

**UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**LIMITE CRÍTICO AMBIENTAL DE FÓSFORO PARA SOLO DO  
CERRADO**

**LOUISE STEFANELLO HEMIELEVSKI**

*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS – BRASIL**

**2020**

**LOUISE STEFANELLO HEMIELEVSKI**

**LIMITE CRÍTICO AMBIENTAL DE FÓSFORO PARA SOLO DO  
CERRADO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

**RIO VERDE  
GOIÁS - BRASIL  
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação-- (CIP)

Hemielevski , Louise Stefanello

Limite crítico ambiental de fósforo para solo do cerrado / Louise Stefanello Hemieleviski — 2020.

58f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes.

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin:

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) — Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2019.

Inclui índice de figuras e tabelas.

1. Adubação fosfatada. 2. controle ambiental. 3. manejo do solo. I. Menezes, June Faria Scherrer. II. Boldrin, Paulo Fernandes

CDD:

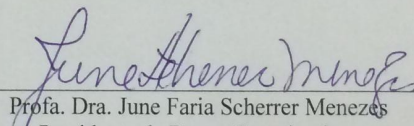
Elaborada por

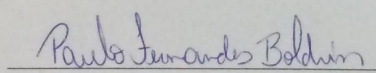
LOUISE STEFANELLO HEMIELEVSKI

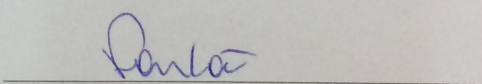
LIMITE CRÍTICO AMBIENTAL DE FÓSFORO PARA SOLO DO CERRADO

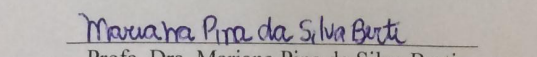
Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 17 de fevereiro de 2020

  
Prof.ª. Dra. June Faria Scherrer Menezes  
Presidente da Banca Examinadora  
Membro – FA/UniRV

  
Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin  
Membro – FA/UniRV

  
Prof.ª. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão  
Membro – FA/UniRV

  
Prof.ª. Dra. Mariana Pina da Silva Berti  
Membro – FA/UEG - Unidade Universitária de Ipameri

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, que meu deu saúde, força e sabedoria para a conclusão do curso de Mestrado em Produção Vegetal da UniRV. Sou grata por todas as bênçãos concedidas.

Aos meus pais, Cleo João Hemielevski e Adriane Maria Stefanello Hemielevski, pelo apoio, incentivo, por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos e não medirem esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

A minha irmã Laura Stefanello Hemielevski, pelo companheirismo e apoio de sempre.

A minha orientadora June Faria Scherrer Menezes, pela paciência ao me orientar e incentivo desde a graduação tornando possível a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais e a minha irmã que proveram a realização deste sonho. Obrigada pelo apoio durante a realização do curso e do mestrado. Sou eternamente grata a vocês!

A minha Orientadora Professora Dra. June Faria Scherrer Menezes, pelo apoio, amizade, compreensão e conhecimentos divididos que contribuíram para a execução deste trabalho. Foram seis anos maravilhosos ao seu lado com muita aprendizagem e companheirismo. Obrigada por tudo!

A todos os professores do curso de Mestrado em Produção Vegetal da UniRV, especialmente a Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, que disponibilizou o pouco do seu tempo para me ajudar, a Camila Ferreira pela ajuda na confecção dos gráficos e ao meu coorientador Paulo Boldrin. A Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Rio Verde – GO, especialmente a Hallyne Araújo Ferreira que nos apoiou desde o começo. Todos foram muito importantes em minha vida acadêmica ajudando tanto de forma direta, quanto indireta para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos do Mestrado, pelo incentivo e apoio constante. Agradeço de forma especial ao Rodrigo Gomes que não mediu esforços e ajudou muito na realização desse trabalho. A Lenise Selayim Salles e a Bárbara Arantes, obrigada pelos conselhos, risadas e principalmente pela amizade de vocês que vai além disso.

A Fapeg pela concessão da bolsa de estudo.

A todos que sempre torceram e acreditaram em mim, mesmo distantes. Sem vocês eu jamais conseguiria esta conquista!

## SUMÁRIO

|                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------|------|
| SUMÁRIO.....                                                          | iii  |
| LISTA DE FIGURAS.....                                                 | v    |
| LISTA DE TABELAS.....                                                 | vii  |
| RESUMO GERAL.....                                                     | viii |
| GENERAL ABSTRACT.....                                                 | ix   |
| 1 INTRODUÇÃO GERAL.....                                               | 1    |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA.....                                          | 2    |
| 2.1 Formas e dinâmica de fósforo no solo.....                         | 2    |
| 2.2 Capacidade máxima de adsorção de fósforo.....                     | 4    |
| 2.3 Formas de fósforo transferidas para o ambiente aquático.....      | 5    |
| 2.4 Estimativa do risco de transferência de fósforo no solo.....      | 6    |
| 2.5 Limite crítico ambiental de fósforo.....                          | 6    |
| REFERÊNCIAS.....                                                      | 10   |
| CAPÍTULO 1.....                                                       | 14   |
| RESUMO.....                                                           | 14   |
| ABSTRACT.....                                                         | 15   |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                     | 16   |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS.....                                             | 17   |
| 2.1 Determinação da capacidade máxima de adsorção de P dos solos..... | 20   |
| 2.2 Determinação do limite crítico ambiental de P.....                | 21   |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                         | 22   |
| 4 CONCLUSÕES.....                                                     | 31   |
| REFERÊNCIAS.....                                                      | 31   |
| CAPÍTULO 2.....                                                       | 35   |
| RESUMO.....                                                           | 35   |
| ABSTRACT.....                                                         | 36   |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                     | 37   |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS.....                                             | 38   |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                         | 39   |
| 4 CONCLUSÕES.....                                                     | 41   |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 42 |
| REFERÊNCIAS.....            | 42 |
| SUGESTÃO.....               | 43 |
| ANEXOS.....                 | 45 |



## LISTA DE FIGURAS

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 | Representação esquemática do rendimento relativo das culturas e da quantidade de P na água em função do teor de P disponível no solo, destacando-se o nível crítico de P para as culturas e o limite crítico ambiental.....                                                                                              | 7  |
| FIGURA 2 | Representação esquemática das curvas de resposta das plantas ao teor de P no solo para solos com diferentes teores de argila, segundo a CQFSRS/SC (2004). As linhas tracejadas representam os níveis críticos em cada classe textural, os quais são estabelecidos em 90% do rendimento relativo máximo das culturas..... | 9  |
| FIGURA 3 | Difratograma de raios-X de material de um Latossolo. Ana: anatase; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Ht: Hematita; Mh: maghemita; Qz: Quartzo.....                                                                                                                                                              | 17 |
| FIGURA 4 | Relação entre a concentração de P na solução de equilíbrio e a quantidade de P adsorvido pelos solos.....                                                                                                                                                                                                                | 23 |
| FIGURA 5 | Isotermas de adsorção de P pelo modelo de Langmuir em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila. Adição de 0 a 20 mg dm <sup>-3</sup> de P (A) e 40 a 120 mg dm <sup>-3</sup> de P (B).....                                                                                                                               | 24 |
| FIGURA 6 | Aumento da capacidade máxima de adsorção de de P (CMAP) em função do teor de argila do solo. Adição de 0 a 20 mg dm <sup>-3</sup> de P (A) e 40 a 120 mg dm <sup>-3</sup> de P (B).....                                                                                                                                  | 26 |
| FIGURA 7 | Teor de P na água em função da quantidade de P adicionada ao solo. Adição de 0 a 20 mg dm <sup>-3</sup> de P (A) e 40 a 120 mg dm <sup>-3</sup> de P (B).....                                                                                                                                                            | 27 |
| FIGURA 8 | Relação entre os teores de P em água em função dos teores de P extraídos por Mehlich 1 em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila e o ajuste de modelos descontínuos, indicando o valor de P-limite na intersecção das equações. Adição de 0 a 20 mg dm <sup>-3</sup> de P.....                                         | 28 |
| FIGURA 9 | Relação entre os teores de P em água em função dos teores de P extraídos por Mehlich 1 em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila e o ajuste de modelos descontínuos, indicando o valor de P-limite na intersecção das equações. Adição de 40 a 120 mg dm <sup>-3</sup> de P.....                                       | 29 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 10 | Limite Crítico Ambiental de P (LCA-P) em razão do teor de argila do solo. $P_{Lim}$ : teor limite de P para aumento da liberação de P na água; e LCA-P (simplificado): função simplificada para calcular o LCA-P.....                        | 30 |
| FIGURA 11 | Percentual de fósforo (P) e argila dos solos de amostras das propriedades componentes da micro-bacia do Ribeirão Abóbora, município de Rio Verde, GO.....                                                                                    | 39 |
| FIGURA 12 | Teor de P Mehlich 1 e LCA-P de 46 amostras da micro-bacia do Ribeirão Abóbora. As amostras foram previamente classificadas pelo modelo “LCA-P: $20 + 0,5 * \text{argila}\%$ ”, estando abaixo (círculos) ou acima (triângulos) do LCA-P..... | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                                                                                                                                           |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 | Interpretação da análise de solo para P extraído pelo Mehlich 1, de acordo com o teor de argila, para recomendação de adubação fosfatada em sistemas de sequeiro com culturas anuais..... | 9  |
| TABELA 2 | Características físico-químicas do Latossolo Vermelho utilizado no ensaio.....                                                                                                            | 18 |
| TABELA 3 | Proporções de areia e solo em função dos tratamentos para obtenção de diferentes texturas de solo.....                                                                                    | 19 |
| TABELA 4 | Atributos químicos e físicos dos solos elaborados após incubação por 30 dias com água e mais 30 dias com calcário.....                                                                    | 20 |
| TABELA 5 | Interpretação da análise de fósforo nos solos do Cerrado pelo método Mehlich 1 para culturas anuais em geral, com base em amostras de solo coletadas na camada de 0 a 20 cm.....          | 39 |
| TABELA 6 | Estatística descritiva dos teores de P e argila dos solos amostrados da micro-bacia do Ribeirão Abóbora.....                                                                              | 40 |

## RESUMO GERAL

HEMIELEVSKI, L. S., UniRV - Universidade de Rio Verde, fevereiro de 2020. **Limite crítico ambiental de fósforo para solo do cerrado.** Orientadora: Profa. Dra. June Faria Scherrer Menezes. Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin.

Os solos do Cerrado são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade, e para o uso agrícola, requer a aplicação de corretivos e de doses elevadas de fertilizantes, principalmente os fosfatados. Com a aplicação sucessiva de fertilizantes fosfatados, principalmente quando os níveis de fósforo (P) ultrapassam as necessidades da cultura e do solo, ocorre o acúmulo desse nutriente nas camadas superficiais do solo. O teor elevado de P aumenta o risco de sua perda para os sistemas aquáticos, ambiente onde seu excesso pode causar a eutrofização, comprometendo toda uma bacia hidrográfica. Os objetivos com o trabalho foram quantificar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e determinar o limite crítico ambiental de P (LCA-P) para solo do cerrado; determinar os teores P e de argila nos solos das propriedades do Ribeirão Abóbora e classificar os teores de P nestes solos quanto ao LCA-P. O trabalho foi conduzido em duas etapas, a primeira etapa foi conduzida em laboratório, em que um Latossolo Vermelho foi misturado com diferentes quantidades de areia obtendo-se várias texturas (10, 20, 30, 40, 50% de argila) e, a partir disso, foi quantificado a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e determinado o limite crítico ambiental de P (LCA-P) para cada textura avaliada. A CMAP diminuiu proporcionalmente ao decréscimo do teor de argila. Determinou-se que com a adição de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P, os solos com 10% de argila, a partir de 18 mg dm<sup>-3</sup> de P extraído por Mehlich 1, o P-água aumentou rapidamente e para os solos com 20, 30, 40 e 50% de argila os valores de P-limite foram de 40, 41, 42 e 44 mg dm<sup>-3</sup> de P. O modelo proposto para calcular o LCAP é:  $20 + 0,5 * \text{argila} (\%)$ . A segunda etapa foi conduzida em campo em que 46 propriedades rurais que compõem a micro-bacia do Ribeirão Abóbora sendo que, nessas propriedades foram amostradas e determinados os teores de P pelo extrator Mehlich 1 e de argila nas profundidades de 0-20 cm no laboratório Multiusuários da Universidade de Rio Verde. Após a determinação dos teores de P e argila, testou-se o modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 * \text{argila} (\%)$ ” para classificar os solos amostrados quanto ao alto e baixo risco de transferência de P para as águas. De posse a esses teores, os teores de P foram classificados quanto aos níveis muito baixos a muito alto, conforme o teor de argila. Verificou-se que 69% dos solos das propriedades analisadas foram classificados com teores de P muito baixo e baixo, e os demais 31% como médio a muito alto. Os resultados evidenciaram que o modelo foi eficaz na indicação de amostras de solo com maior potencial de transferência de P naquele conjunto de amostras, usando como variável de entrada apenas o teor de P-Mehlich e a proporção de argila do solo. Portanto, com o uso do modelo proposto para calcular o LCA-P, foi constatado que houve valores superiores ao calculado em quatro propriedades. Dessa maneira, deve-se ter uma maior atenção para essas propriedades a fim de que esses valores voltem aos níveis críticos estabelecidos para solos de Cerrado.

**Palavras-chave:** Adubação fosfatada, controle ambiental, manejo do solo.

## GENERAL ABSTRACT

HEMIELEVSKI, L. S., UniRV - Rio Verde University, February, 2020. Critical Environmental Limit of Phosphorus for Cerrado. Adviser: Prof. Dra. June Faria Scherrer Menezes and Coadviser: Paulo Fernandes Boldrin.

Cerrado soils are naturally acidic and low fertility, and for agricultural use requires the application of correctives and high doses of fertilizers, especially phosphates. With the successive application of phosphate fertilizers, especially when phosphorus levels exceed the needs of the crop and soil, the accumulation of this nutrient occurs in the surface layers of the soil. The high phosphorus content (P) increases the risk of its loss to aquatic systems, an environment where its excess can cause eutrophication, compromising an entire watershed. The aim with the study were to quantify the maximum P adsorption capacity (CMAP) and to determine the critical environmental limit of P (LCA-P) for Cerrado soil; determine the P and clay contents in the soils of the properties of Ribeirão Abóbora Watershed and classify the P contents in these soils for LCA-P. This study was conducted in two stages, the first stage was conducted in a laboratory, in which a Red Latosol was mixed with different amounts of sand obtaining several textures (10, 20, 30, 40, 50% clay) and, from this, the maximum P adsorption capacity (CMAP) and the critical environmental limit of P (LCA-P) for each texture evaluated are determined. The CMAP decreased proportionally to the decrease in clay content. The addition of 40 to 120 mg L<sup>-1</sup> of P, soils with 10% clay, from 18 mg dm<sup>-3</sup> of P extracted by Mehlich 1, the P-water increased rapidly and for soils with 20, 30, 40 and 50% clay the P-limit values were 40, 41, 42 and 44 mg dm<sup>-3</sup> of P. The proposed model for calculating LCAP is:  $20 + 0.5 \cdot \text{clay} (\%)$ . The second stage was conducted in a field in which 46 rural properties that make up the micro-basin of the Ribeirão Abóbora. In these properties, p contents were sampled and determined by the Extractor Mehlich 1 and clay at depths of 0-20 cm in the Multiuser laboratory of the University of Rio Verde. After determining the p and clay contents, the model "LCA-P:  $20 + 0.5 \cdot \text{clay} (\%)$ " was tested to classify the sampled soils for the high and low risk of p transfer to the waters. In a property of these contents, the P contents were classified according to the very low to very high levels, according to the clay content. It was found that 69% of the soils of the analyzed properties were classified with very low and low P contents and the other 31% as a medium to very high. The results showed that the model was effective in the indication of soil samples with higher p transfer potential in that set of samples, using only the P-Mehlich content and the clay proportion of the soil as an input variable. Therefore, with the use of the proposed model to calculate the LCA-P, it was found that there were values higher than that calculated in four properties. Thus, greater attention should be paid to these properties so that these values return to the critical levels established for Cerrado soils.

