fragilidade do sistema agrícola e a baixa capacidade de retenção de nutrientes, notadamente cátions básicos como o Ca e Mg. Um manejo que priorize pilares como conservacionismo, intensificação do uso de culturas de cobertura, rotação de culturas e cobertura do solo apresentará expressivos resultados em termos de produtividade, bem como maior resiliência a condições climáticas desfavoráveis, quando comparados com um manejo que não priorize o aumento da matéria orgânica e cobertura do solo.

## **4.2. Adsorção de P**

Os resultados nas tabelas 11 a 14 mostram, para cada solo e cada tipo de uso, a qualidade de cada um dos quatro modelos estimados, bem como os valores das constantes que permitem o cálculo da quantidade de adsorbato adsorvido em equilíbrio ( $q_e$ ) em função da concentração de equilíbrio da solução ( $C_e$ ).

Nas tabelas 11 e 12 estão compilados os resultados de qualidade de ajuste do modelo aos dados experimentais medida pelo  $R^2$ , seguida pela constante  $K_L$  (constante de Langmuir, que traduz a capacidade de adsorção do adsorvente considerando uma monocamada de adsorbato), e da  $q_{max}$ , também entendida como a CMAP, dos solos analisados. Os dados estão agrupados, ainda, em duas colunas separando solos cultivados e não cultivados.

Tabela 11 - Constantes  $K_L$  determinadas para a equação de **Langmuir** por **ajuste linear**, valor de  $R^2$  e valor da CMAP de cada solo analisado. Os valores estão agrupados em solos cultivados e não cultivados.

| Amostra                      | $K_L$                 |        |   | $K_L$                     |        |   |
|------------------------------|-----------------------|--------|---|---------------------------|--------|---|
|                              | $R^2$                 | $K_L$  | $Q_{max}$<br>(CMAP<br>[mg kg <sup>-1</sup> ]) | $R^2$                     | $K_L$  | $Q_{max}$<br>(CMAP<br>[mg kg <sup>-1</sup> ]) |
|                              | <i>Solo cultivado</i> |        |   | <i>Solo não cultivado</i> |        |   |
| Açailândia                   | 0,95                  | 0,0852 | 710   | 0,92                      | 0,0933 | 520   |
| Ariquemes                    | 0,75                  | 0,1058 | 492   | 0,89                      | 0,203  | 741   |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 0,75                  | 0,1721 | 210   | 0,93                      | 0,0993 | 431   |
| Boa Vista                    | 0,54                  | 0,2958 | 45  | 0,8                       | 0,5223 | 58  |
| Boca do Acre                 | 0,91                  | 0,0691 | 302   | 0,83                      | 0,0894 | 521   |
| Canabrava do Norte           | 0,92                  | 0,1558 | 769   | 0,84                      | 0,0601 | 1887  |
| Chupinguaia                  | 0,84                  | 0,1646 | 269   | 0,86                      | 0,1193 | 311   |
| Correntina                   | 0,87                  | 0,3235 | 112   | 0,87                      | 0,1551 | 410   |
| Fortaleza do Tabocão         | 0,91                  | 0,0695 | 2585  | 0,88                      | 0,1432 | 2710  |
| Gurupi                       | 0,52                  | 0,0672 | 85  | 0,87                      | 0,0705 | 502   |
| Iporá                        | 0,84                  | 0,0994 | 556   | 0,91                      | 0,1956 | 816   |
| Nova Lacerda                 | 0,82                  | 0,0582 | 501   | 0,83                      | 0,1575 | 359   |
| Paragominas                  | 0,93                  | 0,1107 | 704   | 0,91                      | 0,2006 | 808   |
| Plácido de Castro            | 0,93                  | 0,2327 | 737   | 0,93                      | 0,2878 | 859   |
| Santa Carmem                 | 0,88                  | 0,1299 | 791   | 0,94                      | 0,3382 | 998   |
| Santana                      | 0,87                  | 0,1662 | 579   | 0,73                      | 0,0564 | 1330  |
| Santana do Araguaia          | 0,91                  | 0,1036 | 381   | -                         | -      | -   |
| Santarém                     | 0,89                  | 0,0936 | 548   | 0,93                      | 0,1522 | 646   |
| São Raimundo das Mangabeiras | 0,9                   | 0,0922 | 790   | 0,93                      | 0,365  | 875   |
| Sapezal                      | 0,95                  | 0,0878 | 818   | 0,94                      | 0,2256 | 3248  |

Tabela 12 - Constantes  $K_L$  determinadas para a equação de **Langmuir** por **ajuste não-linear**, valor de  $R^2$  e valor da CMAP de cada solo analisado. Os valores estão agrupados em solos cultivados e não cultivados.

| Amostra                      | $Q_{max}$             |        |                               | $Q_{max}$                 |        |                               |
|------------------------------|-----------------------|--------|-------------------------------|---------------------------|--------|-------------------------------|
|                              | $R^2$                 | $K_L$  | (CMAP [mg kg <sup>-1</sup> ]) | $R^2$                     | $K_L$  | (CMAP [mg kg <sup>-1</sup> ]) |
|                              | <i>Solo cultivado</i> |        |                               | <i>Solo não cultivado</i> |        |                               |
| Açailândia                   | 0,95                  | 0,0879 | 692                           | 0,93                      | 0,0799 | 519                           |
| Ariquemes                    | 0,76                  | 0,1654 | 450                           | 0,9                       | 0,2245 | 697                           |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 0,76                  | 0,1084 | 235                           | 0,93                      | 0,1052 | 418                           |
| Boa Vista                    | 0,71                  | 0,7380 | 41                            | 0,9                       | 2,0706 | 53                            |
| Boca do Acre                 | 0,91                  | 0,0824 | 285                           | 0,84                      | 0,0867 | 507                           |
| Canabrava do Norte           | 0,93                  | 0,1182 | 785                           | 0,85                      | 0,0691 | 1760                          |
| Chupinguaia                  | 0,85                  | 0,1991 | 259                           | 0,86                      | 0,1127 | 311                           |
| Correntina                   | 0,90                  | 0,5714 | 102                           | 0,89                      | 0,2502 | 377                           |
| Fortaleza do Tabocão         | 0,93                  | 0,0546 | 2611                          | 0,91                      | 0,2406 | 2392                          |
| Gurupi                       | 0,52                  | 0,0835 | 80                            | 0,88                      | 0,0584 | 508                           |
| Iporá                        | 0,85                  | 0,0902 | 543                           | 0,93                      | 0,1730 | 795                           |
| Nova Lacerda                 | 0,83                  | 0,0429 | 532                           | 0,84                      | 0,2277 | 337                           |
| Paragominas                  | 0,94                  | 0,0968 | 700                           | 0,93                      | 0,1798 | 783                           |
| Plácido de Castro            | 0,94                  | 0,2253 | 709                           | 0,94                      | 0,2682 | 827                           |
| Santa Carmem                 | 0,88                  | 0,1270 | 779                           | 0,95                      | 0,2900 | 973                           |
| Santana                      | 0,88                  | 0,1919 | 543                           | 0,76                      | 0,1411 | 1154                          |
| Santana do Araguaia          | 0,92                  | 0,1161 | 372                           | -                         | -      | -                             |
| Santarém                     | 0,90                  | 0,0865 | 536                           | 0,94                      | 0,1475 | 625                           |
| São Raimundo das Mangabeiras | 0,90                  | 0,0811 | 801                           | 0,94                      | 0,4061 | 844                           |
| Sapezal                      | 0,96                  | 0,0677 | 849                           | 0,95                      | 0,2500 | 3035                          |

Podemos observar uma grande variabilidade nos valores de CMAP e  $K_L$ , o que indica a presença de solos com grau de interação com P bastante distintos. Mais adiante exploraremos os níveis de correlação entre algumas variáveis químicas e físicas dos solos com estes resultados, de maneira a compreender melhor os fatores determinantes para que um solo seja mais ou menos reativo ao P.

Os valores de  $R^2$  foram em sua grande maioria bastante elevados, com 46% dos pontos superando 0,9 de  $R^2$ , e 87% dos pontos com  $R^2$  superior a 0,8 para o **ajuste linear** da isoterma aos dados experimentais.

Já quando consideramos o **ajuste não-linear**, observamos uma importante melhora na performance do ajuste, chegando a 59% das amostras com  $R^2$  superior a 0,9. Porém o número de amostras com  $R^2$  superior a 0,8 se manteve em 87%.