**Keywords:** Phosphate fertilization, environmental control, soil management.

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

De maneira geral, os solos do Cerrado são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade (Novais; Smyth, 1999). Porém, para o uso agrícola há a necessidade do uso de corretivos e de doses elevadas de fertilizantes, principalmente os fosfatados (Sousa; Lobato; Rein, 2004). Com a aplicação sucessiva de fertilizantes fosfatados, principalmente quando os níveis de fósforo (P) ultrapassam as necessidades da cultura e do solo, ocorre o acúmulo desse nutriente nas camadas superficiais do solo (Cassol; Gianello; Costa, 2001). O teor elevado de P aumenta o risco de sua perda para os sistemas aquáticos, ambiente onde seu excesso pode causar a eutrofização, comprometendo toda uma bacia hidrográfica (Sharpley et al., 2003). O que, consequentemente, torna a água inadequada para o consumo.

Segundo Raij (1991), o P é um dos macronutrientes exigido em menor quantidade pelas plantas. Porém, é o nutriente mais usado em adubação no Brasil. Esse contexto, pode ser explicado pelo fato do P possuir forte interação com o solo, sendo fortemente fixado nos coloides do solo (Schumacher et al., 2004) e, também pela carência generalizada de P nos solos brasileiros, principalmente os do Cerrado (Sousa; Lobato, 2004). Boa parte do P fornecido na adubação fica indisponibilizado no solo, devido ao fenômeno da fixação de P por reações com componentes do solo. Por consequência da fixação, o P passa a fazer parte de compostos de baixa solubilidade, ficando menos disponível para a absorção vegetal. A saturação da camada superficial do solo com este nutriente, também favorece sua liberação para a solução e, consequentemente, sua perda pelo escoamento superficial ou lixiviação via drenagem vertical do solo (Sharpley et al., 2003).

Assim, a transferência do excesso de P no solo até o ambiente aquático ocorre principalmente por erosão laminar que transporta o P ligado as partículas do solo para os mananciais. Miguel et al. (2014) avaliando bacias hidrográficas rurais, verificaram que o aporte de P encontrado nos mananciais hídricos é originado de processos antrópicos do solo, principalmente, em decorrência do manejo.

Portanto, a quantidade excessiva de nutrientes como, por exemplo, fosfato, induz a multiplicação de micro-organismos (plantas aquáticas) que habitam a superfície da água, pois da mesma maneira que ele é naturalmente pobre no solo e essencial para as plantas, ele também é naturalmente pobre nas águas e essencial para as algas (Gatiboni et al., 2014). Esse fato provoca a redução da taxa fotossintética e do oxigênio, impedindo a penetração de

luminosidade, afetando a qualidade da água inviabilizando o uso para o consumo (Ribeiro, 2015). Esse fenômeno é denominado de eutrofização.

Dessa forma, o estabelecimento dos valores do limite crítico ambiental de fósforo (LCA-P) é o passo inicial para o desenvolvimento de um sistema de proteção ambiental para evitar a transferência de P para os mananciais. Nesse sentido, Gatiboni et al. (2015) estabeleceram um LCA-P, que é determinado conforme o teor de argila do solo e representa, aproximadamente, 80% da capacidade do solo em reter P. Considerando-se a sensibilidade do Mehlich 1 ao poder-tampão do solo, extraindo menos P em solos mais argilosos, a hipótese estabelecida foi que os LCA-P discriminados por esse método também sejam sensíveis ao teor de argila do solo e, por isso, existem não um, mas vários LCA-P em razão do teor de argila do solo.

Neste contexto, o estudo teve por objetivo identificar se as quantidades de P aplicadas nos solos das propriedades do Ribeirão Abóbora estão acima das recomendações técnicas e, se necessário, estabelecer um sistema de proteção ambiental para evitar a perda de fósforo (P) via escoamento superficial dos solos-fonte para os mananciais. Tendo como objetivos específicos:

- Determinar o LCA-P (limite crítico ambiental de fósforo) para solo do Cerrado;
- Determinar os teores de fósforo (P) e de argila dos solos na camada de 0-20 cm de profundidade nas propriedades agrícolas que compõe o Ribeirão Abóbora;
- Classificar os solos da micro-bacia quanto ao risco de poluição por P, por meio do LCA-P.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Formas e dinâmica de fósforo no solo**

A divisão das formas de P no solo é fundamentada nos tipos de extratores usados para estimá-las. Chang; Jackson (1957) desenvolveram um método de fracionamento das formas de fósforo, que estabeleceram as bases para a sua identificação de acordo com o extrator usado para acessá-las. Maior destaque se dá aos estudos que identificavam a predominância de determinada fração no solo e a contribuição daquelas preferencialmente absorvidas pelas plantas (Novais; Smyth, 1999).

O P, no solo, encontra-se na fase sólida nas formas orgânica e inorgânica, que podem variar com o grau de intemperismo do solo, e na fase líquida (solução do solo). Nesta solução ele está presente como ânions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  (formas predominantes no Brasil devido ao pH) e sua concentração é menor que  $0,01 \text{ mg dm}^{-3}$ . Dessa forma, o P solúvel na camada arável do solo seria insuficiente para suprir a necessidade das culturas (Raij, 1991).

O P, na fase sólida, encontra-se, na maior parte, combinado a compostos de ferro, alumínio, e cálcio e na matéria orgânica. Este P na fase sólida é conceitualmente dividido em P-lábil e P-não lábil, sendo a fração disponível para as plantas considerada lábil, que é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Enquanto a fração que está fortemente adsorvida ou precipitada em compostos solúveis é considerada não lábil (Sá, 2004). Constantemente, mais de 90% do P aplicado no solo é adsorvido na primeira hora de contato com ele, formando, primeiramente o P-lábil e, posteriormente, com o passar do tempo, o P-não lábil (Novais; Mello, 2007).

A separação do P em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis, mesmo que seja imprecisa, ajuda no entendimento da dinâmica da disponibilidade do P. Portanto, sob o ponto de vista da fertilidade do solo, independentemente da natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo. Para estudos da adsorção (específica e não específica) e dessorção (substância que é liberada em determinada superfície) dessas formas de P de acordo com sua labilidade, diversos autores têm utilizado a técnica de fracionamento proposta por Hedley et al. (1982).

Estudos utilizando esse fracionamento têm mostrado que as frações orgânicas e inorgânicas de P no solo podem atuar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais, da adubação e do manejo do solo. Sua vantagem é a obtenção de informações sobre a disponibilidade de P a curto e longo prazos, por meio da avaliação dos diferentes compartimentos com distintos graus de disponibilidade para as plantas (Silva et al., 2003), podendo também ser empregado para acompanhar modificações nas formas de P, em decorrência de processos, no solo (Araújo; Salcedo, 1997).

O sistema de semeadura que não revolve o solo e/ou sistemas de cultivo que adicionem grande quantidade de fertilizantes fosfatados, resultam em aumento nos teores de matéria orgânica, seja pela ausência de mobilização, seja pela produção de ácidos orgânicos que competem pelos sítios de retenção (Rheinheimer et al., 2000). A manutenção ou o aumento de matéria orgânica podem servir como proteção aos efeitos negativos da fase



mineral, mantendo os nutrientes ciclados no sistema em formas que possam ser disponíveis às plantas. A transformação do P orgânico em P inorgânico e sua retenção em formas não lábeis com o cultivo, pode ser minimizada pelo manejo adequado do solo.

## **2.2 Capacidade máxima de adsorção de fósforo**

No processo de adsorção, o nutriente adicionado na solução é adsorvido pela fase sólida, sendo a velocidade de adsorção e a quantidade total adsorvida dependentes das características químicas e mineralógicas do material solvente e das características químicas do adsorbato. A adsorção e dessorção de P do solo consideram dois compartimentos interligados, a solução do solo e a fase sólida, que armazena o nutriente que abastece a primeira. A cinética de como o primeiro compartimento é abastecido pelo segundo, chamado fator capacidade, representa o poder tampão de P, o qual é controlado, entre outras coisas, pela energia de ligação do nutriente na fase sólida (Barrow, 2008). Como o P absorvido pelas plantas é o que está na solução do solo, a disponibilidade de P para as culturas é constituída pelas formas de P na fase sólida que potencialmente pode repor a solução do solo. Contudo, à medida que aumenta a capacidade tampão de P do solo, a quantidade necessária para manter a concentração de P na solução é maior, acarretando maiores doses de fertilizantes a serem aplicadas no solo. Assim, a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) informa o tamanho do complexo sortivo do solo, e é um parâmetro bastante utilizado para caracterização de solos e consequências de manejo que influenciam a dinâmica de P no solo (Novais; Smyth, 1999).

A adsorção de P aos coloides inorgânicos do solo (argilas silicatadas e oxi-hidróxidos) ocorre com diferentes energias de ligação, dependendo do tipo de sítio adsorvente (Parfitt, 1978) e do grau de sua saturação com P (Rheinheimer; Anghinoni; Conti, 2003; Barrow, 2008). Durante o processo de adsorção de P, ocorrem três estádios temporais: no estádio 1, predominam a neutralização das cargas positivas (grupos  $R-OH_2^+$ ); no estádio 2, ocorrem as trocas de ligantes; e, no estádio 3, há interações de caráter eletrostático entre o  $PO_4$  e a superfície dos coloides (Muljadi; Posner; Quirk, 1966a,b; Parfitt, 1978). Esses estádios estão relacionados com a afinidade do P com os sítios de adsorção em cada fase da adsorção e, conseqüentemente, com distintas energias de ligação (Muljadi; Posner; Quirk, 1966c). Como pressupostos do mecanismo de adsorção, esses autores enumeram que os sítios de adsorção devem ser isolados e independentes quanto à energia de retenção e que as moléculas adsorvidas não devem interagir umas com as outras. Dessa maneira, a adsorção de P ao solo é

complexa e envolve fases distintas, que, dependendo do grau de saturação do solo com P, fazem com que a quantidade e o tipo de sítios adsorventes variem, alterando, portanto, a energia de ligação a esses sítios e a possibilidade de dessorção do P.

Modelos matemáticos são utilizados para descrever as proporções de P adsorvido à fase sólida em razão da adição de quantidades crescentes de P na solução ou variação do tempo de contato do P com o solo (Barrow, 2008); entretanto, alguns autores postulam que a descrição do fenômeno de adsorção não é devidamente predita por modelos de região única, já que esses tratam, de maneira igual, diferentes fases do processo de adsorção. O modelo matemático mais difundido é o de Langmuir, que passou a ser utilizado em estudos da adsorção de P porque possibilita obtenção da CMAP do solo e da constante "k", relacionada à energia de ligação desse elemento ao solo (Novais; Smyth, 1999).

### **2.3 Formas de fósforo transferidas para o ambiente aquático**

O P é fundamental para a produção das culturas e o crescimento da vegetação em geral, as quais não alcançam sua produção máxima sem um adequado suprimento nutricional (Marschner, 1995). O comportamento desse elemento torna-se ainda mais importante em solos das regiões tropicais sob Cerrado que apresentam teores de P muito baixo dos níveis críticos utilizados para interpretação de análise de P dos solos (Lopes, 1983). Nestes solos, são grandes as quantidades de P a serem aplicadas para manter a disponibilidade adequada do nutriente para as plantas (Sousa; Rein, 2009).

O P é fortemente fixado às partículas de solo e por isso, tem pouca mobilidade nele, especialmente nos mais argilosos. Assim, a transferência de P até o ambiente aquático ocorre principalmente pela erosão, que transporta P ligado às partículas do solo. Quando as adições de P são maiores que a exportação pelas culturas ocorre a sua acumulação na camada de solo que recebe o fertilizante, criando, como passar do tempo, uma camada com elevada concentração de P por causa da baixa mobilidade do elemento (Gatiboni et al., 2015) e, esse fato, consequentemente aumenta o risco de transferência do P para as águas.

As formas de P transferidas para o ambiente aquático podem ser: solúvel (PS) e particulado (PP). O fósforo solúvel encontra-se na forma inorgânica de ortofosfato reativo e orgânico reativo, sendo que estas formas estão prontamente disponíveis para a absorção dos organismos biológicos (Sharpley et al., 1995) e, o P particulado encontra-se ligado à fase sólida, incluindo P sorvido em partículas de solo e material orgânico erodido e esta forma representa 75 a 90% do P transportado em solos cultivados (Sharpley; Halvorson, 1994).

Essa transferência depende de vários fatores, dentre eles, aqueles que estão ligados ao local-fonte, ao processo de transporte e ao ambiente receptor do nutriente. Nos fatores ligados a fonte, destacam-se o teor de P disponível do solo, o tipo, a dose, a frequência e o modo de aplicação de fertilizantes, além da cultura presente, existência de cobertura do solo e do manejo adotado na área. Nos fatores ligados ao transporte dos locais-fonte até os sistemas aquáticos, destacam-se a taxa de erosão do solo, o escoamento superficial e a drenagem subsuperficial; já nos ligados ao ambiente receptor, evidenciam-se a sua distância do local-fonte e a largura da área de preservação permanente no seu entorno (Heathwaite et al., 2005).

## **2.4 Estimativa do risco de transferência de fósforo no solo**

Um dos principais métodos de avaliação do risco ambiental de transferência de P do solo para os ambientes aquáticos é o “P-index”, que se baseia em múltiplas variáveis envolvendo características do solo-fonte do processo de transporte e do ambiente aquático receptor. O sistema “P-index” foi proposto por Lemunyon; Gilbert (1993), com os objetivos de avaliar o risco de transporte de P de um local-fonte até um corpo d’água, identificar os fatores críticos que influenciam a transferência de P e identificar as práticas de manejo que reduzem a transferência do elemento. Esse método é amplamente difundido nos Estados Unidos e em algumas regiões do Canadá e da União Europeia (Sharpley et al., 2012).

No Brasil, há poucos trabalhos envolvendo uso de “P-index” (Lopes et al., 2007; Oliveira et al., 2010) e, como qualquer sistema em seu início de desenvolvimento, há a dificuldade de adoção imediata, pois é um modelo composto por muitos índices que devem ser valorados e testados no campo (SERA17, 2013), em que, ainda, não há dados suficientes no Brasil.

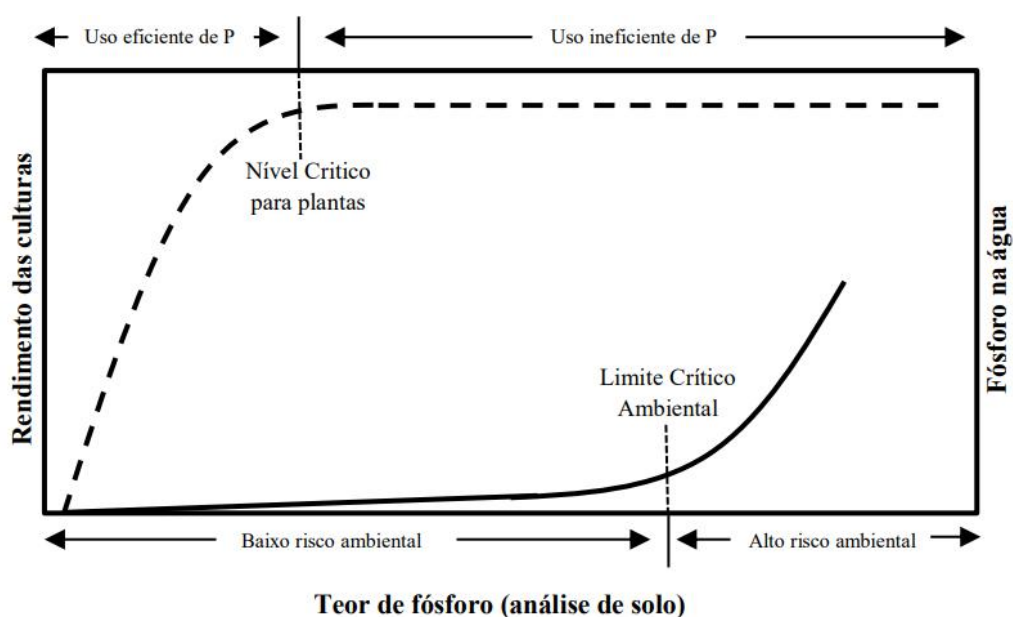
Como o método do “P-index” é complexo e depende do ajuste de muitas variáveis (Osmond et al., 2006), normalmente adotam-se inicialmente os sistemas mais simples, como os do Limite Crítico Ambiental ou Grau de Saturação do Solo. Posteriormente, com a evolução da pesquisa na área, vão sendo obtidos dados ajustados que suportam a adoção de um sistema mais complexo como o “P-index”.