O ajuste não teve boa qualidade para as amostras de Boa Vista – RR e Gurupi – TO, com performance inferior a 0,6 para o método linear. Isso se deve, muito provavelmente, aos baixos teores de argila das amostras, o que as torna excepcionalmente sensíveis a erros e mesmo a variabilidade do teor de argila e, por consequência, dos principais componentes reativos ao P no solo. Como a metodologia prevê o uso de 1g de solo em cada ponto determinado, é esperado que, em casos como os destes solos, a presença de apenas alguns grânulos de areia de maior volume e massa, já afete significativamente os resultados.

De modo geral, podemos afirmar que a isoterma de Langmuir é uma boa maneira de descrever o comportamento da adsorção de P a solos em concentrações crescentes de P, e que o ajuste não-linear promove uma leve melhora nos resultados gerais de ajuste do modelo aos dados experimentais. No presente estudo esta melhora média foi da ordem de 1,7%.

Os dados também foram ajustados à isoterma de Freundlich, e nas tabelas 13 e 14 estão compilados os resultados de qualidade de ajuste do modelo aos dados experimentais medida pelo  $R^2$ , seguida pela constante  $K_F$  (constante de Freundlich, que traduz a capacidade de adsorção do adsorvente considerando uma multicamada de adsorbato, onde a energia de atração adsorvente-adsorbato diminui à medida que a camada de adsorbato está mais distante da superfície adsorvente), e da constante N, um parâmetro empírico. Os dados estão agrupados, ainda, em duas colunas separando solos cultivados e não cultivados.

Tabela 13 - Constantes determinadas para a equação de **Freundlich** por ajuste linear e valor de  $R^2$ 

| Amostra                      | $R^2$ $K_F$ N         |        |      | $R^2$ $K_F$ N             |        |      |
|------------------------------|-----------------------|--------|------|---------------------------|--------|------|
|                              | <i>Solo cultivado</i> |        |      | <i>Solo não cultivado</i> |        |      |
| Açailândia                   | 0,95                  | 0,0938 | 2,16 | 1,00                      | 0,1006 | 2,84 |
| Ariquemes                    | 0,8                   | 0,1197 | 3,32 | 0,98                      | 0,2041 | 3,29 |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 0,9                   | 0,0499 | 2,70 | 0,95                      | 0,0875 | 2,91 |
| Boa Vista                    | 0,73                  | 0,0204 | 4,91 | 0,9                       | 0,0334 | 6,64 |
| Boca do Acre                 | 0,95                  | 0,0443 | 2,38 | 0,95                      | 0,1145 | 3,18 |
| Canabrava do Norte           | 0,94                  | 0,1669 | 2,76 | 0,96                      | 0,3718 | 3,34 |
| Chupinguaia                  | 0,95                  | 0,0825 | 3,90 | 0,9                       | 0,0798 | 3,44 |
| Correntina                   | 0,91                  | 0,0383 | 3,26 | 0,98                      | 0,1185 | 3,69 |
| Fortaleza do Tabocão         | 0,97                  | 0,4232 | 2,81 | 0,96                      | 0,5908 | 3,02 |
| Gurupi                       | 0,56                  | 0,0169 | 3,01 | 0,97                      | 0,0917 | 2,88 |
| Iporá                        | 0,98                  | 0,1276 | 3,25 | 0,99                      | 0,2031 | 2,99 |
| Nova Lacerda                 | 0,89                  | 0,0846 | 2,82 | 0,91                      | 0,1092 | 3,87 |
| Paragominas                  | 0,96                  | 0,1241 | 2,52 | 0,99                      | 0,2064 | 3,05 |
| Plácido de Castro            | 0,99                  | 0,1998 | 3,15 | 0,99                      | 0,2395 | 3,05 |
| Santa Carmem                 | 0,84                  | 0,1495 | 2,53 | 0,98                      | 0,2756 | 2,83 |
| Santana                      | 0,99                  | 0,1619 | 3,52 | 0,95                      | 0,3503 | 4,31 |
| Santana do Araguaia          | 0,9                   | 0,0749 | 2,80 | -                         | -      | -    |
| Santarém                     | 0,99                  | 0,1129 | 2,99 | 0,98                      | 0,1479 | 2,94 |
| São Raimundo das Mangabeiras | 0,89                  | 0,1149 | 2,24 | 0,97                      | 0,2892 | 3,54 |
| Sapezal                      | 0,99                  | 0,1119 | 2,19 | 0,95                      | 0,6906 | 2,54 |

Tabela 14 - Constantes determinadas para a equação de **Freundlich** por ajuste não-linear e valor de  $R^2$

| Amostra                      | $R^2$ KF N            |        |      | $R^2$ KF N                |        |      |
|------------------------------|-----------------------|--------|------|---------------------------|--------|------|
|                              | <i>Solo cultivado</i> |        |      | <i>Solo não cultivado</i> |        |      |
| Açailândia                   | 0,96                  | 0,1208 | 2,58 | 0,99                      | 0,1048 | 2,94 |
| Ariquemes                    | 0,85                  | 0,1242 | 3,42 | 0,98                      | 0,214  | 3,49 |
| Baixa Grande do Ribeiro      | 0,86                  | 0,0445 | 2,41 | 0,96                      | 0,0987 | 3,22 |
| Boa Vista                    | 0,73                  | 0,0214 | 5,29 | 0,9                       | 0,0345 | 7,04 |
| Boca do Acre                 | 0,95                  | 0,0496 | 2,58 | 0,95                      | 0,1066 | 2,98 |
| Canabrava do Norte           | 0,96                  | 0,1874 | 3,07 | 0,97                      | 0,3635 | 3,28 |
| Chupinguaia                  | 0,92                  | 0,0888 | 4,22 | 0,9                       | 0,0861 | 3,69 |
| Correntina                   | 0,92                  | 0,0415 | 3,63 | 0,98                      | 0,1276 | 4,00 |
| Fortaleza do Tabocão         | 0,97                  | 0,4045 | 2,69 | 0,98                      | 0,6808 | 3,48 |
| Gurupi                       | 0,68                  | 0,0134 | 2,39 | 0,97                      | 0,0839 | 2,68 |
| Iporá                        | 0,97                  | 0,1183 | 3,03 | 0,99                      | 0,2152 | 3,18 |
| Nova Lacerda                 | 0,91                  | 0,0711 | 2,47 | 0,92                      | 0,1178 | 4,20 |
| Paragominas                  | 0,98                  | 0,1401 | 2,78 | 0,99                      | 0,2181 | 3,25 |
| Plácido de Castro            | 0,99                  | 0,2232 | 3,58 | 0,99                      | 0,2691 | 3,53 |
| Santa Carmem                 | 0,91                  | 0,1708 | 2,82 | 0,99                      | 0,3128 | 3,33 |
| Santana                      | 0,99                  | 0,1685 | 3,68 | 0,93                      | 0,334  | 4,10 |
| Santana do Araguaia          | 0,90                  | 0,0935 | 3,37 | -                         | -      | -    |
| Santarém                     | 0,99                  | 0,1104 | 2,94 | 0,99                      | 0,1646 | 3,27 |
| São Raimundo das Mangabeiras | 0,93                  | 0,1317 | 2,47 | 0,96                      | 0,3249 | 4,13 |
| Sapezal                      | 0,99                  | 0,1264 | 2,39 | 0,97                      | 0,8644 | 3,24 |

Podemos, assim como no ajuste à isoterma de Langmuir, observar uma grande variabilidade nos valores de  $K_F$  e  $N$ , o que também nos permite chegar à mesma conclusão, ou seja, solos com grau de interação com  $P$  bastante distintos. Exploraremos os níveis de correlação entre algumas variáveis químicas e físicas dos solos com estes resultados na seção 4.4 deste documento, de maneira a compreender melhor os fatores determinantes para que um solo seja mais ou menos reativo ao  $P$ .

Os valores de  $R^2$  foram em sua grande maioria bastante elevados, com 85% dos pontos superando 0,9 de  $R^2$ , e 95% dos pontos com  $R^2$  superior a 0,8 para o **ajuste linear** da isoterma aos dados experimentais.

Já quando consideramos o **ajuste não-linear**, observamos uma leve melhora na performance do ajuste, chegando a 90% das amostras com  $R^2$  superior a 0,9. Porém o número de amostras com  $R^2$  superior a 0,8 se manteve em 95%.