## **2.5 Limite crítico ambiental de fósforo**

O estabelecimento do Limite Crítico Ambiental de (LCA-P) é uma alternativa rápida e prontamente aplicável e seus resultados podem inclusive servir para embasar um futuro

sistema de ‘P-index’, já que os valores de LCA-P são necessários para classificar o teor de P no solo quanto ao seu risco de transferência dentro desse sistema. O LCA-P, baseia-se em uma única determinação, o teor de P disponível no solo, e assume-se que quando os teores de P aumentam muito, há um valor crítico em que o solo passa a transferir grandes quantidades de P para corpos d’água em razão de sua saturação pelo nutriente (Sharpley, 1995; McDowell et al., 2001; Nair et al., 2004; Casson et al., 2006).

Conforme descrito por Gatiboni et al. (2014) na Figura 1, evidenciam-se esquematicamente os impactos da fertilização fosfatada sobre o rendimento das culturas e a quantidade de P liberado para a água. Quando o teor de P pela análise de solo (eixo horizontal na Figura) é muito baixo, o rendimento esperado das culturas é baixo, devido a deficiência do nutriente (linha tracejada). Conforme são adicionados fertilizantes fosfatados, o rendimento das culturas aumenta em resposta ao incremento nos teores de P no solo. Contudo, quando o teor de P no solo atinge o chamado nível crítico, as plantas aumentam muito pouco a produtividade com a adição de fertilizantes fosfatados, pois o P deixa de ser um fator limitante para o crescimento delas. Por definição, considera-se o teor de P no solo adequado para as culturas (nível alto) quando o teor se encontra entre uma e duas vezes o valor do nível crítico, o que corresponde respectivamente a 90% e 100% do rendimento relativo das culturas (Figura 1).



Fonte: Gatiboni et al. (2014).

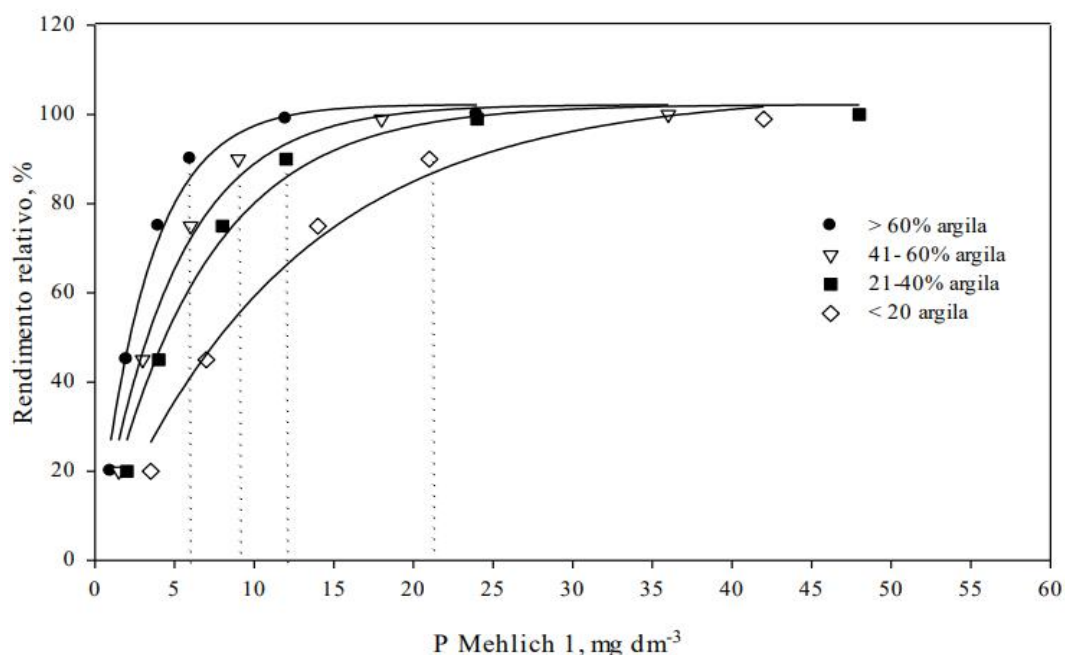
Figura 1 - Representação esquemática do rendimento relativo das culturas e da quantidade de P na água em função do teor de P disponível no solo, destacando-se o nível crítico de P para as culturas e o limite crítico ambiental.

Se a adição de P ao solo continuar após ser atingido o teor de duas vezes o nível crítico, o teor no solo continuará aumentando, porém sem reflexo na produtividade das culturas. Por outro lado, se analisar a quantidade de P liberado pelo solo para a água (linha cheia na Figura 1), pode ser observado que quando os teores de P são baixos no solo, os teores de P também são muito baixos na água, pois como o solo tem alta capacidade de fixação do P, pouco sobra para ser liberado para a água. Mesmo após o solo atingir o nível crítico para as plantas, o solo possui capacidade de reter P sem modificar significativamente o teor de P na água, indicando que o solo pode receber certa quantidade de P além do nível crítico para as plantas sem causar danos ambientais. Contudo, quando os teores de P no solo atingem níveis muito elevados, o solo perde a capacidade de reter mais P e, a partir deste ponto, maiores quantidades de P são liberadas do solo para a água. Esse ponto pode ser chamado teor limite de P no solo (P-Lim).

Para se ter uma margem de segurança ambiental não se deveria aplicar P ao solo até atingir o P-Lim, mas sim até o solo atingir um teor ligeiramente menor (80% do P-Lim, por exemplo) e este valor poderia ser chamado LCA-P. Por essa sistemática, na prática, quando a análise de solo indicar teor de P disponível maior que o LCA-P, significa que se a adição de P continuar, o solo tem grandes chances de liberar quantidades perigosas de P para o ambiente, contribuindo para a poluição ambiental (Gatiboni et al., 2014).

O método de análise de P disponível no solo para as plantas atualmente usado pelos laboratórios de análise de solo de Goiás, é o Mehlich 1 (Tedesco et al., 1995). Método dependente do teor de argila do solo, extraindo menos P em solos com maior teor de argila em razão da exaustão da solução extratora e readsorção de P aos coloides (Cajuste; Kussow, 1974). Por isso, é provável que os LCA-P determinados por esse método também sejam dependentes do teor de argila. Porém, independente do teor de argila do solo, é imperativo que em áreas onde se utilizam adubos fosfatados minerais ou orgânicos em quantidades além das requeridas pelas plantas, deve-se monitorar o teor de P no solo para certificar-se que o mesmo se encontra abaixo do LCA-P para o solo em questão.

Exemplo disso, para os solos dos estados do RS e SC foram criados pela (CQFS-RS/SC, 2004) vários níveis críticos de P conforme o teor de argila do solo, sendo de 6,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com mais de 60% de argila, 9,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 41 e 60%; 12,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 21 e 40% e nível crítico de 21,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila de 20% ou menores (Figura 2).



Fonte: Gatiboni et al. (2014).

Figura 2 - Representação esquemática das curvas de resposta das plantas ao teor de P no solo para solos com diferentes teores de argila, segundo a CQFSRS/SC (2004). As linhas tracejadas representam os níveis críticos em cada classe textural, os quais são estabelecidos em 90% do rendimento relativo máximo das culturas.

Para a região do Cerrado há a interpretação da análise do solo quanto aos teores de P conforme a classe textural ou os teores de argila (Tabela 1), sendo considerados como níveis críticos os teores adequados, sendo de 4,1 a 6,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com mais de 60% de argila, 8,1 a 12,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 36 e 60%; 15,1 a 20,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila entre 16 e 35% e nível crítico de 18,1 a 25,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila de 15% ou menores.

Tabela 1 - Interpretação da análise de solo para P extraído pelo Mehlich 1, de acordo com o teor de argila, para recomendação de adubação fosfatada em sistemas de sequeiro com culturas anuais

| Teor de argila | Teor de P no solo               |            |             |             |        |
|----------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|--------|
|                | Muito baixo                     | Baixo      | Médio       | Adequado    | Alto   |
| %              | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- |            |             |             |        |
| ≤ 15           | 0 a 6,0                         | 6,1 a 12,0 | 12,1 a 18,0 | 18,1 a 25,0 | > 25,0 |
| 16 a 35        | 0 a 5,0                         | 5,1 a 10,0 | 10,1 a 15,0 | 15,1 a 20,0 | > 20,0 |
| 36 a 60        | 0 a 3,0                         | 3,1 a 5,0  | 5,1 a 8,0   | 8,1 a 12,0  | > 12,0 |
| > 60           | 0 a 2,0                         | 2,1 a 3,0  | 3,1 a 4,0   | 4,1 a 6,0   | > 6,0  |

Fonte: Adaptado de Sousa; Lobato (2004).

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, p.643-650, out./dez. 1997.

BARROW, N. J. The description of sorption curves. **Soil Sci.**, p.900-910, 2008.

CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. **Trop Agric.**, p.246-52, 1974.

CASSOL, P. C.; GIANELLO, C.; COSTA, V. E. U. Frações de fósforo em estrumes e sua eficiência como adubo fosfatado. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, p.635-644, 2001.

CASSON, J. P.; BENNETT, D. R.; NOLAN, S. C.; OLSON, B. M.; ONTKEAN, G. R. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta. **J Environ Qual.**, p.2212-21, 2006.

CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, p.133-144, 1957.

Comissão de química e fertilidade do solo - CQFS - RS/SC. Manual de Adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10o ed. Porto Alegre: SBRS/NRS, p.400, 2004.

GATIBONI, L. C.; SMYTH, T. J.; SCHMITT, D. E.; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C. M. B. Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de Santa Catarina. Lages: UDESC/CAV; 2014. (Boletim técnico, 2).

GATIBONI, L. C.; SMYTH, T. J.; SCHMITT, D. E.; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C. M. B. Limite crítico ambiental de fósforo para solos sul-brasileiros com adição de altas doses e nutrientes. **Tópicos Ci. Solo**, p.144-171, 2015.

HEATHWAITE, A. L.; SHARPLEY, A.; BECHMANN, M.; REKOLAINEN, S. Assessing the risk and magnitude of agricultural nonpoint source phosphorus pollution in: SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. (Editors). Phosphorus: Agriculture and the environment. **Madison: American Society of Agronomy, Crop Science of America, Soil Science Society of America**, p.981-1020, 2005.

HEDLEY, M. J. et al. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal.**, p.970-976, 1982.

LEMUNYON, J.; GILBERT, R. The concept and need for a phosphorus assessment tool. **J Produc Agric.**, p.483-6, 1993.

LOPES, A. S. Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p.162, 1983.

LOPES, F.; MERTEN, G. H.; FRANZEN, M.; GIASSON, E.; HELFER, F.; CYBIS, L. F. A. Utilização de P-index em uma bacia hidrográfica através de técnicas de geoprocessamento. **R Bras Eng Agric Amb.**, p.312-7, 2007.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press, London, p.889, 1995.

MCDOWELL, R.; SHARPLEY, N. A.; BROOKES, P.; POULTON, P. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. **Soil Sci.**, p.137–149, 2001.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. de A.; MOURABUENO, J. M.; TIECHER, T. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.585–598, 2014.

MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part II. The location of the adsorption sites. **J. Soil Sci.**, p.230-237, 1966b.

MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. **J. Soil Sci.**, p.222-229, 1966a.

MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part III. The effect of temperature on adsorption. **J. Soil Sci.**, p.238-247, 1966c.

NAIR, V. D.; PORTIER, K. M.; GRAETZ, D. A.; WALKER, M. L. An Environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils. **J Environ Qual.**, p.107-13, 2004.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. p.399, 1999.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação Solo-Planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS, p.133-204, 2007.

OLIVEIRA, M. F. M.; FAVARETTO, N.; ROLOFF, G.; FERNANDES, C. V. S. Estimativa do potencial de perda de fósforo através da metodologia “P-index”. **R Bras Eng Agric Amb.**, p.267-73, 2010.



OSMOND, D. L.; CABRERA, S. E.; FEAGLEY, S. E.; HARDEE, G. E.; MITCHELL, C. C.; MOORE, R. S.; MYLAVARAPU, R. S.; OLDHAM, J. L.; STEVENS, J. C.; THOM, W. C.; WALKER, F.; ZHANG, H. Comparing rating of the Southern phosphorus indices. **J Soil Water Conserv.**, p.325-37, 2006.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Adv. Agron.**, p.1-46, 1978.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Ceres, p.343, 1991.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **R. Bras. Ci. Solo**, p.41-49, 2003.

RIBEIRO, K. D. K. F. Eutrofização. Brasil Escola. 2015. Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm>>. Acesso em 15 de março de 2019.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no Sistema Plantio Direto. In YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafós, p. 201-222, 2004.

SCHUMACHER, M. V. et al. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento de mudas de angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Bentham) Brenan). Sistema de Información Científica, p.149–155, 2004.

SERA17. Southern Extension Research Activities - Group 17. Technical guidance for assessing phosphorus indices. Painter: Virginia Tech; 2013. (Southern Cooperative Series Bulletin, 30).

SHARPLEY, A. N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. **J Environ Qual.**, p.920-6, 1995.

SHARPLEY, A. N.; HALVORSON, A. D. The management of soil phosphorus availability and its impact on surface water quality. In: Lal, R; Stewart, B. A. (ed.). **Soil processes and water quality**. Boca Raton: Lewis Publishers, p.1-84, 1994.

SHARPLEY, A. N.; DANIEL, T.; SIMS, T.; LEMUNYON, J.; STEVENS, R.; PARRY, R. Agricultural Phosphorus and Eutrophication. 2nd ed. Agricultural Research Service: United States Department of Agriculture; 2003.

SHARPLEY, N. A.; BEEGLE, D.; BOLSTER, C.; GOOD, L.; JOERN, B.; KETTERINGS, Q.; LORY, J.; MIKKELSEN, R.; OSMOND, D.; VADAS P. Phosphorus indices: Why we need to take stock of how we are doing. **J Environ Qual.**, p.1711-9, 2012.

SILVA, M. A.; NOBREGA, J. C. A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; MARQUES, J. J.G. S. M.; MOTTA, P. E. F. Frações de fósforo em latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, p.1197-1207, 2003.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p.147-168, 2004.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. Disponibilidade de fósforo em Latossolo de cerrado sob plantio direto adubado com duas fontes de fósforo avaliada por diferentes extratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., Fortaleza, 2009. Anais... Fortaleza, 2009.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p.147-168, 2004.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.147, 1995. (Boletim Técnico, 5).

## CAPÍTULO 1

### RESUMO

#### CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO E LIMITE CRÍTICO AMBIENTAL DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES TEXTURAS

Solos intemperizados são conhecidos pelo seu alto desenvolvimento pedogenético e por seu reduzido número de espécies minerais. Devido à formação de complexos de superfície de esfera interna do ânion fosfato com os minerais, a adsorção de fósforo (P) acontece de forma mais intensa nesses solos. Na tentativa de descrever o processo de adsorção de P ao solo, começaram a serem utilizadas equações matemáticas chamadas de isotermas. O trabalho teve por objetivo quantificar a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e determinar o limite crítico ambiental de fósforo (LCA-P) em solos com diferentes texturas. Para condução do experimento foi coletado um Latossolo Vermelho na camada de 0-20 cm e a este adicionou-se areia para simular solos das texturas (10, 20, 30, 40 e 50% de argila). Para quantificar a CMAP adicionou-se doses de KCl 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 0, 5, 10, 20, 40, 80 e 120 mg L<sup>-1</sup> de P nos solos com diferentes texturas. Foram determinadas as CMAP pelo isoterma de Langmuir e após essa determinação utilizou-se essa informação para incubar os solos com doses de P proporcionais à CMAP para então determinar o LCA-P para cada textura avaliada. As CMAP diminuíram proporcionalmente ao decréscimo do teor de argila. Determinou-se que com a adição de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P, os solos com 10% de argila, a partir de 18 mg dm<sup>-3</sup> de P extraído por Mehlich 1 o P-água aumentou rapidamente e para os solos com 20, 30, 40 e 50% de argila os valores de P-limite foram de 40, 41, 42 e 44 mg dm<sup>-3</sup> de P. Por isso, o modelo proposto para calcular o LCAP é:  $20 + 0,5 * \text{argila} (\%)$ . Portanto, sugere-se quando o teor de P disponível pela análise de solo apresentar valor até 20% acima do LCA-P, o agricultor deve suspender temporariamente a aplicação de fertilizantes fosfatados, e se o teor de P disponível apresentar valor acima do P-Lim do solo, além da suspensão, são necessárias ações mitigatórias imediatas para diminuir o risco de poluição ambiental.

**Palavra-Chave:** Adsorção, complexo sortivo, isotermas, tamponamento do solo.

## CHAPTER 1

### ABSTRACT

#### MAXIMUM PHOSPHORUS ADSORPTION CAPACITY AND CRITICAL ENVIRONMENTAL LIMIT OF PHOSPHORUS ON SOILS WITH DIFFERENT TEXTURES

Weathered soils are known for their high pedogenetic development and with a small number of mineral species. Due to the formation of internal sphere surface complexes of the phosphate anion with minerals, phosphorus adsorption (P) happens more intensely in these soils. In an attempt to describe the P adsorption process on the ground, mathematical equations called isotherms began to be used. The objective of this work was to quantify the Maximum Phosphorus Adsorption Capacity (CMAP) and to determine the Critical Environmental Limit of Phosphorus (LCA-P) in soils with different textures. For these, a Red Latosol was collected in the 0-20 cm layer and sand was added to simulate soils of the textures: 10, 20, 30, 40 and 50% clay. To quantify CMAP were added KCl 0.01 mol L<sup>-1</sup> doses containing 0, 5, 10, 20, 40, 80 and 120 mg L<sup>-1</sup> of P in soils with different textures. The CMAP was determined by Langmuir isotherm and after this determination this information was used to incubate the soils with P doses proportional to CMAP to then determine the LCA-P for each texture evaluated. The CMAP decreased proportionally to the decrease in clay content. It was determined that with the addition of 40 to 120 mg L<sup>-1</sup> of P, soils with 10% clay, from 18 mg dm<sup>-3</sup> of P extracted by Mehlich 1 the P-water increased rapidly and for soils with 20, 30, 40 and 50% clay the P-limit values were 40, 41, 42 and 44 mg dm<sup>-3</sup> of P. Therefore, the proposed model to calculate the LCAP is:  $20 + 0.5 \cdot \text{clay (\%)}$ . Therefore, it is suggested when the P content available by soil analysis is up to 20% above LCA-P, the farmer should temporarily suspend the application of phosphate fertilizers, and if the available P content is above the P-Lim of the soil, in addition to the suspension, immediate mitigation actions are needed to reduce the risk of environmental pollution.

**Keyword:** Adsorption, sorptive complex, isotherms, soil tamponade.

## 1 INTRODUÇÃO

Solos intemperizados são conhecidos pelo seu alto desenvolvimento pedogenético e por seu reduzido número de espécies minerais (Allen; Hajek, 1989). De modo geral, alguns minerais encontrados em abundância nesses solos são: caulinita, gibbsita, hematita, goethita e maghemita (Costa et al., 1999). Trabalhos mostram que a adsorção de P - termo genérico para todo processo que resulta na retenção do elemento (Novais; Mello, 2007) - acontece de forma mais intensa nesses solos (Novais; Smyth, 1999). Outros estudos realizados com intuito de avaliar essa relação mostram que isso se deve à formação de complexos de superfície de esfera interna do ânion fosfato com os minerais desses solos (Sposito, 1989; Ranno et al., 2007).

A partir de meados do século XX, na tentativa de descrever o processo de adsorção de P ao solo, começaram a serem utilizadas equações matemáticas chamadas de isotermas para descrever as proporções de P adsorvido a fase sólida (fator Q) em função da adição de quantidades crescentes de P na solução ou variação do tempo de contato do P com o solo. A isoterma de Langmuir foi utilizada pela primeira vez por Olsen; Watanabe (1957) para descrever a adsorção de P pelo solo. A maior vantagem da equação de Langmuir, sobre outras isotermas, é que a CMAP e a constante relacionada com a energia de adsorção podem ser calculadas e estes valores podem ser relacionados com várias propriedades do solo, que fornecerão informações sobre a natureza da reação entre o solo e o fertilizante fosfatado (Olsen; Watanabe, 1957; Novais; Smyth, 1999).

A CMAP revela o que poderá ocorrer com o P adicionado ao solo para as culturas, em termos de aproveitamento e, também, para utilização posterior pelas plantas, constituindo-se no que se denomina de “efeito residual” (Pereira; Faria, 1998). Segundo Woodruff; Kamprath (1965), o valor da CMAP de solos tem sido usado como uma estimativa da quantidade desse nutriente requerida pelos solos para condicionar o crescimento máximo das plantas.

A CMAP é utilizada para a determinação do limite crítico ambiental de P (LCA-P). Sendo que, o LCA-P é dependente do teor de argila, das características sortivas do solo e está diretamente relacionado com o grau de saturação de P do solo (GSP), que é uma medida que relaciona o teor de P disponível do solo (P-disp) e o tamanho do complexo sortivo do solo (Sharpley et al., 1996; McDowell et al., 2001; Koopmans et al., 2002; Bai et al., 2013).

Assim, objetivou-se quantificar a CMAP por diferentes ajustes do modelo de Langmuir e determinar o LCA-P em solos com diferentes texturas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O solo escolhido foi um Latossolo Vermelho, coletado de uma área agrícola no município de Rio Verde – GO, retirando-se solo na profundidade 0–20 cm. Após a coleta, o solo foi seco em estufa com aeração forçada a 60° C e peneirado em malha de 2 mm. Para saber a mineralogia desse solo, a amostra de solo foi submetida à difração de raios-X no equipamento SHIMADZU XRD-6000, pertencente ao Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa -COMCAP da Universidade Estadual de Maringá.

O Latossolo Vermelho analisado possui elevadas quantidades de argilas típicas da região Centro-Oeste como gibbsita (hidróxido de alumínio), quartzo (dióxido de silício areia), hematita (óxido de ferro 3), anatase (dióxido de titânio), maghemita (óxido de ferro), caulinita (silicato de alumínio) (<5%) e goethita (argila não silicatada) (Figura 3). Isso comprova que o solo utilizado como típico era um solo altamente intemperizado, rico em óxido de Fe e Al e que tem alta capacidade de adsorção de P.

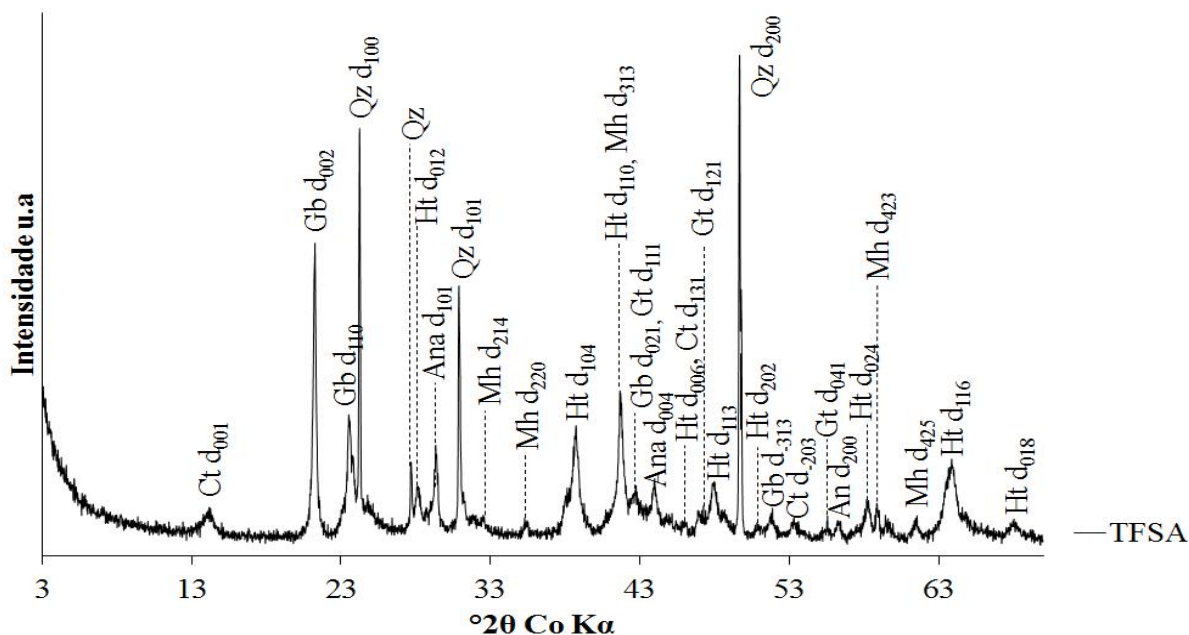


Figura 3 - Difratograma de raios-X de material de um Latossolo. Ana: anatase; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Ht: Hematita; Mh: maghemita; Qz: Quartzo.

A quantidade de P que pode ser adsorvida por um solo é dependente não só do teor de argila, mas também dos tipos de minerais que compõem a fração argila. Assim, num trabalho desta natureza, onde se pretende observar o comportamento de solos com diferentes teores de argila, se o tipo de minerais presentes na fração argila for diferente entre os solos, isso poderia

dificultar a interpretação dos resultados. Por isso, neste trabalho usou-se um único tipo de solo (uma única composição mineralógica) com alto teor de argila, sendo a este acrescentado diferentes quantidades de areia com o objetivo de construir solos com diferentes percentagens de argila.

Pela análise inicial do solo verificou-se que o solo continha 52,2% de argila (Tabela 2). Segundo (Sousa; Lobato; Rein, 2004), a maioria dos solos da região de Cerrado pertencem às classes média e argilosa, portanto, o solo era característico da Região. O teor de Al trocável apresenta-se na faixa de  $0,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e por isso, contribuiu muito pouco para elevação da CTC efetiva. Portanto, o solo utilizado não apresentava deficiência de Ca, Mg, K.

Tabela 2 - Características físico-químicas do Latossolo Vermelho utilizado no ensaio

| Atributo         | Unidade                         | Valor  |
|------------------|---------------------------------|--------|
| pH               | -----                           | 5,10   |
| Ca               | $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ | 6,25   |
| Mg               | $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ | 1,37   |
| Al               | $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ | 0,04   |
| H+Al             | $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ | 5,60   |
| K                | $\text{mg dm}^{-3}$             | 197,00 |
| P (Mehlich)      | $\text{mg dm}^{-3}$             | 10,20  |
| S                | $\text{mg dm}^{-3}$             | 8,20   |
| Matéria Orgânica | $\text{g dm}^{-3}$              | 38,10  |
| B                | $\text{mg dm}^{-3}$             | 0,46   |
| Cu               | $\text{mg dm}^{-3}$             | 2,10   |
| Fe               | $\text{mg dm}^{-3}$             | 7,90   |
| Mn               | $\text{mg dm}^{-3}$             | 80,90  |
| Zn               | $\text{mg dm}^{-3}$             | 3,50   |
| Na               | $\text{mg dm}^{-3}$             | 7,50   |
| Argila           | %                               | 52,20  |
| Silte            | %                               | 15,30  |
| Areia            | %                               | 32,50  |
| CTC              | $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ | 13,70  |
| Sat. Bases       | %                               | 59,30  |

O solo foi misturado com diferentes quantidades de areia de construção seguindo-se a metodologia adotada por Oliveira et al. (2010). Para isso, a areia foi lavada em água corrente mexendo por 30 min, depois foi deixada por 1 hora em contato com ácido clorídrico ( $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) na proporção 1:1. Após isso, a areia foi lavada sucessivas vezes com água corrente

novamente. Finalmente, a areia foi seca em estufa com aeração forçada a 60° C e peneirada em malha de 1mm.

Para a preparação dos solos com diferentes teores de argila foram realizadas misturas de solo e areia (com tamanho de partícula entre 0,5 e 1,0 mm), nas proporções de T1: 100% areia + 0% solo; T2: 75% areia + 25% solo; T3: 50% areia + 50% solo; T4: 25% areia + 75% solo; T5: 0 % areia + 100% solo. Todo esse procedimento foi feito em duplicata, totalizando 10 unidades experimentais. Na tabela 3, estão especificados a massa que continha cada unidade experimental e o teórico de argila esperado.

Após as misturas do solo com a areia, as unidades experimentais foram acondicionadas em sacos plásticos amarrados e incubados por 30 dias a 80 % da capacidade de campo para proporcionar uma reagregação mínima das partículas de solo e para estabilização das propriedades físico-química das misturas solo-areia. O teor de umidade na capacidade de campo das amostras foi estimado após saturação e 24 horas de drenagem, seguindo o método descrito em Casaroli; Van Lier (2008).

Tabela 3 - Proporções de areia e solo em função dos tratamentos para obtenção de diferentes texturas de solo

| Tratamentos | Areia<br>----- g ----- | Solo | Teor de Argila<br>----- % ----- |
|-------------|------------------------|------|---------------------------------|
| T1          | 1000                   | 0    | 10                              |
| T2          | 750                    | 250  | 20                              |
| T3          | 500                    | 500  | 30                              |
| T4          | 250                    | 750  | 40                              |
| T5          | 0                      | 1000 | 50                              |

Após a incubação dos tratamentos por 30 dias com água, homogeneizando as amostras semanalmente, as amostras foram reincubadas por mais 30 dias com calcário filler (PRNT = 98,1 %) para correção do pH até 6,0. As doses de calcário foram calculadas pelo índice SMP, conforme recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFSRS/SC, 2004).

Após os 60 dias de incubação, os solos foram secos em estufa com aeração forçada a 60° C, peneirados em malha de 2 mm e analisados nos Laboratórios Multiusuário da Universidade de Rio Verde (UniRV), em Rio Verde – GO. Foram determinadas as texturas das 10 unidades experimentais seguindo instruções da EMBRAPA (1997), a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) pelo isoterma de Langmuir e o limite crítico ambiental de P (LCA-P) para cada textura avaliada.



Ao final do processo de incubação os solos elaborados apresentaram teores de T1: 12,90, T2: 25,20 T3: 34,20, T4: 44,35, T5: 52,20% de argila, respectivamente (Tabela 4). Pelos resultados, obteve-se as texturas que foram de arenosa a argilosa. Pela determinação das texturas verificou-se semelhanças entre as texturas teóricas que eram esperadas (Tabela 3).

O valor do pH dos solos também foi corrigido, com a incubação com calcário apresentando os valores de 7,05, 7,05, 6,85, 6,65 e 6,45, respectivamente. O P disponível variou de 4,45 mg kg<sup>-1</sup> no T1 a 13,15 mg kg<sup>-1</sup> no T3 (Tabela 4).