O ajuste também não teve boa qualidade para as amostras de Boa Vista – RR e Gurupi – TO, porém foi superior ao ajuste à isoterma de Langmuir. Um fator que explica bem a qualidade inferior de ajuste nestes pontos é, também, a baixa concentração de argila destes solos. O ajuste pelo método não-linear apresentou melhora considerável no ponto de Gurupi – TO.

De modo geral, podemos afirmar que a isoterma de Freundlich é uma boa maneira de descrever o comportamento da adsorção de P a solos em concentrações crescentes de P, e que o ajuste não-linear promove uma leve melhora nos resultados gerais de ajuste do modelo aos dados experimentais. No presente estudo esta melhora média foi da ordem de 0,8%. Diferentemente do método de Langmuir, no ajuste não-linear ao modelo de Freundlich alguns solos apresentaram  $R^2$  inferior ao do ajuste linear, cabendo utilizar sempre o ajuste com melhor  $R^2$  para fins de compreensão da dinâmica do P nos solos.

### **4.3. Curva de CMAP para as amostras analisadas, segmentadas por classe de uso**

As tabelas 11 a 14 compilam os resultados da CMAP ( $q_{max}$ ), das constantes  $K_L$  (constante de energia de ligação de Langmuir),  $K_F$  (constante de energia de ligação de Freundlich) e  $N$  (coeficiente empírico que mede o grau de afinidade entre o P e o solo, onde valores de  $N$  entre um e dez representam adsorção favorável do P ao solo), além da qualidade de ajuste dos modelos de Freundlich e Langmuir, linearizados e não-linearizados. Os modelos não-lineares aparentemente se ajustaram de maneira melhor aos dados experimentais, embora não haja diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre a média das populações de  $R^2$  dos modelos lineares e não-lineares. Os métodos de ajuste dos pontos experimentais são bastante úteis para comparar diferentes tipos de solos e tratamentos, conforme afirma Barrow (1978), e foram obtidos níveis muito bons de ajustes.

Uma leve melhoria na qualidade de ajuste dos modelos é esperada uma vez que o sistema desenvolvido usa as constantes determinadas pela linearização como “sementes” para o modelo de otimização associado à determinação não-linear, que na prática provê pequenas

mudanças nas constantes determinadas de modo a maximizar o valor de  $R^2$  do modelo. Isso pode ser observado na figura 12, que demonstra a densidade de pontos de  $R^2$  e a mediana obtida para cada modelo.

Uma discussão mais aprofundada sobre as classes de CMAP e sua correlação com demais atributos do solo está disponível na sessão 4.4 deste documento. Além disso, na figura 12 também fica claro que o modelo de Freundlich se adequa melhor aos pontos experimentais determinados. Este comportamento não é esperado quando se trabalha com concentrações iniciais de P na solução ainda maiores do que as objeto deste estudo, aproximando-se da CMAP determinada pelo modelo de Langmuir.

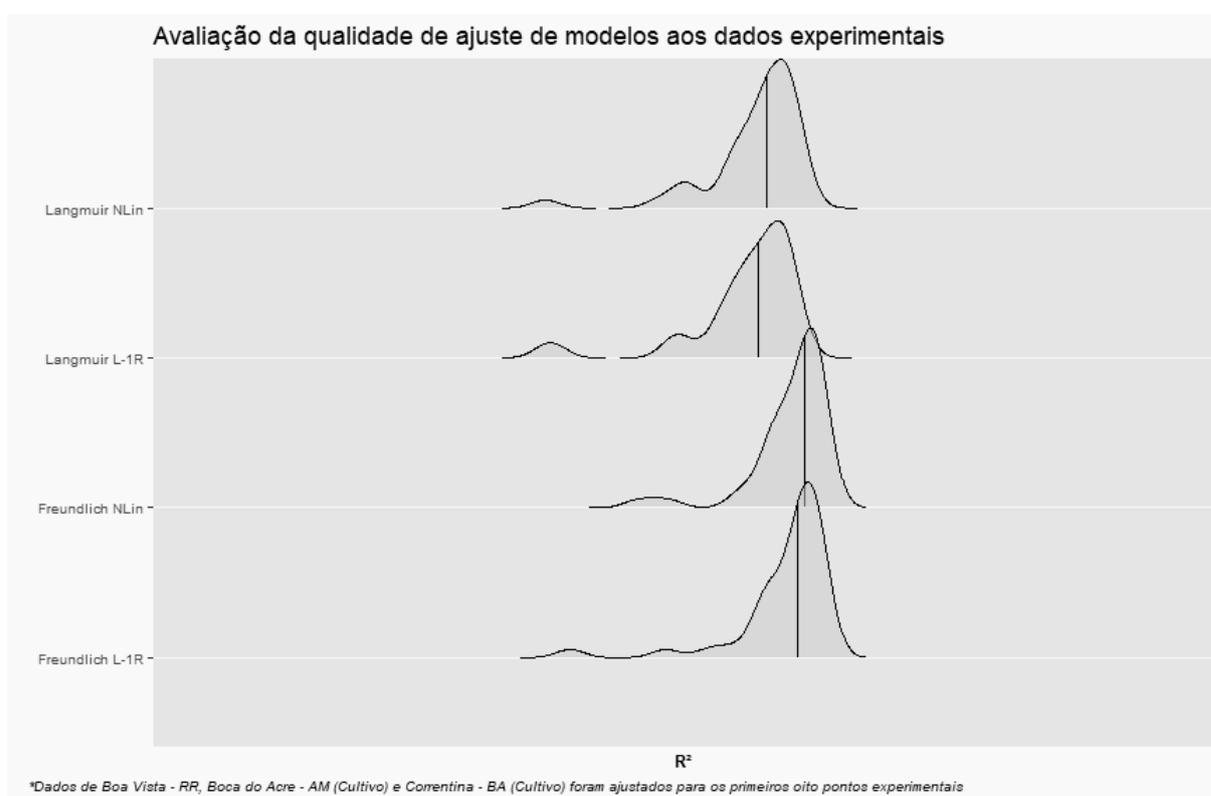


Figura 12 – Densidade de distribuição de valores de  $R^2$  para diferentes modelos de ajuste dos dados experimentais, utilizado para evidenciar a diferença entre as medianas (linha escura no centro da distribuição de cada modelo).

Langmuir Nlin (Langmuir não-linear); Langmuir L-1R (Langmuir com ajuste linear de uma região); Freundlich Nlin (Freundlich não-linear); Freundlich L-1R (Freundlich com ajuste linear de uma região)

Houve situações nas quais a CMAP determinada pelo ajuste não-linear à isoterma de Langmuir foi maior em áreas não cultivadas do que em áreas cultivadas, como por exemplo

em Açailândia – MA. Este caso provavelmente pode ser explicado pelo maior teor de argila da amostra de área cultivada, com teor de  $Al_{DCB}$  20% superior ao da área não cultivada.

#### **4.4. Correlação do P-rem com o teor de Argila dos solos analisados**

Os solos analisados apresentaram teores muito variáveis de P-rem, uma vez que temos solos de reatividade muito alta com o P até solos de baixa reatividade. Uma das hipóteses testadas para explicar esta reatividade foi o teor de argila. Para avaliar tal hipótese, foi quantificada a correlação de Spearman entre o teor de argila dos solos estudados e os resultados de P-rem, correlação está dividida em duas classes, a dos solos cultivados e a dos solos não cultivados. Os resultados foram calculados e nos mostram correlações de 52% entre o P-rem e o teor de argila para áreas não cultivadas, e de 64% para áreas cultivadas.

As amostras apresentaram uma correlação média entre si, ajudando a corroborar a hipótese de que trabalhar apenas com os teores de argila como sendo a principal determinante da reatividade de um dado solo com o P apresenta limitações importantes.

Aparentemente este é um tema que ainda precisa ser explorado e consolidado quando se trata de recomendação de adubação com P para correção dos teores no solo e também para manutenção dos cultivos, além da clara necessidade dos laboratórios de análise de solos estarem mais preparados para realizarem outros tipos de análise que vão além de análises físicas e químicas clássicas para entendermos, para cada solo, ou pelo menos região, quais são as principais determinantes para uma alta reatividade do solo com o P.