Tabela 4 - Atributos químicos e físicos dos solos elaborados após incubação por 30 dias com água e mais 30 dias com calcário

| Atributo                     | Unidade                            | Tratamentos |       |       |          |          |
|------------------------------|------------------------------------|-------------|-------|-------|----------|----------|
|                              |                                    | (T1)        | (T2)  | (T3)  | (T4)     | (T5)     |
| pH                           | -----                              | 7,05        | 7,05  | 6,85  | 6,65     | 6,45     |
| Ca                           | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 1,15        | 2,7   | 4     | 5,2      | 5,85     |
| Mg                           | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 0,49        | 1,21  | 1,64  | 1,86     | 2,00     |
| Al                           | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 0           | 0     | 0     | 0        | 0        |
| H+Al                         | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 0,55        | 0,6   | 0,7   | 0,8      | 0,8      |
| K                            | mg dm <sup>-3</sup>                | 15          | 48    | 87    | 118      | 145      |
| P Mehlich                    | mg dm <sup>-3</sup>                | 4,45        | 11,85 | 13,15 | 11,15    | 10,75    |
| Argila                       | %                                  | 12,9        | 25,2  | 34,2  | 44,35    | 52,2     |
| Silte                        | %                                  | 7,1         | 9,8   | 13,3  | 15,65    | 15,3     |
| Areia                        | %                                  | 80          | 65    | 52,5  | 40       | 32,5     |
| CTC                          | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 2,23        | 4,64  | 6,56  | 8,16     | 9,02     |
| Sat. Bases                   | %                                  | 75,25       | 87,05 | 89,35 | 90,2     | 91,15    |
| Classificação da textura     |                                    |             |       |       |          |          |
| Segundo Sousa; Lobato (2004) | →                                  | arenosa     | média | média | argilosa | argilosa |

## 2.1 Determinação da capacidade máxima de adsorção de P dos solos

Para essa etapa seguiu-se a metodologia proposta por Vilar et al. (2010), em que para a obtenção da CMAP utilizaram-se, para cada amostra da fração argila, duas séries de sete tubos, em que foram adicionados cerca de 2,5 g de solo de cada textura. Em cada série de tubos, adicionaram-se soluções de KCl 0,01 mol L<sup>-1</sup> em pH 6, contendo 0, 5, 10, 20, 40, 80 e 120 mg L<sup>-1</sup> de P, na forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. As amostras foram agitadas durante 16 horas em agitador tipo Wagner, a 30 rotações por minuto (rpm). Após a agitação a solução foi separada do solo através de centrifugação a 5.000 rpm por 14 minutos.

A concentração de P na solução sobrenadante (solução de equilíbrio) foi determinada pelo método colorimétrico (Embrapa, 1997). As quantidades de P adsorvidas foram determinadas por diferença entre as concentrações iniciais e as concentrações da solução de equilíbrio. A partir dos dados obtidos, construiu-se isothermas de adsorção, plotando-se a quantidade de fósforo adsorvido, na ordenada, e a concentração na solução de equilíbrio na abcissa. A forma hiperbólica da equação de Langmuir é citada pela seguinte expressão:

$$x/m = (abC)/(1 + aC) \quad \text{(Equação 1)}$$

em que:

x/m: quantidade do íon adsorvido na fase sólida;

b: capacidade máxima que a fase sólida pode adsorver o íon.;

C: concentração do íon na solução de equilíbrio com a fase sólido.

Para estimativas das constantes a e b, a equação hiperbólica de Langmuir foi transformada em sua forma linear, que corresponde a:

$$C/(x/m) = 1/(ab) + (1/b)C \quad \text{(Equação 2)}$$

A CMAP (b) foi determinada pelo valor inverso da declividade da reta, a constante de energia de adsorção (a) pela relação entre a declividade da reta e a interseção da mesma com o eixo das ordenadas e o fator capacidade de P máximo (FCP máx.) pelo produto entre a capacidade máxima de adsorção de P e a energia de adsorção segundo Bahia Filho et al. (1983a) e Novais; Smyth (1999).

## **2.2 Determinação do limite crítico ambiental de P**

Para essa etapa seguiu-se a metodologia proposta por Gatiboni et al. (2014). Após a determinação da CMAP de cada solo pelo modelo de Langmuir, utilizou-se essa informação para realizar uma incubação dos solos com doses de P proporcionais à CMAP. Para cada solo escolheu-se uma dose de P próxima da CMAP e o solo foi incubado com 0, 12,5, 25, 50, 75 e 100% desta dose. A incubação teve duração de 20 dias, tempo em que as amostras foram mantidas com umidade de 80% da capacidade de campo. Após a incubação determinou-se o teor de P solúvel em água (P-água) e o teor de P disponível para as plantas pelo método

Mehlich 1. O P-água foi realizado pesando-se o equivalente a  $1,0 \text{ cm}^3$  de solo úmido proveniente incubação, adicionando 10 mL de água destilada e agitando as amostras durante uma hora em agitador tipo Wagner a 30rpm. Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 5.000 rpm (aprox. 2.000G) por 10 minutos e foi determinado o P na solução pelo método de Murphy; Riley (1962). O P disponível por Mehlich 1 foi realizado segundo descrito em Tedesco et al. (1995), utilizando  $1,0 \text{ cm}^3$  de solo e 10 mL de solução extratora. Após 5 minutos de agitação do solo com a solução extratora, as amostras foram centrifugadas a 5.000 rpm (aprox. 2.000G) por 5 minutos e foi determinado o P na solução pelo método de Murphy; Riley (1962).

O limite crítico ambiental de P (LCA-P) foi obtido a partir dos solos incubados com doses de P, ajustando-se funções relacionando o teor de P disponível por Mehlich 1 e o teor de P-água. Para determinação da dose de P adicionada ao solo em que a liberação de P para a água passa a ser significativa. As funções matemáticas ajustadas foram do tipo equações lineares com dois segmentos, determinando-se o ponto de intersecção entre os dois segmentos que representa o teor limite de P.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Geralmente, em solos, a relação entre a quantidade de um íon quimiossorvido na fase sólida e sua concentração na solução do solo pode ser descrita por quatro tipos de isotermas: tipo-L, tipo-S, tipo-C e tipo-H (Meurer; Rheinheimer; Bissani, 2017). As isotermas de adsorção nas amostras dos cinco solos com diferentes teores de argila são apresentadas na Figura 4. A forma das isotermas de adsorção de P se aproxima de curvas do tipo-S. Estas curvas caracterizam baixa afinidade do adsorbato (íon em solução) pelo adsorvente (fase sólida do solo) em baixas concentrações, devido à interferência de outras substâncias. Dessa forma, foi necessário dividir as concentrações de P em duas etapas 0-20  $\text{mg L}^{-1}$  e de 40-120  $\text{mg L}^{-1}$ .

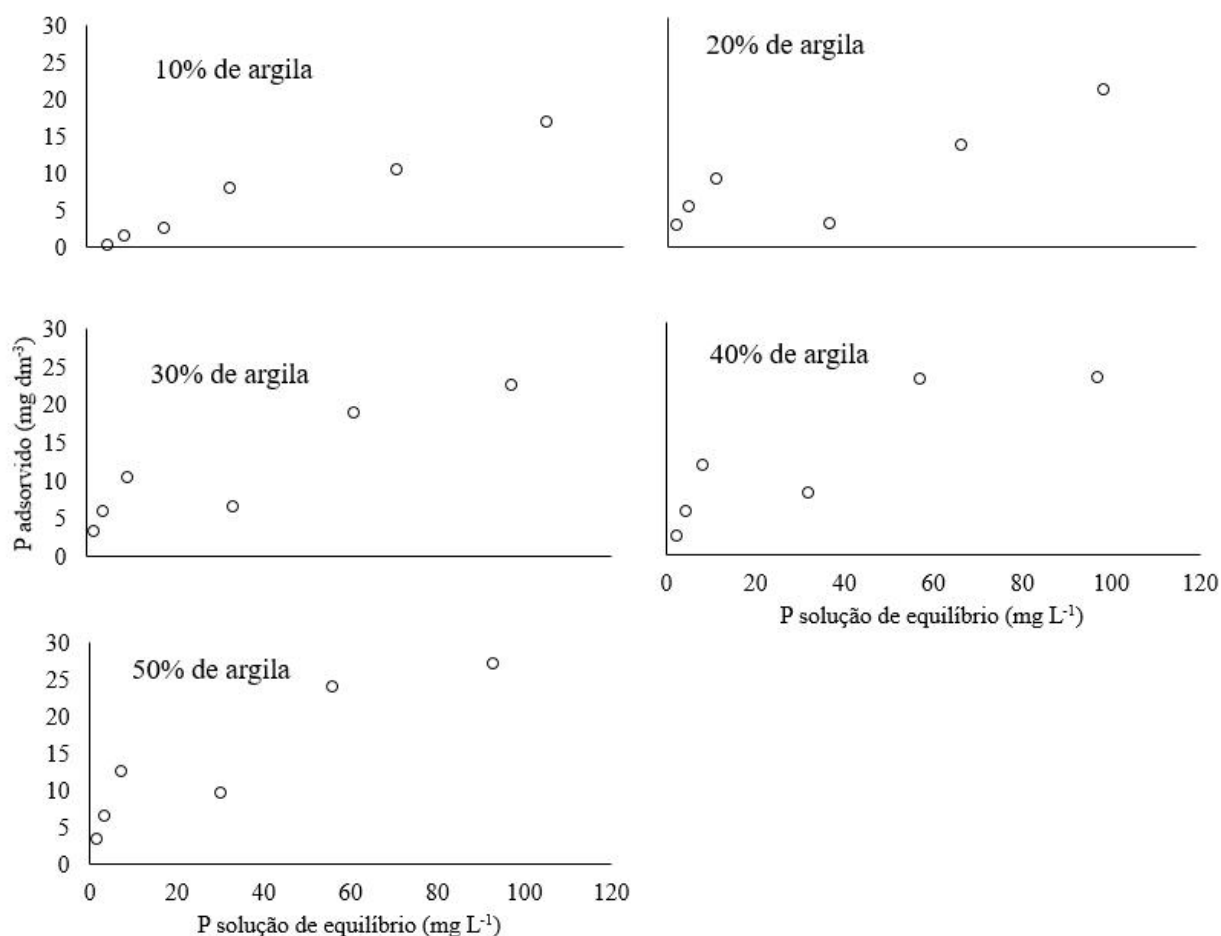


Figura 4 - Relação entre a concentração de P na solução de equilíbrio e a quantidade de P adsorvido pelos solos.

As curvas de adsorção de P mostradas na Figura 5A indicam que com a adição de 0 a 20 mg L<sup>-1</sup> de P, as CMAP dos solos foram de 5 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 10% de argila, 14 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 20% de argila, 19 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 30% de argila, 22 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 40% de argila e 25 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 50% de argila. E, com a adição de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P, as CMAP dos solos foram de 6 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 10% de argila, 53 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 20% de argila, 82 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 30% de argila, 87 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 40% de argila e 137 mg dm<sup>-3</sup> de P para o solo com 50% de argila (Figura 5B).

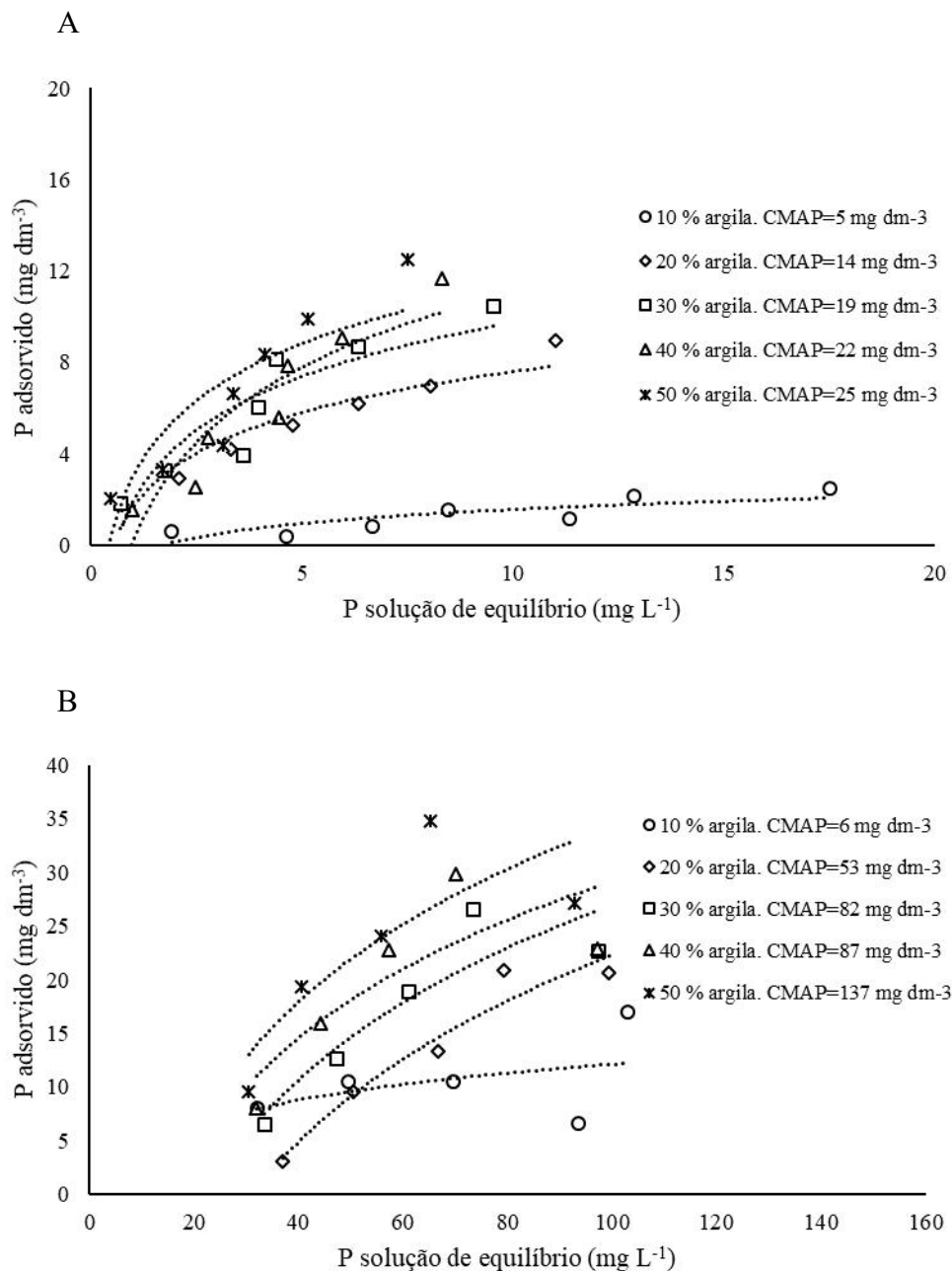


Figura 5 - Isotermas de adsorção de P pelo modelo de Langmuir em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila. Adição de 0 a 20  $\text{mg dm}^{-3}$  de P (A) e 40 a 120  $\text{mg dm}^{-3}$  de P (B).

O processo de adsorção de P descrito pelas isotermas de Langmuir considera pelo menos duas fases distintas de adsorção. Na primeira fase, com a adição de doses pequenas de P (0 a 20  $\text{mg L}^{-1}$  de P), pelo alto poder de fixação do elemento no solo, quase todo o P adicionado é adsorvido ao solo, restando pouco P na solução. Já numa segunda fase de adsorção, a dose adicionada de P é mais alta (40-120  $\text{mg L}^{-1}$ ) e os locais de ligação no solo já estão pelo menos parcialmente saturados e, com isso, a quantidade de P adsorvido às partículas de solo é menor, restando mais P na solução (Muljadi; Posner; Quirk, 1966).

Contudo, quando o solo atinge a CMAP, os teores de P na solução de equilíbrio são muito grandes, e se doses de fertilizantes dessa magnitude fossem adicionadas ao solo, haveria transferência de P para a água. Assim, não é possível usar a CMAP como estimadora da dose-limite de P a ser aplicada no solo sem causar impactos ambientais importantes. Além disso, a confecção de isotermas de adsorção é trabalhosa e consome muito tempo para execução, sendo completamente inviável a determinação da CMAP em laboratórios de rotina de análise de solo (Allen; Mallarino, 2006).

Com os resultados das isotermas foi possível observar que houve um aumento na CMAP a uma taxa de  $0,479 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 6A) e  $2,959 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 6B) para cada unidade no percentual de argila dos solos. Os resultados da Figura 6 confirmaram ainda que foi efetiva a mistura do solo original de 52,20 % de argila com diferentes quantidades de areia, já que a CMAP diminuiu proporcionalmente ao decréscimo do teor de argila. Tucci (1991) verificou que aumentando os teores de argila ocorreu também aumento da CMAP em solos de Manaus. O autor menciona que variações na capacidade de retenção de P de diferentes solos, com teores de argila semelhante, são, provavelmente, devido a variações na composição mineralógica da fração argila dos solos. Sá Jr. et al. (1968), avaliando a retenção de P em 17 solos de Pernambuco, também verificaram que os valores da CMAP foram maiores para os solos com textura argilosa, enquanto os com textura arenosa apresentaram valores menores.

Após as determinações anteriores, os solos foram submetidos a uma incubação por 20 dias com seis doses de P, conforme descrito anteriormente, e foram determinados os teores de P em água e P disponível por Mehlich 1. Com os resultados de P-água pode-se observar que os teores de P-água ficaram muito próximo de zero com a aplicação de doses baixas de P (Figura 7). Esse resultado evidencia que em solos não saturados com P, principalmente nos argilosos, a maior parte ficou adsorvida ao solo, sem reflexos expressivos em aumento do P-água. Este resultado apresentou-se similaridade com os obtidos por Gatiboni et al. (2014). No entanto, ao serem adicionadas doses maiores de P, houve aumento nos teores de P-água, ocorrendo primeiramente nos solos mais arenosos e, posteriormente, nos solos mais argilosos.

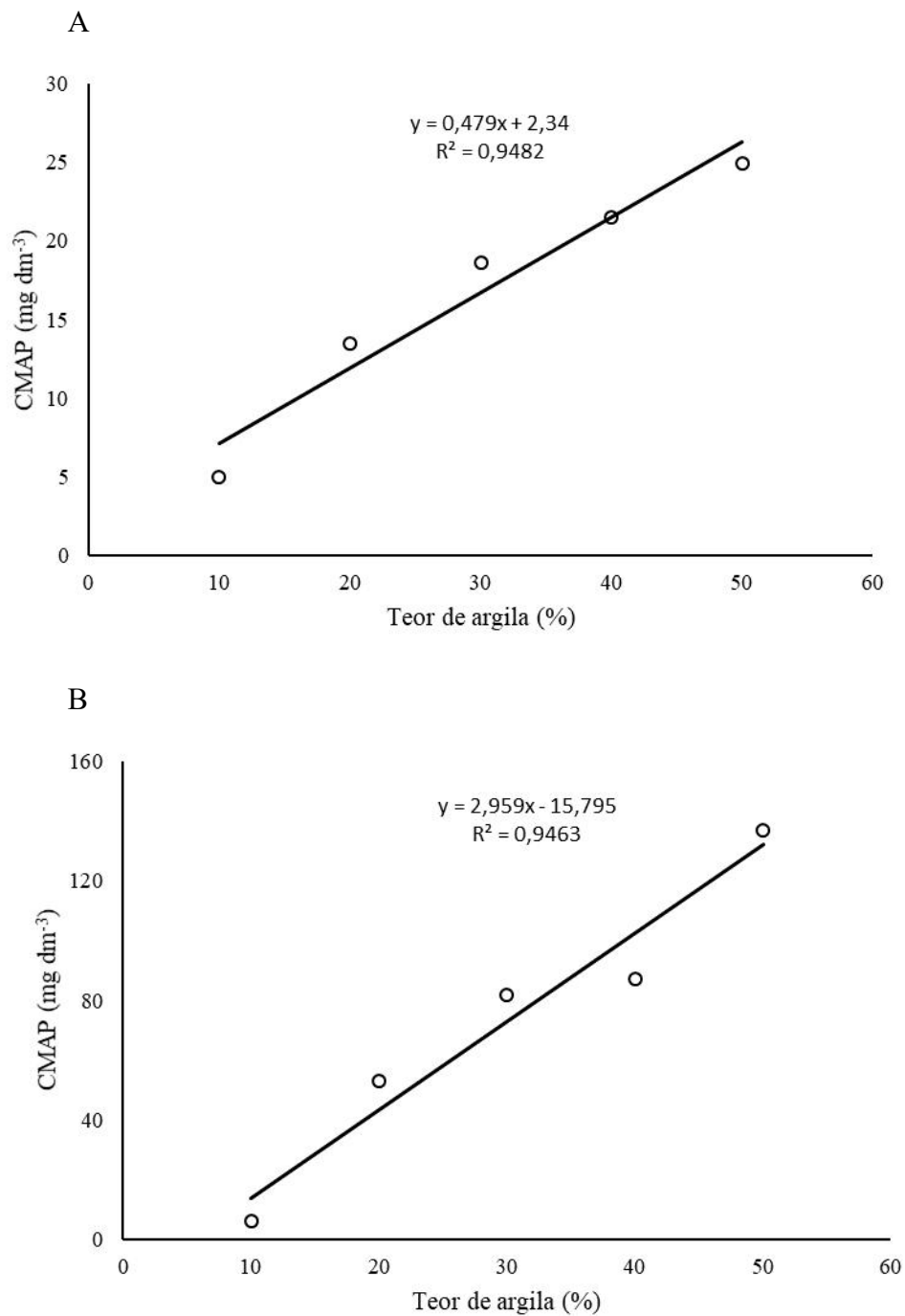


Figura 6 - Aumento da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em função do teor de argila do solo. Adição de 0 a  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (A) e 40 a  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (B).

A Figura 7 apresenta muita semelhança de comportamento com as curvas de adsorção (Figura 5), indicando que a adsorção ocorrente em 16 horas de agitação (método das isotermas) ou 20 dias de incubação (Figura 7) retratam de maneira semelhante o processo de adsorção de P ao solo.

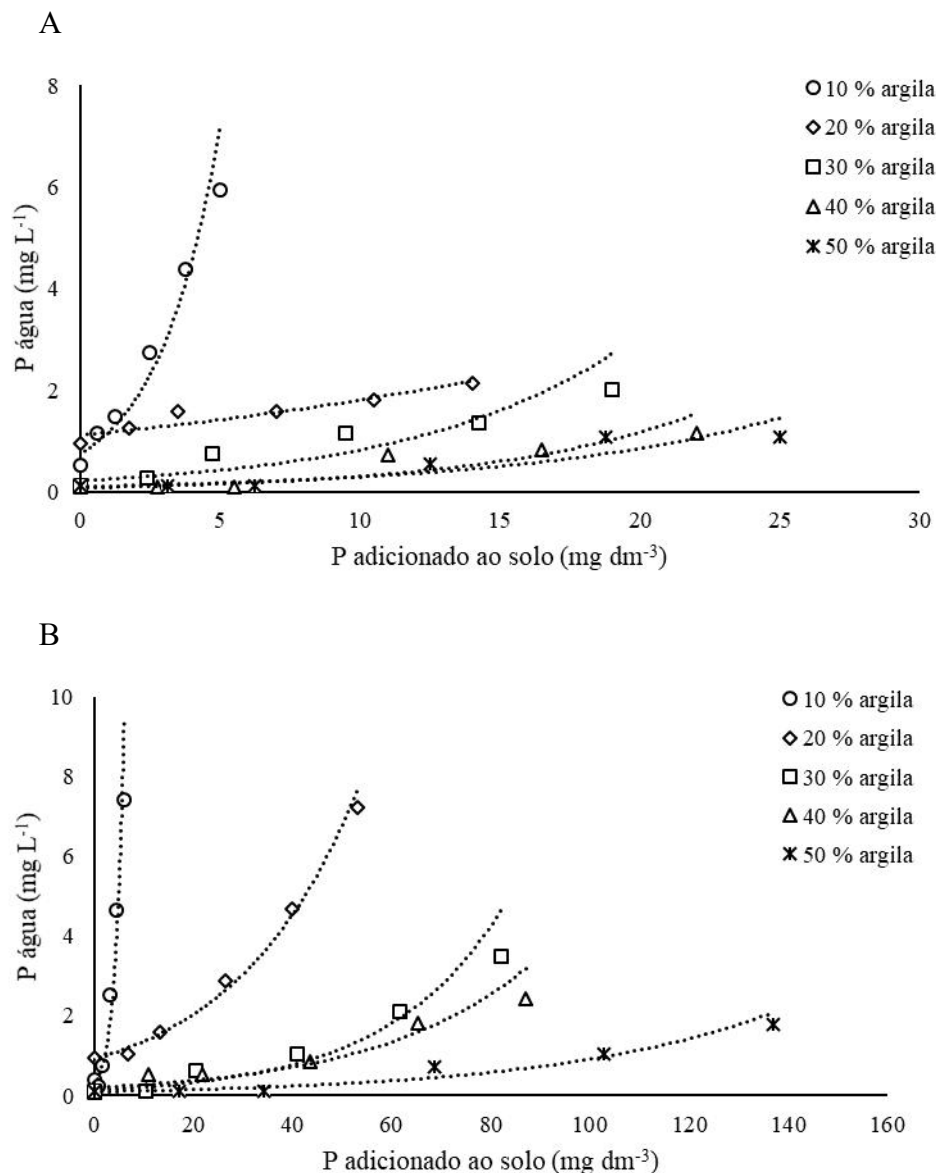


Figura 7 - Teor de P na água em função da quantidade de P adicionada ao solo. Adição de 0 a 20 mg dm<sup>-3</sup> de P (A) e 40 a 120 mg dm<sup>-3</sup> de P (B).

O Brasil adota como teor limite de P em água o valor de 0,02 a 0,15 mg L<sup>-1</sup>, dependendo da finalidade da água e do tipo de ambiente aquático (CONAMA, 2005). Contudo, esses valores limites são válidos para as águas dos sistemas aquáticos (rios, lagos etc.), não servindo de referência para interpretar os valores de P-água (Figura 7). Isso porque esses últimos consistem em dados do P liberado do solo para a água em contato com ele, obtidos em laboratório, em que o solo é agitado por uma hora com uma grande quantidade de água (relação solo: solução de 1:10). Por causa disso, a melhor maneira de determinar o valor limite de P na água proveniente do solo é encontrar um valor em que o P-água aumenta rapidamente com o aumento do teor de P disponível no solo.



A determinação do teor de P disponível a partir do qual aumenta drasticamente o P-água (P-limite) foi obtida pelo uso de modelo descontínuos (Figura 8). Ao invés de apresentar a quantidade de P adicionada, no eixo horizontal são apresentados os teores de P disponível por Mehlich 1, já que esta é a análise realizada nos laboratórios de análise de solo. Por esse método, verificou-se que para os solos que receberam a dose de 0 a 20 mg L<sup>-1</sup> de P, os valores não foram ajustados (Figura 8).

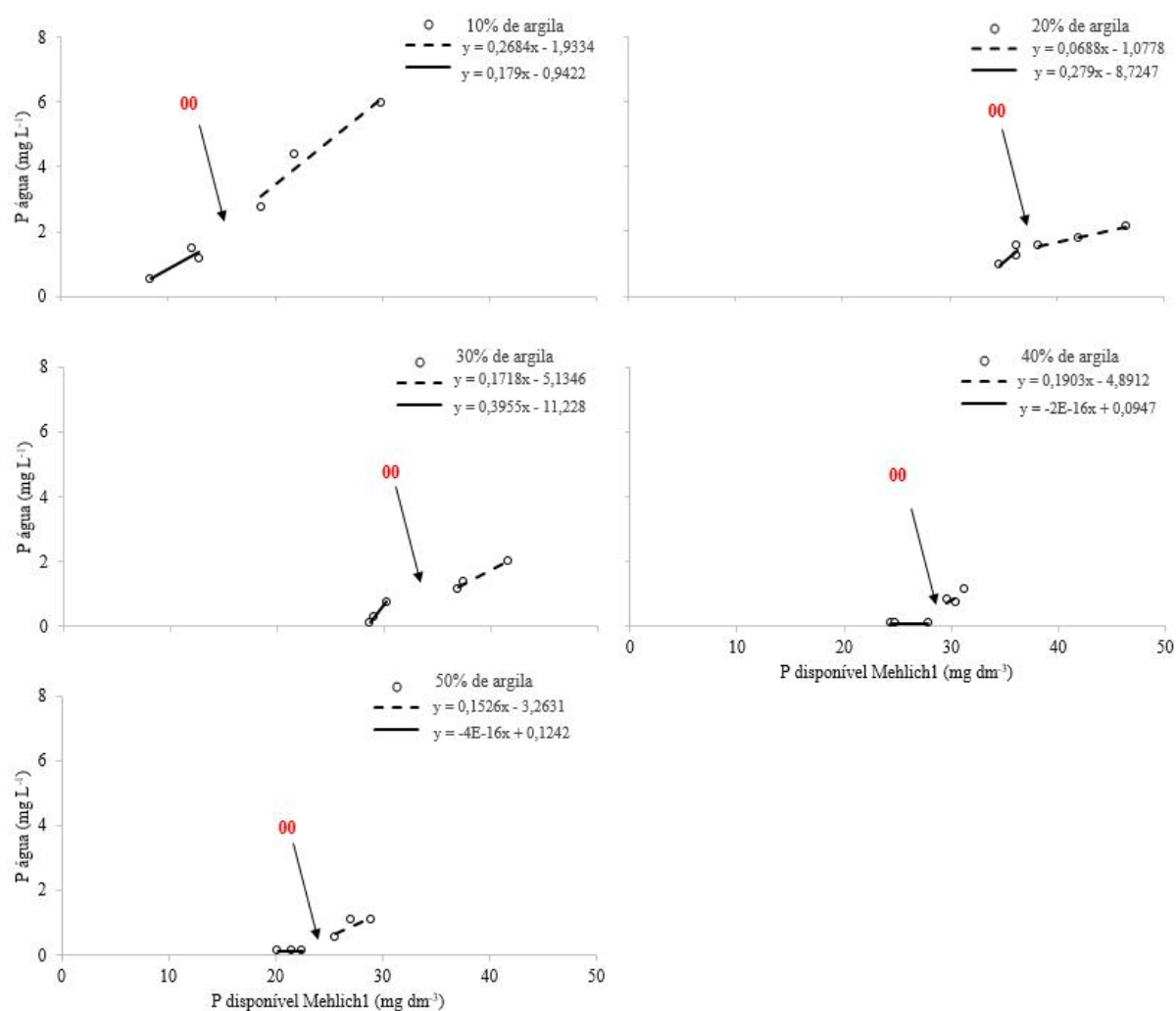


Figura 8 - Relação entre os teores de P em água em função dos teores de P extraídos por Mehlich 1 em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila e o ajuste de modelos descontínuos, indicando o valor de P-limite na intersecção das equações. Adição de 0 a 20 mg dm<sup>-3</sup> de P.

Para adição de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P, os solos com 10% de argila, o P-água aumentou rapidamente a partir de 18 mg dm<sup>-3</sup> de P extraído por Mehlich 1, indicando ser este o valor limite de P para este solo. Para os solos com 20, 30, 40 e 50% de argila os valores de P-limite

foram de 40, 41, 42 e 44 mg dm<sup>-3</sup> de P, respectivamente (Figura 9). Portanto, considerou-se os valores de LCA-P somente para os solos que receberam as doses de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P.