#### **4.5. Correlação da CMAP com atributos dos solos analisados**

Foi examinada a correlação entre alguns atributos do solo e a CMAP estimada pelo ajuste da isoterma de Langmuir aos pontos experimentais pelo método não-linear. Como os resultados da CMAP apresentaram distribuição não normal as correlações estabelecidas foram calculadas seguindo o método de Spearman, onde todos os resultados são organizados por postos (ou um ranqueamento de menor para maior), e a correlação é feita usando os dados transformados equivalentes à posição de cada um deles dentro de uma sequência crescente. Os resultados, segmentados pelo tipo de uso do solo, podem ser analisados a seguir (Tabela 15) e são discutidos abaixo.

O método escolhido para quantificação do grau de correlação entre as variáveis analisada se deve à não-normalidade da distribuição dos dados de CMAP tanto dos solos de áreas cultivadas quanto de áreas não cultivadas. Além da CMAP, o  $Al_{ox}$  e o  $Fe_{ox}$  das áreas cultivadas e o  $Al_{DCB}$  e o  $Al_{ox}$  das amostras de áreas não cultivadas apresentaram distribuição não normal de dados quando submetidos ao teste de Anderson-Darling. Já os dados de argila, pH, M.O. e  $Fe_{DCB}$  apresentaram distribuição normal tanto para as amostras de áreas cultivadas quanto não cultivadas, e o  $Fe_{DCB}$  e o  $Fe_{ox}$  das amostras de áreas sem cultivo apresentaram normalidade. Por fim, o  $Al_{DCB}$  e o  $Fe_{DCB}$  das áreas cultivadas também possuem distribuição normal.

Ainda sobre a metodologia de determinação do coeficiente de correlação entre a CMAP e os demais atributos do solo, uma vez que a CMAP apresenta distribuição não normal, espera-se que a relação deste atributo com os demais não apresente linearidade, e, portanto, uma determinação de correlação utilizando um método linear não se mostra adequada nesta situação. Por outro lado, a correlação de Spearman permite avaliar dados como os obtidos neste estudo ou qualquer outro conjunto de dados relacionados por uma função monótona, em contraste com a correlação de Pearson que irá apresentar valores de 1 e -1 apenas quando os conjuntos de dados estão relacionados por uma função linear.

O nível de correlação entre a CMAP e o P-rem foi muito elevado, com correlações da ordem de 95% para solos não cultivados, e 96% para solos cultivados, o que permite afirmar que a análise de P-rem é bastante robusta e se correlaciona a um nível muito alto de significância com a CMAP. Além disso, a análise de P-Rem é uma análise mais comumente feita nos laboratórios brasileiros, menos morosa e mais barata, sendo uma alternativa bastante viável à determinação da CMAP, e para análises corriqueiras e a nível de propriedade a análise de P-rem se mostra uma ferramenta muito importante para ajudar a direcionar o manejo de P.

Tabela 15 – Correlação da CMAP determinada pelo método não-linear com alguns indicadores físicos, químicos e mineralógicos dos solos analisados.

| Atributo          | Unidade                             | Correlação de Spearman |                           |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|
|                   |                                     | <i>Solo cultivado</i>  | <i>Solo não cultivado</i> |
| Argila            | g.kg <sup>-1</sup>                  | 0,74***                | 0,61**                    |
| pH                |                                     | 0,31 <sup>n.s.</sup>   | 0,08 <sup>n.s.</sup>      |
| MO                | mmol.dm <sup>-3</sup>               | 0,79***                | 0,65**                    |
| Al <sub>DCB</sub> | mmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> | 0,84***                | 0,77***                   |
| Fe <sub>DCB</sub> | mmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> | 0,55*                  | 0,57*                     |
| Al <sub>ox</sub>  | mmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> | 0,91***                | 0,91***                   |
| Fe <sub>ox</sub>  | mmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> | 0,70***                | 0,69**                    |

\* - significativo a 5% de probabilidade; \*\* - significativo a 1% de probabilidade; \*\*\* - significativo a 0,1% de probabilidade; n.s. – não significativo.

Os resultados da correlação dos óxidos de Fe e Al com a CMAP são muito expressivos, notadamente o teor de Al<sub>ox</sub>. Esta conclusão destoa do trabalho de Vilar et al. (2010), que avaliou a correlação de Pearson entre os teores de Fe<sub>ox</sub> e Al<sub>ox</sub> da fração argila do horizonte B de solos do Paraná e a CMAP. Não há informação no trabalho sobre a normalidade da distribuição dos dados de CMAP, porém os resultados de correlação de Pearson entre CMAP e teor de Argila desta dissertação se aproximam muito dos dados obtidos pelo autor citado (para o presente trabalho obtivemos correlação de Pearson de 0,48 e 0,32 para Al<sub>ox</sub> e Fe<sub>ox</sub>, respectivamente, enquanto o autor citado obteve 0,42 e 0,25). O uso de correlação de Spearman neste trabalho e a de Pearson no trabalho de Vilar et al. (2010) aparentemente explicam a diferença entre os resultados obtidos.

Por outro lado, os resultados corroboram com os obtidos por Hoepers et al. (2007) e Moreira et al. (2006), e parcialmente com o de Valladares, Pereira e Dos Anjos (2003). Isso pode ser explicado uma vez que o extrator seleciona o Al de baixa cristalinidade, que é um dos compostos mais reativos com o P presente nestes solos. Na figura 15 podemos observar como a distribuição dos valores de Al<sub>ox</sub> são correlatos com a CMAP

O pH não influenciou a CMAP dos solos analisados, apresentando correlação não significativa até o nível de significância de 5% tanto para solos cultivados quanto para solos não cultivados. O pH apresentou correlação significativa ( $p < 5\%$ ) apenas com os teores de Fe dos solos cultivados ( $p \text{ Fe}_{\text{ox}} = 0,038$ ;  $p \text{ Fe}_{\text{DCB}} = 0,002$ ). Já os valores de  $\text{Fe}_{\text{DCB}}$  tiveram correlação com significância ao nível de 5%, enquanto atributos como o  $\text{Al}_{\text{ox}}$ ,  $\text{Al}_{\text{DCB}}$ , M.O. e  $\text{Fe}_{\text{ox}}$  apresentaram correlação significativa com nível de significância muito mais baixo, entre 1% e 0,1%. Costa & Bigham (2019) mencionam que partículas de óxidos, cristalinas ou não, podem ser extremamente pequenas (5-150nm) e, como consequência, ter ASE extremamente elevada, aumentando sua superfície de reação. Os mesmos autores ainda citam estudo de Peña & Torrent (1984), que buscou determinar a relação entre a ASE de óxidos de Fe e a CMAP de solos do sul da Espanha, e encontraram um coeficiente de determinação alto. De acordo com os trabalhos citados anteriormente, é esperada uma relação significativa na reatividade destes óxidos em função de sua ASE, e a quantificação deste fator provavelmente traria uma melhoria no entendimento do comportamento esperado dos óxidos de Fe cristalinos.

A correlação entre a CMAP e alguma variáveis ainda poderia apresentar significativas melhorias caso alguns dados destoantes sejam excluídos do estudo, como por exemplo na figura 13a, onde o ponto de Fortaleza do Tabocão (Guaraí) – TO, que é um outlier de CMAP no conjunto de amostras de solos cultivados, e a análise fosse feita pela correlação de Pearson. Isso fica ainda mais evidente ao comparar, na figura 13a, a linha de tendência linear obtida através do cálculo da regressão linear do tipo  $ax+b$  para os dados completos (linha tracejada) e a obtida pelos dados excluindo o outlier (linha preenchida).

Como a análise foi realizada com a correlação de Spearman (figura 13c e 13d), os outliers podem ser propriamente analisados e não é esperada melhoria na correlação de Spearman com a exclusão destes outliers.

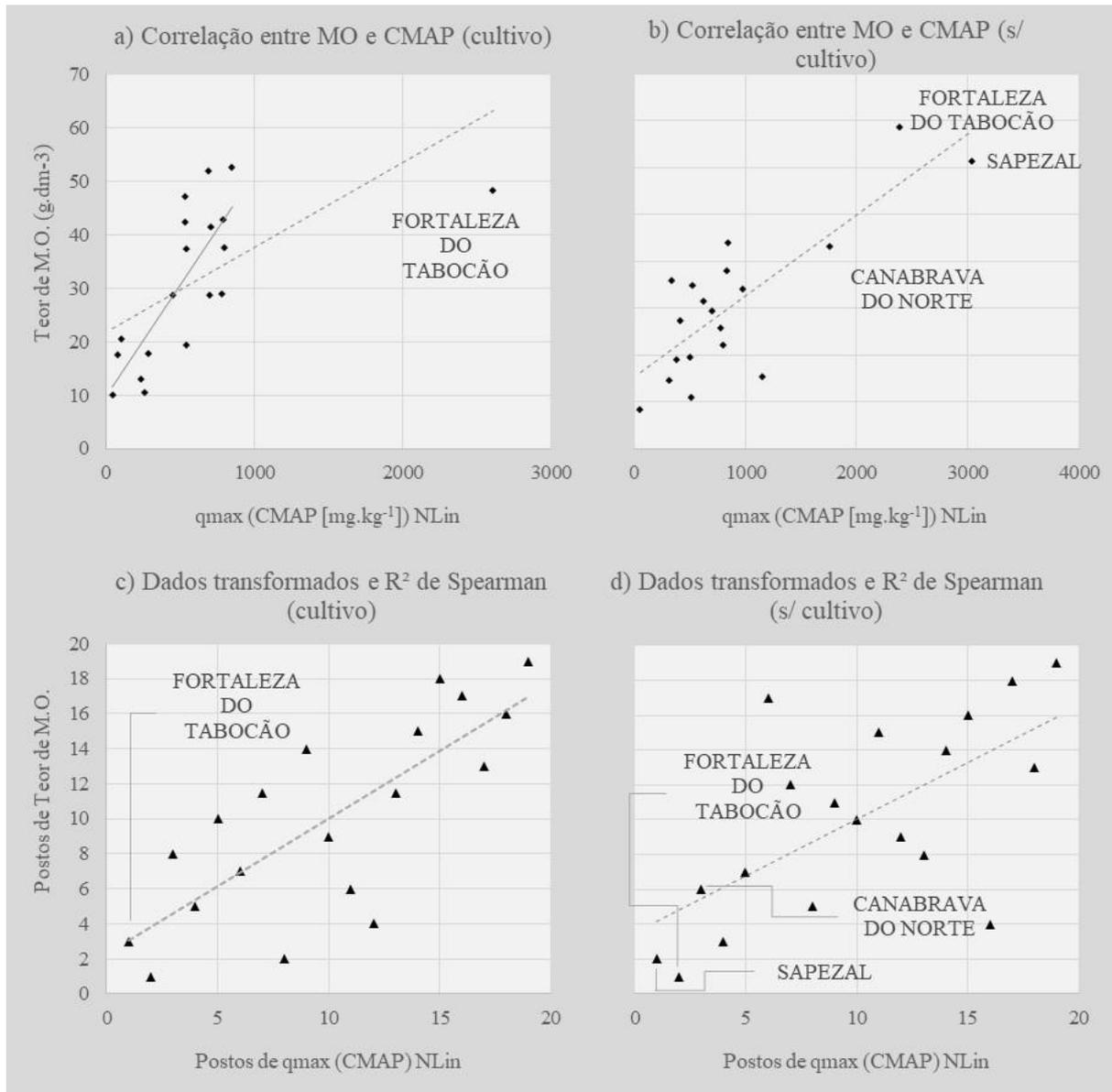


Figura 13 – *a* e *b* tratam da correlação de Pearson entre teor de matéria orgânica e a CMAP calculada pelo ajuste não-linear, e *c* e *d* tratam dos postos de cada par de dados para cálculo da correlação de Spearman. A linha não tracejada de *a* representa a tendência linear quando excluído o dado de Fortaleza do Tabocão.

A argila apresentou uma correlação menos expressiva com a CMAP do que o alumínio, tanto o Al<sub>ox</sub> quanto o Al<sub>DCB</sub>, porém mais expressiva do que o Fe<sub>DCB</sub> e o Fe<sub>ox</sub> nos solos cultivados,

o que pode ser explicado através da mineralogia da argila (teores de óxidos de Al e Fe). Quando solos como os de Fortaleza do Tabocão e Sapezal, com alto teor de Al de baixa cristalinidade (Al<sub>ox</sub>), e de Paragominas, Açailândia e Santarém, argilosos e com baixa concentração de Al e Fe (notadamente as frações extraídas por oxalato de amônio) são

analisados separadamente, a correlação de Pearson entre a argila e a CMAP passa a ser expressiva. O nível de correlação sem os pontos indicados na figura 13a passa de 0,46 para 0,84 no caso dos solos cultivados, e de 0,33 para 0,7 para os solos sem cultivo (figura 13b), indicando um comportamento linear positivo esperado entre a CMAP e o teor de argila com algumas claras exceções, que devem ser levadas em consideração quando feita a recomendação de adubação e correção dos teores de P no solo destas regiões. Já a correlação de Spearman entre a argila e a CMAP se mostrou muito interessante para os dois tipos de uso do solo, sendo significativa a 5% de probabilidade para o solo não cultivado, e a 1% para o solo cultivado. Isso se explica pela fração argila concentrar os compostos mais reativos do solo e apresentar uma ASE muito superior às frações silte e areia (NOVAIS; SMYTH, 1999; RANNO et al., 2007). Ainda assim, a argila não explica, sozinha, o aumento ou diminuição da CMAP esperada dos solos, e por este motivo a quantificação de outros parâmetros do solo se mostra muito importante, a fim de um adequado manejo dos fertilizantes fosfatados.

Dentre os parâmetros que ajudam a explicar a CMAP, especial destaque pode ser dado ao alumínio, tanto extraído por DCB quanto por Oxalato. A correlação do teor de  $Al_{DCB}$  e do  $Al_{ox}$  foi significativa a até 0,1% de probabilidade, evidenciando seu alto grau de correlação com a CMAP dos solos e o potencial de seu uso na prescrição de adubações fosfatadas corretivas e de manutenção nos solos estudados. O nível e a linearidade da correlação para este atributo dos solos podem ser observados na figura 14. Novamente, nas linhas tracejadas temos a tendência para os dados completos, e nas linhas preenchidas temos a tendência para o conjunto de dados sem os outliers.