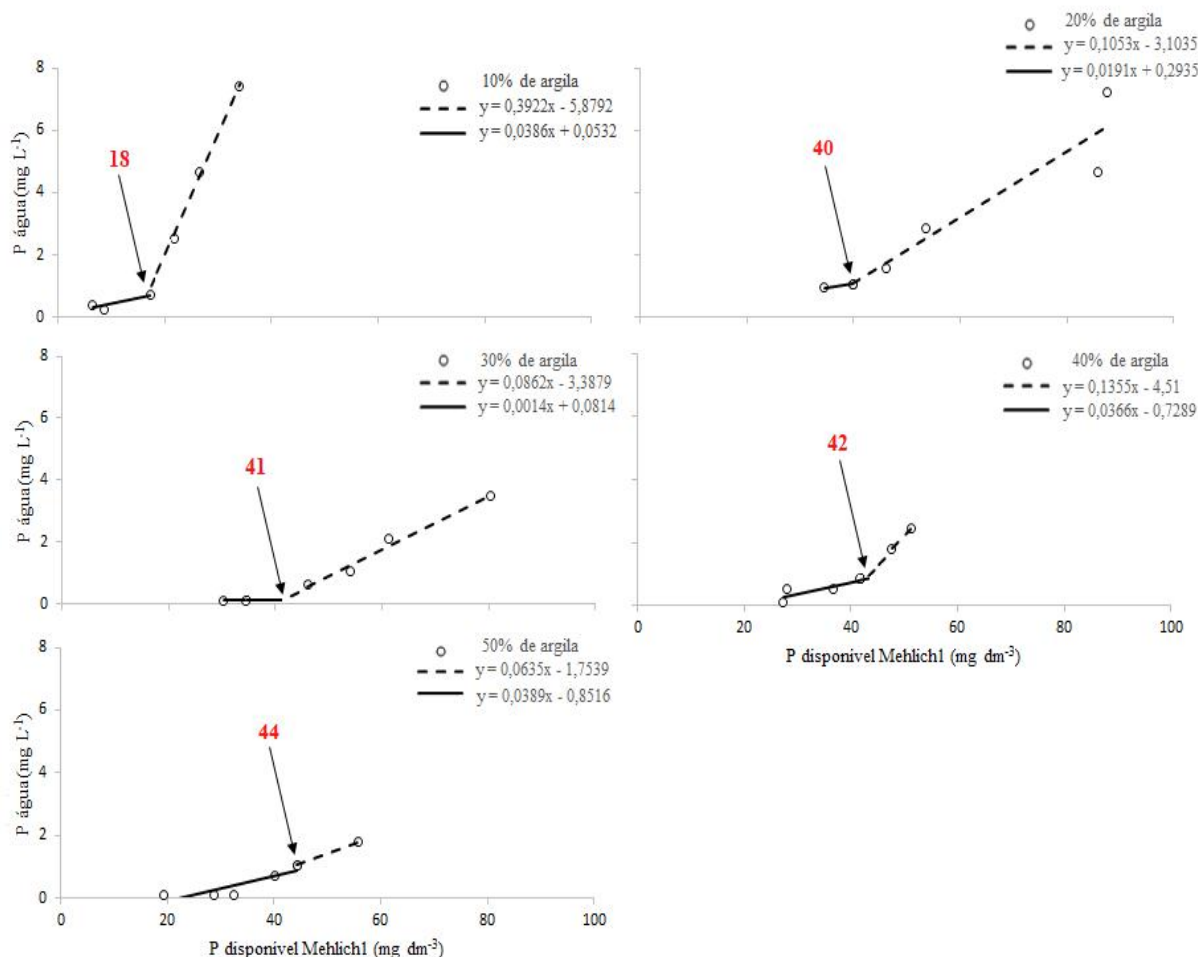


Figura 9 - Relação entre os teores de P em água em função dos teores de P extraídos por Mehlich 1 em solos com 10, 20, 30, 40 e 50% de argila e o ajuste de modelos descontínuos, indicando o valor de P-limite na intersecção das equações. Adição de 40 a 120 mg dm<sup>-3</sup> de P.

A Figura 10 mostra a relação entre os teores de argila (10, 20, 30, 40 e 50%) do solo e os valores de P-limite e LCA-P. O aumento no valor desses parâmetros foi linear com o aumento do teor de argila. Como explicitado anteriormente, o LCA-P foi estabelecido em 80% do valor do P-limite e, com isso, a equação que representa o LCA-P é:  $\text{LCA-P (mg dm}^{-3}\text{)} = 16,64 + 0,432 \cdot (\% \text{arg})$ , em que “%arg” é o teor de argila do solo em percentagem. Sugere-se uma simplificação da equação, ficando o limite crítico ambiental calculado pela fórmula:  $\text{LCA-P (mg dm}^{-3}\text{)} = 20 + 0,5 \times \text{arg}(\%)$ . O uso da equação simplificada traz a vantagem de ser de fácil memorização e uso.

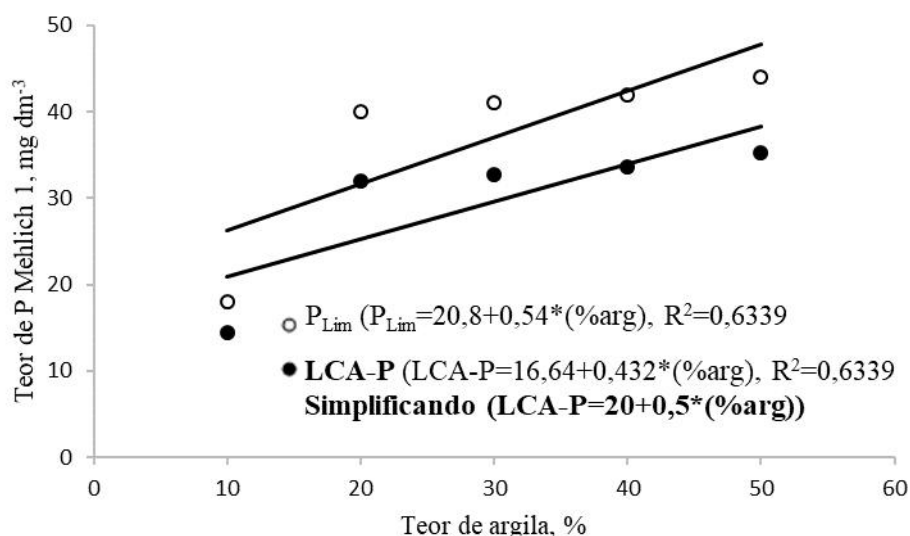


Figura 10 - Limite Crítico Ambiental de P (LCA-P) em razão do teor de argila do solo.  $P_{Lim}$ : teor limite de P para aumento da liberação de P na água; e LCA-P (simplificado): função simplificada para calcular o LCA-P.

Os valores obtidos pela equação simplificada podem ser observados na Figura 10, onde se pode constatar que os valores são praticamente idênticos aos obtidos com a equação original. Outra vantagem no uso da equação simplificada é que se pode calcular um LCA-P adequado para cada tipo de solo, pois caso fosse adotada a ideia do estabelecimento de faixas de teor de argila usada pela (CQFS-RS/SC, 2004), por exemplo, um solo com 21% de argila e outro com 39% teriam o mesmo LCA-P por serem enquadrados na mesma faixa de teor de argila. Uma questão importante a ser levantada para a correta utilização dos valores de LCA-P é a camada de solo a ser considerada para análise. Trabalhos realizados nas regiões produtoras de suínos do Estado, como nos estudos realizados por Scherer et al. (2010), Costa (2011) e Guardini et al. (2013) mostram que as aplicações de dejetos no solo por longo prazo provocam alterações significativas nos teores de P principalmente na camada de 0-10 cm de profundidade. Quando se trata de solos argilosos o efeito é mais superficial ainda e quando o solo é arenoso o efeito pode atingir camadas um pouco mais profundas.

Os dados confirmam que os solos argilosos suportam doses de P maiores que os arenosos sem causar problemas ambientais e confirmam também a hipótese de que o LCA-P a ser determinado por Mehlich 1 é dependente do teor de argila, devendo esse fato ser levado em consideração no desenvolvimento de um modelo. Essa constatação é análoga aquela sustentada por Sharpley et al. (1996), McDowell et al. (2001), Koopmans et al. (2002) e Bai et al. (2013), de que os LCA-P necessitam levar em consideração a capacidade de retenção de P do solo.

## 4 CONCLUSÕES

A forma das isotermas de adsorção de P do Latossolo Vermelho se aproxima de curvas do tipo-S.

As CMAP do Latossolo Vermelho com adição de 0 a 20 mg L<sup>-1</sup> de P foram respectivamente: de 5 mg dm<sup>-3</sup>, 14 mg dm<sup>-3</sup>, 19 mg dm<sup>-3</sup>, 22 mg dm<sup>-3</sup> e 25 mg dm<sup>-3</sup> de P com as texturas de 10, 20, 30, 40 e 50% de argila;

As CMAP do Latossolo Vermelho com adição de 40 a 120 mg L<sup>-1</sup> de P foram de 6 mg dm<sup>-3</sup>, 53 mg dm<sup>-3</sup>, 82 mg dm<sup>-3</sup>, 87 mg dm<sup>-3</sup> e 137 mg dm<sup>-3</sup> de P com as texturas de 10, 20, 30, 40 e 50% de argila, respectivamente;

A equação estimada para determinar o LCA-P para solo de Cerrado é  $16,64 + 0,432*(\%arg)$  com R<sup>2</sup> de 0,6223;

A equação simplificação para determinar o LCA-P para solo de Cerrado é  $20 + 0,5*(\%arg)$ .

## REFERÊNCIAS

ALLEN, B. L. & HAJEK, B. F. Mineral occurrence in soil environments. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, **Soil Science Society of America**, p.199-278, 1989.

ALLEN, B. L.; MALLARINO, A. P. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. **Soil Sci Soc Am J**. p.454-63, 2006.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R. F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. **R. Bras. Ci. Solo**, p.243-249, 1983a.

BAI, Z.; LI, H.; YANG, X.; ZHOU, B.; SHI, X.; WANG, B.; LI, D.; SHEN, J.; CHEN, Q.; QIN, W. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. **Plant Soil**. p.27-37, 2013.

CASAROLI, D. & VAN LIER, Q. J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas., p.59-66, 2008.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS - RS/SC. Manual de Adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS/NRS, p. 400, 2004.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. DOU nº 053, de 18/03/2005, p.58-63, 2005.

COSTA, A.C. Rendimento de milho, atributos químicos e formas do fósforo no solo após nove aplicações anuais de dejetos suíno. 2011. 86f. Mestrado (manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2011.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E. & TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays Clay Miner.**, p.466-473, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, p.212, 1997.

GATIBONI, L. C.; SMYTH, T. J.; SCHMITT, D. E.; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C. M. B. Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de Santa Catarina. Lages: UDESC/CAV; 2014. (*Boletim técnico*, 2).

GUARDINI, R.; COMIN, J. J.; SCHMITT, D. E. et al. Accumulation of phosphorus fractions in typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, p.215-225, 2012.

KOOPMANS, G. F.; MCDOWELL, R. W.; CHARDON, W. J.; OENEMA, O.; DOLFING, J. Soil phosphorus quantify intensity relationships to predict increased soil phosphorus loss to overland and subsurface flow. **Chemosphere.**, p.679-87, 2002.

MCDOWELL, R.; SHARPLEY, N. A.; BROOKES, P.; POULTON, P. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. **Soil Sci**, p.137-149, 2001.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fundamentos de química do solo. Porto Alegre, p.136-137, 2017.

MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P.; The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudo boehmite. Part I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. **J Soil Sci**. p.222-9, 1966a.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, p. 31-36, 1962.

NOVAIS, R. F., SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. p.399, 1999.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação Solo-Planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS, p.133-204, 2007.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p.399, 1999.

OLIVEIRA, M. F. M.; FAVARETTO, N.; ROLOFF, G.; FERNANDES, C. V. S. Estimativa do potencial de perda de fósforo através da metodologia ‘‘P-index’’. **R Bras Eng Agric Amb.**, p.267-73, 2010.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, p.144-149, 1957.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. **Pesq. Agropec. Bras.**, p.1179-1184, 1998.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C. & RHODEN, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, p.21-28, 2007.

SÁ, J. R. J. P. N.; GOMES, I. F.; VASCONCELOS, A. L. Retenção de fósforo em solos da Zona da Mata de Pernambuco. **Pesq. agropec. bras.**, p.183:188, 1968.

SCHERER, E. E., NESI, C. N. ; MASSOTTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas da Região Oeste Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1375-1383, 2010.

SHARPLEY, A.; DANIEL, T. C.; SIMS, J. T.; POTE, D. H. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. **J Soil Water Conserv.**, p.160-6, 1996.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p.147-168, 2004.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p.147-168, 2004.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. New York, Oxford University Press, p.277, 1989.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2.ed. Porto Alegre, p.174, 1995.

TUCCI, C. A. F. Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. p.142, 1991.

VILAR, C. C.; COSTA, A. C. S. da; HOEPERS, A.; SOUZA JUNIOR, I. G de SOUZA. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, p.1059-1068, 2010.

WOODRUFF, J. R.; KAMPRATT, E. J. Phosphorus adsorption as maximum measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability, **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, p.148-150, 1965.

## **CAPÍTULO 2**

### **RESUMO**

#### **APLICAÇÃO DO LIMITE CRÍTICO AMBIENTAL DE FÓSFORO NAS PROPRIEDADES QUE COMPÕEM A MICRO-BACIA DO RIBEIRÃO ABÓBORA**

O Ribeirão Abóbora é o principal manancial de abastecimento de água da população de Rio Verde/GO. As águas do Ribeirão também são utilizadas no processo produtivo do complexo industrial BRF e abastecimento das propriedades rurais. O uso de fertilizantes fosfatados em dosagens excessivas, tanto na forma mineral quanto na forma de dejetos de animais, é potencialmente prejudicial ao meio ambiente. Nesse sentido, a aplicação do Limite Crítico Ambiental de fósforo (LCA-P) para solo de Cerrado, conforme o teor de argila de P do solo, utilizando-se como método de extração o Mehlich 1 é de fundamental importância para verificar a existência de algum risco ambiental de contaminação por fósforo. O trabalho teve por objetivos determinar os teores P e argila dos solos em 46 propriedades agrícolas que compõem a micro-bacia do Ribeirão Abóbora, município de Rio Verde – GO e classificá-los quanto ao nível de P e aplicar o modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 \cdot \text{argila\%}$ ” determinado no capítulo 1. Essa etapa foi conduzida em campo em que 46 propriedades rurais que compõem a micro-bacia foram amostradas e determinados os teores de fósforo (P) pelo extrator Mehlich 1 e de argila nas profundidades de 0-20 cm nos laboratórios Multiusuário da Universidade de Rio Verde. E testar a eficiência do modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 \cdot \text{argila\%}$ ” em separar os solos com alto e baixo risco de transferência de P para as águas. De posse a esses valores, os teores de fósforo foram classificados quanto aos níveis muito baixo a muito alto conforme o teor de argila. Das propriedades analisadas, 69 % dos solos foram classificados com teores de P muito baixo e baixo, e os demais 31 % como médio a muito alto. Os resultados evidenciaram que o modelo foi eficaz na indicação de amostras de solo com maior potencial de transferência de P naquele conjunto de amostras, usando como variável de entrada apenas o teor de P-Mehlich e a proporção de argila do solo. Portanto, com o uso do modelo proposto para calcular o LCA-P, foi constatado que houve valores superiores ao calculado em quatro propriedades. Dessa maneira, deve-se ter uma atenção redobrada para essas propriedades a fim de que esses teores voltem aos níveis críticos estabelecidos para solos de Cerrado.