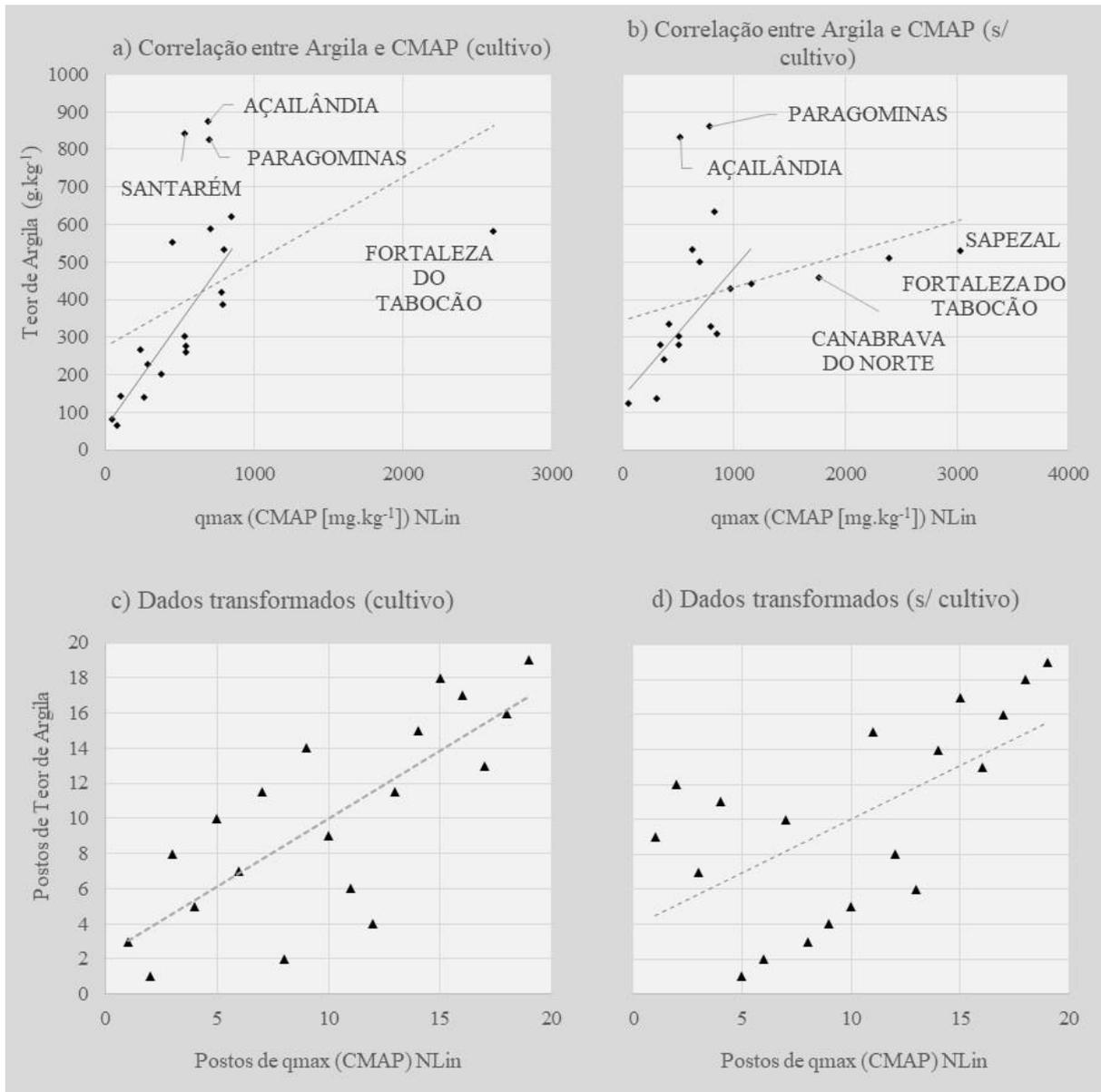


Figura 14 – *a* e *b* tratam da correlação de Pearson entre teor de argila e a CMAP calculada pelo ajuste não-linear, e *c* e *d* tratam dos postos de cada par de dados para cálculo da correlação de Spearman. A linha não tracejada de *a* representa a tendência linear quando excluído o dado de Fortaleza do Tabocão.

Correlação muito mais significativa foi encontrada entre os teores de  $Al_{ox}$  e a CMAP dos solos, como pode ser observado na figura 15. Os conjuntos de resultados apresentam correlação muito forte entre si, inclusive nos resultados de CMAP muito elevados obtidos nas amostras de Fortaleza do Tabocão, Sapezal e Canabrava do Norte, onde o erro quadrado do ajuste dos dados à regressão linear obtida não difere do erro quadrado médio de maneira significativa. Estes resultados são corroborados por uma série de estudos, sumarizados em Arai & Sparks (2007), onde os autores encontram alta associação entre a fixação de P com

$Fe_{ox}$  e  $Al_{ox}$  e também por  $Fe_{DCB}$  e  $Al_{DCB}$ , resultados iguais aos obtidos neste estudo e ilustrados na figura 15.

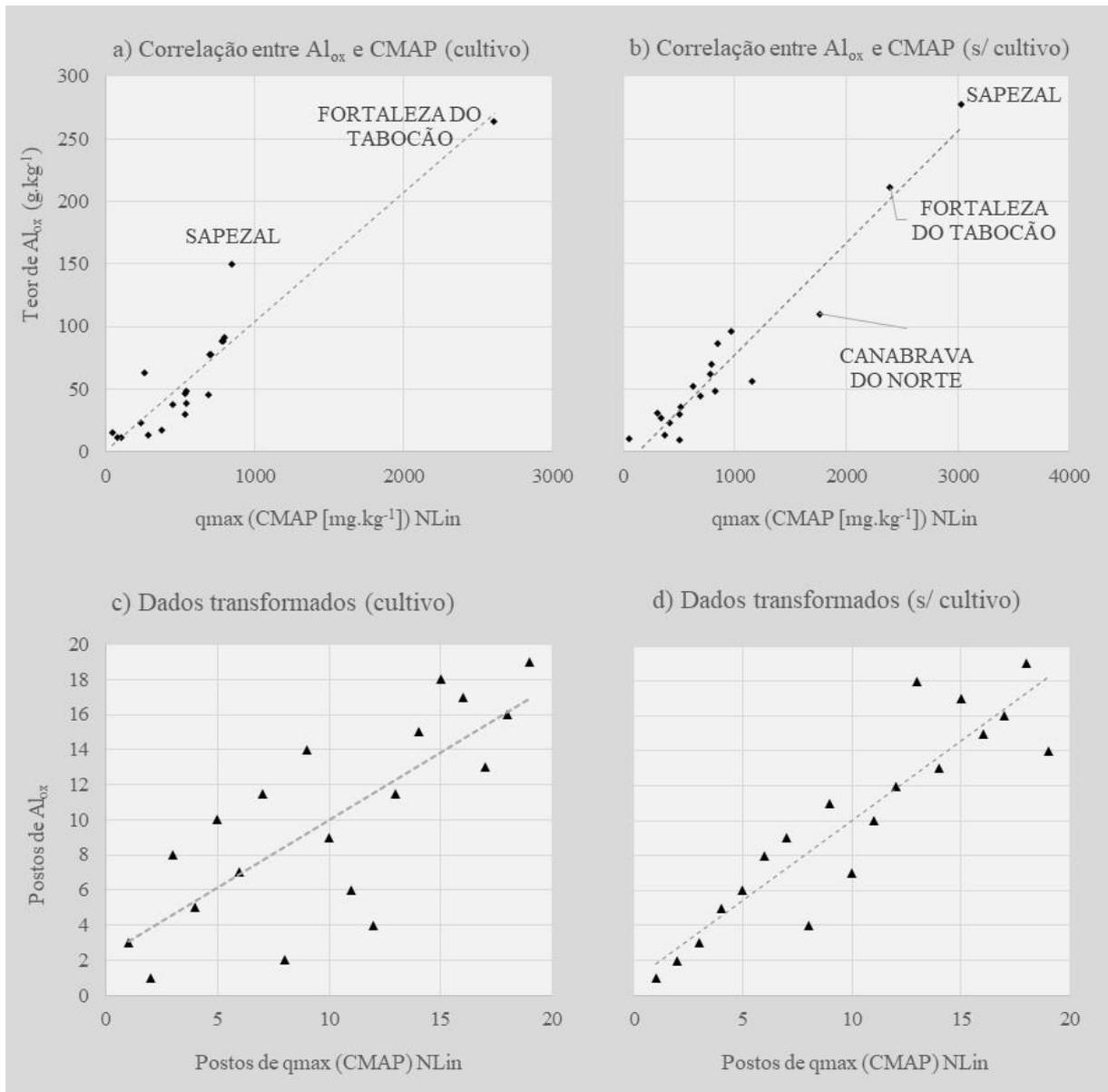


Figura 15 - *a* e *b* tratam da correlação de Pearson entre teor de  $Al_{ox}$  e a CMAP calculada pelo ajuste não-linear, e *c* e *d* tratam dos postos de cada par de dados para cálculo da correlação de Spearman.

A CMAP pode ser classificada, conforme sugestão de Curi et al. (1988), em alta, média ou baixa, sendo que: baixa quando  $CMAP < 1.000 \text{ g kg}^{-1}$ , média quando  $CMAP$  entre  $1.000$  e  $2.500 \text{ g kg}^{-1}$ ; e alta quando  $CMAP > 2.500 \text{ g kg}^{-1}$ . Nas áreas cultivadas, apenas o solo de Fortaleza do Tabocão – TO foi enquadrado na classe de alta CMAP, enquanto os demais são solos de baixa CMAP. Já para as amostras de solos não cultivados, obtivemos um solo de

alta CMAP (Sapezal – MT), três solos de média CMAP (Fortaleza do Tabocão – TO, Canabrava do Norte – MT e Santana – AP), e os demais são solos de baixa CMAP.

Considerando a grande extensão territorial e diversidade de solos coberta neste estudo, uma nova classificação da CMAP pode ser proposta, com a utilização de um algoritmo de agrupamento dos dados. Para isto, foi utilizado o algoritmo proposto por Jenks (1977) para obtenção do agrupamento ótimo dos dados em três distintas classes (alta, média e baixa). Os resultados propõem três classes, de acordo com os intervalos a seguir:

Alta: CMAP maior do que  $1.759 \text{ g kg}^{-1}$  de P

Média: CMAP entre 625 e  $1.759 \text{ g kg}^{-1}$  de P

Baixa: CMAP menor do que  $625 \text{ g kg}^{-1}$  de P

Desta forma, teríamos quatro solos com alta CMAP: Fortaleza do Tabocão – TO, de área cultivada, e Canabrava do Norte – MT, Fortaleza do Tabocão – TO e Sapezal – MT em áreas sem cultivo. Os demais solos estariam bem distribuídos entre as classes média e baixa CMAP.

A prática da fosfatagem, bem como uma adubação de manutenção adequada com P é extremamente necessária para garantir o potencial produtivo dos cultivos nesta região. Mesmo nos solos que apresentam baixa CMAP, a prática da fosfatagem é bastante recomendada com a finalidade de suprir o solo com P até que este apresente um nível de suficiência considerado adequado, já que a fração argila destes solos irá adsorver uma quantidade razoável de P.

Para os solos com alta CMAP é necessária especial atenção em práticas corretivas, já que muitas vezes eles apresentam capacidade de adsorção superior ao esperado quando se considera apenas a argila como variável na determinação da dose de P a ser utilizada. Da mesma forma, solos com elevado teor de argila, porém CMAP baixa, como os de Paragominas – PA e Açailândia – MA, podem levar ao cálculo de uma dosagem de P superior ao que seria economicamente ótimo, com um investimento em recursos além do necessário para garantir um bom patamar produtivo às culturas. A sugestão é que a prática de fosfatagem continue levando em consideração o teor de argila, porém se faz necessária a análise de outros atributos, como o teor de  $Al_{DCB}$  e  $Al_{ox}$  para um ajuste mais adequado da dosagem, especialmente nas regiões evidenciadas anteriormente neste parágrafo. A determinação do P-Rem constitui excelente alternativa para o cálculo da dosagem de P necessária para a correção dos teores do nutriente no solo e adubação de cultivos.

Com relação aos teores de  $Al_{ox}$ , atributo que apresentou correlação muito elevada com a CMAP, sugerem-se três classes, sendo:

Alta:  $Al_{ox}$  maior do que  $210 \text{ g kg}^{-1}$  de terra fina seca ao ar (TFSA)

Média:  $Al_{ox}$  entre 60 e 210 g  $kg^{-1}$  de TFSA

Baixa:  $Al_{ox}$  menor do que 60 g  $kg^{-1}$  de TFSA

Desta forma teríamos três solos com alto teor de  $Al_{ox}$ , Fortaleza do Tabocão – TO, para os dois usos, e Sapezal – MT em área sem cultivo. Os demais solos apresentam boa distribuição entre teores médios e baixos.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O ajuste dos dados experimentais de fixação de P foi quase sempre superior nos modelos não-lineares, corroborando com a recomendação de Alleoni et al. (2019) para, preferencialmente, utilizar programas computacionais para a determinação das constantes dos modelos de Freundlich e Langmuir. A isoterma de Freundlich apresentou, de forma consistente e em boa parte dos solos, superioridade à de Langmuir no ajuste dos dados experimentais;
- Quando consideramos todos os solos, é possível entender que a adubação fosfatada pode ser adaptada não somente ao teor de argila, mas também a outros fatores qualitativos da fração argila, especialmente ao teor de  $Al_{ox}$ . Esta característica do solo ainda não é considerada nas recomendações de adubação.
- Os solos “amazônicos” de Santarém, Paragominas e Açailândia apresentam comportamento da CMAP em função do teor de argila distinto dos demais solos analisados devido à mineralogia da fração argila.
- Os fatores que melhor explicam a fixação de P nos solos analisados são, em ordem decrescente:  $Al_{ox}$ ,  $Al_{DCB}$ , Matéria Orgânica,  $Fe_{ox}$ , Argila e  $Fe_{DCB}$ .
- É altamente recomendável que sejam incorporadas análises dos teores de Fe e Al extraídos por Oxalato de Amônio e/ou DCB a rotinas de recomendação de adubação fosfatada, especialmente adubações corretivas.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da (Ed. ). **Agricultura tropical quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. [s.l.] : Embrapa Informação Tecnológica, 2008.
- ALLEONI, Luís Reinaldo Ferracciú; MELLO, Jaime Wilson Vargas De; ROCHA, Wadson Sebastião Duarte Da. XII - Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica no Solo. *In: Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações*2. 1. ed. Viçosa - MG: SBCS, 2019. p. 1381.
- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F. ..; DIAS, L. E. ..; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo**. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.
- AMY BONSER, BY M.; LYNCH, Jonathan. **Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in Phaseolus vulgaris**. [s.l: s.n.].
- ANGHINONI, I.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Phosphorus sorption isotherm characteristics and availability parameters of Appalachian acidic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 27, n. 9–10, p. 2033–2048, 1996. DOI: 10.1080/00103629609369686.
- ARAI, Yuji; SPARKS, D. L. Phosphate Reaction Dynamics in Soils and Soil Components: A Multiscale Approach. **Advances in Agronomy**, [S. l.], v. 94, n. 06, p. 135–179, 2007. DOI: 10.1016/S0065-2113(06)94003-6.
- BARROW, N. J. The Description of Phosphate Adsorption Curves. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 447–462, 1978. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1978.tb00794.x.
- BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. Correção do Solo e Adubação no Sistema de Plantio Direto nos Cerrados. **Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo**, [S. l.], n. 1999, 1999.
- BROGGI, Fábio; DE OLIVEIRA, Alexandre Campelo; FREIRE, Fernando José; FREIRE, Maria Betânia Galvão dos Santos; DO NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo. Fator capacidade de fósforo em solos de pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. **Ciencia e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 77–83, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000100009.
- CAMARGO, O. A. De; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do do Instituto Agrônomo de Campinas**.CampinasIAC, , 2009.
- CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; BASSO, C. J.; EITELWEIN, M. T.; VIAN, A. L. Caracterização e estratégia de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, [S. l.], v. 7, p. 196–210, 2011.

COSTA, Antonio Carlos S. Da; BIGHAM, Jerry M. VIII - Óxidos de Ferro. *In: Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações*. Viçosa - MG: SBCS, 2019. p. 1381.

CURI, N.; CAMARGO, O. A. De; GUEDES, C. A. de A.; SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil sudeste. *In: (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Org.) REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA 1988*, Rio de Janeiro, BR. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 267–282.

DALY, K.; STYLES, D.; LALOR, S.; WALL, D. P. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 66, n. 4, p. 792–801, 2015. DOI: 10.1111/ejss.12260.

DE CAMARGO, Monica Sartori; BARBOSA, Daniel Scalia; RESENDE, Rogério Henrique; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique; PEREIRA, Hamilton Seron. Fósforo em solos de cerrado submetidos á calagem. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 187–194, 2010.

DE FARIAS, Daise Ribeiro; DE OLIVEIRA, Fábio Henrique Tavares; SANTOS, Djail; DE ARRUDA, Jandeilson Alves; HOFFMANN, Ricardo Bezerra; NOVAIS, Roberto Ferreira. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: I - Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 623–632, 2009. DOI: 10.1590/s0100-06832009000300015.

DEMATTÊ, José A. M. et al. The Brazilian soil priorities. **Geoderma Regional**, [S. l.], v. 29, n. March, 2022. DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00503.

DREW, M. C. COMPARISON OF THE EFFECTS OF A LOCALISED SUPPLY OF PHOSPHATE, NITRATE, AMMONIUM AND POTASSIUM ON THE GROWTH OF THE SEMINAL ROOT SYSTEM, AND THE SHOOT, IN BARLEY. **New Phytologist**, [S. l.], v. 75, n. 3, p. 479–490, 1975. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1975.tb01409.x.

FARIAS, Daise Ribeiro De; OLIVEIRA, Fábio Henrique Tavares De; SANTOS, Djail; ARRUDA, Jandeilson Alves De; HOFFMANN, Ricardo Bezerra; NOVAIS, Roberto Ferreira. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: I- isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 623–632, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000300015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832009000300015&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000300015&lng=pt&tlng=pt).

FONTES, Mauricio Paulo Ferreira. Intemperismo de Rochas e Minerais. *In: KER, João Carlos; CURI, Nilton; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; VIDAL-TORRADO, Pablo (org.). Pedologia Fundamentos*. 1ª Edição ed. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. p. 171–206.

FREUNDLICH, H. M. F.; OTHERS. Over the adsorption in solution. **J. Phys. Chem**, [S. l.], v. 57, n. 385471, p. 1100–1107, 1906.

GALFORD, Gillian L.; MUSTARD, John F.; MELILLO, Jerry; GENDRIN, Aline; CERRI, Carlos C.; CERRI, Carlos E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 112, n. 2, p. 576–587, 2008. DOI: 10.1016/j.rse.2007.05.017.

GÉRARD, Frédéric. **Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited** GeodermaElsevier, , 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.036.

GERSANI, M.; SACHS, T. Development correlations between roots in heterogeneous environments. **Plant, Cell & Environment**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 463–469, 1992. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00997.x.

GONCALVES, J.; NOVAIS, R.; BARROS, N.; NEVES, J.; RIBEIRO, A. **Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado** Revista brasileira de ciência do solo, 1989.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion Adsorption By Goethite and Gibbsite. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 16–26, 1974. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1974.tb01098.x.

HOEPERS, Allan; VILAR, Cesar Crispim; COSTA, Antonio Carlos Saraiva Da; JUNIOR, Ivan Granemann de Souza; FURUYA, Ernâni Massao. ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MINERALÓGICOS DA FRAÇÃO ARGILA NATURAL E DESFERRIFICADA DO HORIZONTE-B DE SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ. [S. l.], 2007.

HOLFORD, I. C. R.; WEDDERBURN, R. W. M.; MATTINGLY, G. E. G. A LANGMUIR TWO-SURFACE EQUATION AS A MODEL FOR PHOSPHATE ADSORPTION BY SOILS. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 242–255, 1974. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1974.tb01121.x.

IBGE. **MONITORAMENTO DA COBERTURA E USO DA TERRA DO BRASIL 2016 - 2018**. Rio de Janeiro, BR. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101703.pdf>.

IBGE. **Informações Técnicas**. 2020b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=notas-tecnicas>. Acesso em: 26 maio. 2020.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil. Versão 2021**. Rio de Janeiro, 2021. Escala 1:250 000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=downloads>. Acesso em: jan. 2023.

JENKS, George Frederick. **Optimal data classification for choropleth maps**. 2. ed. Kansas City - KA: University Kansas, 1977.

KÄMPF, Nestor; CURI, Nilton; MARQUES, João José. Intemperismo e Ocorrência de Minerais no Ambiente do Solo. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferraciú (org.). **Química e Mineralogia do Solo**. First ed. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 333–379.

LANGE, Anderson; DANTAS, Jeferson; FREDDI, Silva; BURATTO, Willian; SPAZIANI, Cassiano; CAIONE, Gustavo. Degradação do solo e pecuária extensiva no norte de Mato Grosso Soil degradation by the extensive livestock in the southern amazon of the state of Mato Grosso. **Nativa**, [S. l.], v. 7, p. 642–648, 2019.

LANGMUIR, Irving. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, [S. l.], v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1918. DOI: 10.1021/ja02242a004.

LYNCH, Jonathan P.; BEEBE, Stephen E. **Adaptation of Beans (Phaseolus vulgaris L.) to Low Phosphorus Availability** **HORTSCIENCE**. [s.l.: s.n.].

LYNCH, Jonathan P.; BROWN, Kathleen M. **Topsoil foraging-an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability** **Plant and Soil**. [s.l.: s.n.].

MENOTTI, Clovisson; OLIVEIRA, Boeira De; GATIBONI, Luciano Colpo; JOSÉ, David; SMYTH, Thomas Jot; ALMEIDA, Jaime Antonio. Capacidade Máxima De Adsorção De Fósforo e Constante De Energia De Ligação Em Latossolo Bruno Em Razão De Diferentes Ajustes Do Modelo De Langmuir. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. 1805–1815, 2014.

MOREIRA, Fátima Lorena Magalhães; MOTA, Francisco Ocian Bastos; CLEMENTE, Celso Augusto; AZEVEDO, Benito Moreira De; BOMFIM, Guilherme Vieira Do. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], p. 7–12, 2006. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/210>.

MUNNS, D. N.; FOX, R. L. The Slow Reaction which Continues After Phosphate Adsorption: Kinetics and Equilibrium in Some Tropical Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 46–51, 1976. DOI: 10.2136/sssaj1976.03615995004000010016x.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, [S. l.], v. 27, n. C, p. 31–36, 1962. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

NETO, Ricardo Chaves. **Isoterma De Adsorção De Fósforo Proveniente De Solução Submetida a Tratamento Magnético Para Solo Argiloso**. 2019. [S. l.], 2019.

NOVAIS, Roberto Ferreira De; SMYTH, T. Jot. **FÓSFORO EM SOLO E PLANTA EM CONDIÇÕES TROPICAIS**. Viçosa, BR: UFV, 1999.

NOVAIS, Roberto Ferreira De; SMYTH, T. Jot; NUNES, Flancer Novais. Fósforo. In: NOVAIS, Roberto Ferreira De; ALVAREZ V., Victor Hugo; BARROS, Nairam Félix De; FONTES, Renildes Lúcio F.; CANTARUTTI, Reinaldo Bertola; NEVES, Júlio César Lima (org.). **Fertilidade do Solo**. First ed. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471–550.

NOVAIS, Roberto Ferreira; ALVAREZ V., Víctor Hugo; BARROS, Nairam Félix De; FONTES, Renildes Lúcio F.; CANTARUTTI, Reinaldo Bertola; NEVES, Júlio César Lima (ORG.). **Fertilidade do Solo**. First ed. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NOVAIS, Roberto; KAMPRATH, E. J. Phosphorus Supplying Capacities of Previously Heavily Fertilized Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 42, n. 6, p. 931–935, 1978. DOI: 10.2136/sssaj1978.03615995004200060021x.

OLIVEIRA, Virlei Alvaro De; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; COUTO, Eduardo Guimarães. Solos do Bioma Cerrado. In: **Pedologia - solos dos biomas brasileiros**. 1. ed. Viçosa - MG: SBCS, 2017. p. 597.

OLSEN, Sterling R.; WATANABE, Frank S. A Method to Determine a Phosphorus Adsorption Maximum of Soils as Measured by the Langmuir Isotherm. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 144–149, 1957. DOI: 10.2136/sssaj1957.03615995002100020004x.

OZANNE, P. G. Phosphate Nutrition of Plants-A General Treatise. **The Role of Phosphorus in Agriculture**, [S. l.], p. 559–589, 1980. DOI: 10.2134/1980.roleofphosphorus.c21.

PARFITT, R. L.; RUSSELL, J. D. Adsorption on Hydrous Oxides. Iv. Mechanisms of Adsorption of Various Ions on Goethite. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 297–305, 1977. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1977.tb02238.x.

PEÑA, F.; TORRENT, J. Relationships between phosphate sorption and iron oxides in Alfisols from a river terrace sequence of Mediterranean Spain. **Geoderma**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 283–296, 1984. DOI: 10.1016/0016-7061(84)90030-2.

**Projeto MapBiomias**. 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em: 31 maio. 2022.

RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C. De; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas.

RAIJ, Bernardo Van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba, BR: IPNI, 2011.

RANNO, Sidnei Kuster; DA SILVA, Leandro Souza; GATIBONI, Luciano Colpo; RHODEN, Anderson Clayton. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do estado do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 21–28, 2007. DOI: 10.1590/s0100-06832007000100003.

SANCHEZ, Pedro A.; UEHARA, Goro. Management Considerations for Acid Soils with High Phosphorus Fixation Capacity. In: **The Role of Phosphorus in Agriculture**. [s.l.: s.n.]. p. 471–514. DOI: 10.2134/1980.roleofphosphorus.c18.

SANTOS, Raphael David; LEMOS, Raimundo Costa De; SANTOS, Humberto Gonçalves Dos; KER, João Carlos; ANJOS, Lúcia Helena Cunha Dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Fifth ed. Viçosa, BR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SOUZA, José D. E.; FILHO, Oliveira; PEREIRA, Marcos Gervasio; AQUINO, Boanerges Freire D. E. Phosphorus forms and adsorption in a typical quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Revista Caatinga**, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 343–352, 2017. Disponível em:

<http://search.proquest.com/openview/58e9ee2c33312b566a91d25c0529adc7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=546312>.

SPOSITO, Garrison. **The chemistry of soils**. Second ed. New York, USA: Oxford University Press, 2008. v. 20 DOI: 10.1126/science.ns-20.493.29.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia Vegetal**. Fifth ed. Porto Alegre, BR: artmed, 2013.

VALLADARES, Gustavo Souza; PEREIRA, Marcos Gervasio; DOS ANJOS, Lúcia Helena Cunha. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, [S. l.], v. 62, n. 1, p. 111–118, 2003. DOI: 10.1590/s0006-87052003000100014.

VILAR, Cesar Crispim; DA COSTA, Antonio Carlos Saraiva; HOEPERS, Allan; JUNIOR, Ivan Granemann de Souza. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 1059–1068, 2010. DOI: 10.1590/s0100-06832010000400006.