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica, eutrofização, monitoramento.



## CHAPTER 2

### ABSTRACT

#### **APPLICATION OF THE ENVIRONMENTAL CRITICAL LIMIT OF PHOSPHORUS IN THE PROPERTIES THAT MAKE UP THE WATERSHED RIBEIRÃO ABÓBORA**

The Ribeirão Abóbora stream is the main water supply source of the population of Rio Verde/GO. The waters of the stream are also used in the production process of the BRF industrial complex and supply of rural properties. The use of phosphate fertilizers in excessive dosages, both in mineral form and in the form of animal manure, is potentially harmful to the environment. In this sense, the application of the Critical Environmental Limit of Phosphorus (LCA-P) for Cerrado soil, according to the clay content of P of the soil, using Mehlich 1 as an extraction method is of fundamental importance to verify the existence of some environmental risk phosphorus contamination. The objectives of this work were to determine the P and clay contents of the soils in 46 agricultural properties that make up the Ribeirão Abóbora watershed, municipality of Rio Verde - GO and classify them according to the P level and apply the model "LCA-P:  $20 + 0.5 \cdot \text{clay}\%$ " determined chapter 1. This stage was conducted in a field in which 46 rural properties that make up the watershed were sampled and the phosphorus (P) contents were determined by the extractor Mehlich 1 and clay at depths of 0-20 cm in the Multiuser laboratories of the University of Rio Verde. And test the efficiency of the model "LCA-P:  $20 + 0.5 \cdot \text{clay}\%$ " in separating the soils with high and low risk of P transfer to the waters. In possession of these values, phosphorus contents were classified according to very low to very high levels according to clay content. Of the properties analyzed, 69% of the soils were classified with very low and low P contents, and the other 31% as medium to very high. The results showed that the model was effective in the indication of soil samples with higher P transfer potential in that set of samples, using only the P-Mehlich content and the clay proportion of the soil as an input variable. Therefore, with the use of the proposed model to calculate the LCA-P, it was found that there were values higher than that calculated in four properties. Thus, attention should be paid to these properties so that these contents return to the critical levels established for Cerrado soils.

**Keywords:** Watershed, eutrophication, monitoring.

## 1 INTRODUÇÃO

O Ribeirão Abóbora é o principal manancial de abastecimento de água da população de Rio Verde/GO. As águas do Ribeirão também são utilizadas no processo produtivo do complexo industrial BRF e abastecimento das propriedades rurais para uso doméstico e para dessedentar a sede de animais. Os únicos usos outorgados referem-se às captações da SANEAGO para abastecimento público e da BRF.

Com relação à utilização da água, os conflitos existentes estão relacionados principalmente à multiplicidade dos usos e no aumento da demanda. A situação é mais notória nos grandes centros urbanos e nas regiões com déficit hídrico, onde a escassez de água está relacionada a condicionantes naturais e antrópicos: contaminação, desperdício, aumento de demanda e redução do potencial natural de fornecimento. Em períodos de estiagem a situação se torna mais crítica, e os conflitos se tornam mais notórios em face da redução da oferta e concomitante aumento de demanda (Garcia et al., 2007).

O uso de fertilizantes fosfatados em dosagens excessivas, tanto na forma mineral quanto na forma de dejetos de animais, é potencialmente prejudicial ao meio ambiente, podendo causar eutrofização de mananciais (Barreto et al., 2015). Dessa forma, é importante uma definição dos limites de aplicação de P nos solos cultivados no Centro do Brasil, especialmente em culturas anuais, visando uma boa nutrição das plantas e minimizando os impactos ambientais.

Nesse sentido, Gatiboni et al., (2015) estabeleceram um LCA-P, que é determinado conforme o teor de argila do solo e representa, aproximadamente, 80% da capacidade do solo em reter P, utilizando como método de extração o Mehlich 1. Considerando-se a sensibilidade do Mehlich 1 ao poder-tampão do solo, extraindo menos P em solos mais argilosos, a hipótese estabelecida foi que os LCA-P discriminados por esse método também sejam sensíveis ao teor de argila do solo e, por isso, existem não um, mas vários LCA-P em razão do teor de argila do solo. O LCA-P determinado por Gatiboni et al., (2015) para os solos de Santa Catarina foi  $40 + \text{arg}(\%)$ , com solos até 80% de argila.

No âmbito de Santa Catarina, a FATMA publicou em 05/11/2014 uma reformulação da Instrução Normativa da Suinocultura (IN-11 FATMA), em que, dentre outras modificações, é adotado o método LCA-P proposto por Gatiboni et al. (2015) para calcular o teor máximo de P disponível por Mehlich 1 que o solo pode conter na camada de 0 a 10 cm (FATMA, 2014).

Assim, objetivou-se determinar os teores P e argila dos solos nas 46 propriedades agrícolas que compõem a micro-bacia do Ribeirão Abóbora, município de Rio Verde – GO, classificá-los quanto ao nível de P e aplicar o modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 * \text{argila\%}$ ” a fim de verificar a existência de algum risco ambiental de contaminação por fósforo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram identificadas 100 propriedades rurais que compõem a micro-bacia do Ribeirão Abóbora com o auxílio da Secretária Municipal do Meio Ambiente da Prefeitura de Rio Verde, Goiás e da Associação dos Produtores de Água do Município de Rio Verde no ano de 2019 (Anexo 1). Em 50% das propriedades foram determinados os teores de P e de argila na profundidade de 0-20 cm. Alguns resultados foram fornecidos pelos produtores (em oito propriedades), baseando-se nas análises da fertilidade do solo das respectivas propriedades, realizadas no ano agrícola 2018/2019.

Em 38 propriedades rurais que não possuíam resultados de análise da fertilidade do solo de anos recentes, foi realizada amostragem do solo na profundidade de 0-20 cm seguindo instruções do manual de análise química da Embrapa (Silva et al., 2009), com a utilização de trado holandês, entre os dias 13 de março a 24 de abril de 2019. O solo amostrado foi seco em estufa com aeração forçada a 60° C e peneirados em malha de 2mm. As propriedades rurais amostradas foram padronizadas quanto a finalidade de produção de grão, somente foi amostrado em propriedades com os sistemas soja+milho/sorgo/milheto. As propriedades compostas por pastagens não foram amostradas.

Nos solos amostrados foram determinados os teores de P pelo extrator Mehlich 1 (Silva et al., 1999), e de argila nos laboratórios Multiusuário da Faculdade de Agronomia da Universidade de Rio Verde. Em seguida, foi feita a classificação dos teores de P quanto ao teor de argila das propriedades seguindo a classificação de Sousa; Lobato, (2004), perfazendo 46 propriedades (Tabela 5).

Foi realizada a estatística descritiva dos teores de P e de argila para obtenção do desvio padrão para o fósforo e argila com auxílio do programa SISVAR referente a Ferreira, (2019), e para testar a eficiência do modelo em separar solos com alto e baixo risco de transferência de P para as águas, o modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 * \text{argila\%}$ ” foi aplicado em conjunto de 46 amostras

analisadas em torno da micro-bacia do Ribeirão Abóbora, abrangendo diversas texturas, mineralogias, e tipos de solo.

Tabela 5 - Interpretação da análise de fósforo nos solos do Cerrado pelo método Mehlich 1 para culturas anuais em geral, com base em amostras de solo coletadas na camada de 0 a 20 cm

| Classes de disponibilidade de P | Produtividade potencial<br>% | P Mehlich-1 (em função do teor de argila) |           |           |         |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|---------|
|                                 |                              | ≤15%                                      | 16% a 35% | 36% a 60% | >60%    |
|                                 |                              | ----- mg dm <sup>-3</sup> -----           |           |           |         |
| Muito baixo                     | 0-40                         | 0-6,1                                     | 0-5,0     | 0-3,0     | 0-2,0   |
| Baixo                           | 41-60                        | 6,1-12,0                                  | 5,1-10,0  | 3,1-5,0   | 2,1-3,0 |
| Médio                           | 61-80                        | 12,1-18,0                                 | 10,1-15,0 | 5,1-8,0   | 3,1-4,0 |
| Adequado                        | 81-90                        | 18,1-25,0                                 | 15,1-20,0 | 8,1-12,0  | 4,1-6,0 |
| Alto                            | 91-100                       | 25,1-40,0                                 | 20,1-35,0 | 12,1-18,0 | 6,1-9,0 |
| Muito alto                      | 100                          | > 40                                      | > 35,0    | > 18,0    | > 9,0   |

Fonte: Sousa; Lobato; Rein (2004).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os níveis de P das 46 propriedades analisadas foram classificados de muito baixo a muito alto conforme o teor de argila. Sendo 51% dos solos classificados como muito baixo, 18% como baixo, 13% como médio, 2% como adequado, 7% como alto e 9% como muito alto. Os solos das propriedades analisadas 2% eram de textura arenosa, 72% de textura média, 24 % de textura argilosa e 2% de textura muito argilosa (Figura 11).

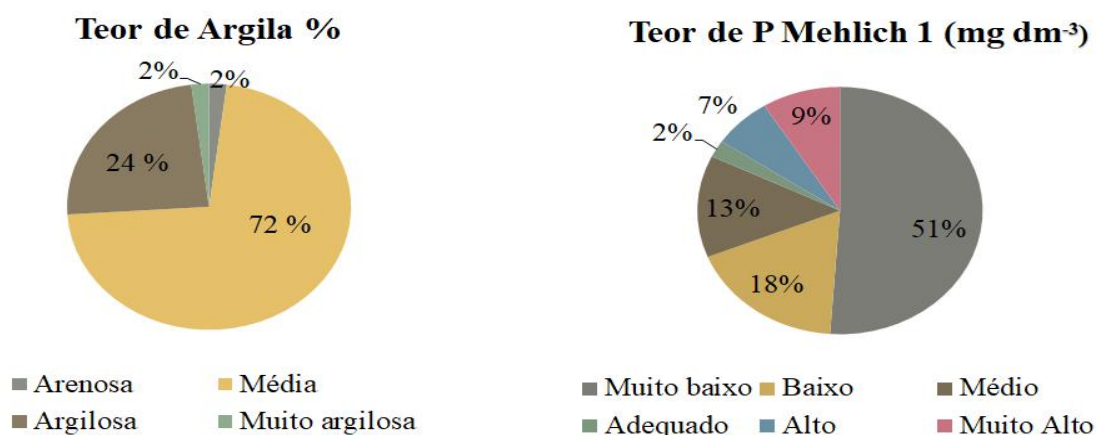


Figura 11 - Percentual de fósforo (P) e argila dos solos de amostras das propriedades componentes da micro-bacia do Ribeirão Abóbora, município de Rio Verde, GO.

De acordo com Freire et al. (2008), a eficiência de extração do P disponível pelo método Mehlich-1 é influenciada pela capacidade tampão de fosfatos do solo. Por isso, na interpretação da disponibilidade de P, são usadas características que estão relacionadas com a capacidade tampão, como o teor de argila ou o valor do P remanescente. Sobral et al. (2015), verificaram que em solos arenosos o nível crítico, valor acima do qual a probabilidade de resposta é baixa, é mais alto que em solos argilosos. E, em solos argilosos, como o poder tampão é mais alto, o extrator é consumido e a capacidade de extrair P diminui.

Pela análise estatística descritiva dos teores de P e de argila obtiveram-se o desvio padrão e a média (Tabela 6).

Tabela 6 - Estatística descritiva dos teores de P e argila dos solos amostrados da micro-bacia do Ribeirão Abóbora

| Parâmetros    | P (Mel 1)           | Argila  |
|---------------|---------------------|---------|
|               | mg dm <sup>-3</sup> | %       |
| Tamanho       | 46                  | 46      |
| Teor mínimo   | 0,17                | 15,71   |
| Teor máximo   | 63,05               | 72,88   |
| Amplitude     | 62,88               | 57,17   |
| Média         | 9,78                | 31,7    |
| Desvio padrão | 14,8413             | 12,6216 |

P Mel 1= teor de P determinado pelo extrator Mehlich 1.

Os resultados evidenciaram que o modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 \cdot \text{argila}\%$ ” foi capaz de separar as amostras em duas classes, as que estão acima e abaixo do LCA-P (Figura 12).

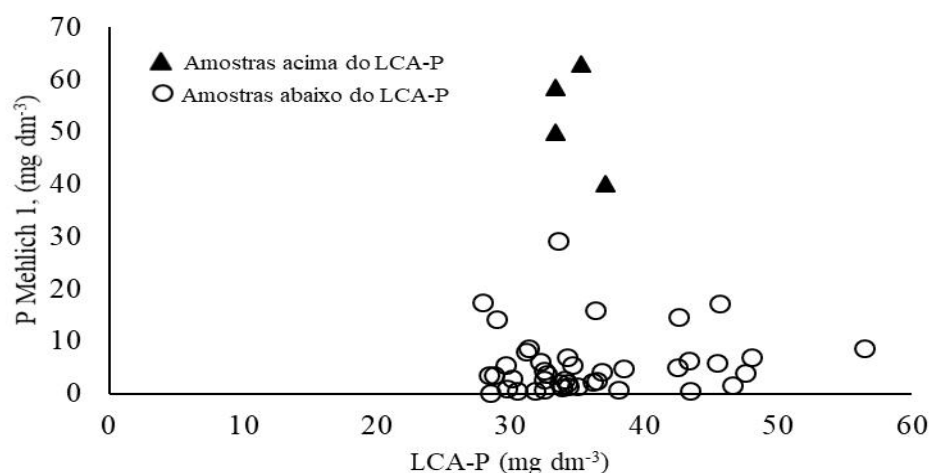


Figura 12 - Teor de P Mehlich 1 e LCA-P de 46 amostras da micro-bacia do Ribeirão Abóbora. As amostras foram previamente classificadas pelo modelo “LCA-P:  $20 + 0,5 \cdot \text{argila}\%$ ”, estando abaixo (círculos) ou acima (triângulos) do LCA-P.

O modelo foi eficaz na indicação de amostras de solo com maior potencial de transferência de P naquele conjunto de amostras que estão acima do LCA-P, mostrando que apresentam altos riscos de provocar a contaminação de mananciais através da transferência de P por lixiviação e, principalmente, por escoamento superficial, pois são fontes ricas em P, o qual é um dos principais elementos promotores do crescimento das algas, ocorrendo a eutrofização. Como consequência, pode-se ter uma total degradação da potabilidade da água. Isso pode decorrer devido à baixa mobilidade do P no solo, já que assim ocorre o enriquecimento da camada superficial com esse nutriente, acarretando um material erodido mais danoso ao ambiente pela maior facilidade na liberação do P (Gatiboni et. al., 2014).

Gatiboni et al. (2015), trabalhando com o LCA-P de 82 amostras coletadas em várias regiões de Santa Catarina, afirmam que o valor calculado é sempre muito superior ao nível crítico, sendo que quase três vezes num solo com 20% de argila e onze vezes em um solo com 60% de argila. Assim, ao usar o modelo LCA-P para limitar a aplicação de dejetos de animais, por exemplo, em nenhuma situação há risco de ocorrer limitação de crescimento das plantas por deficiência de P.

Ressalta-se que o LCA-P deve ser respeitado independentemente do tipo de fertilizante ou resíduo fosfatado utilizado. Assim, os LCA-P calculados por esse método pode ser utilizado também para avaliar potencial poluente de P de solos que receberam os mais variados tipos de fertilizantes ou rejeitos, como esterco de animais, camas de aves, lodos estações de tratamento de esgoto, resíduos industriais, entre outros e, inclusive, os fertilizantes minerais.

## **4 CONCLUSÕES**

Com o uso do modelo proposto para calcular o LCA-P, foi constatado que houve valores superiores ao calculado em quatro propriedades. Portanto, deve-se ter uma atenção redobrada para essas propriedades a fim de que esses valores voltem aos níveis críticos estabelecidos para solos de Cerrado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um fator importante que deve ser levado em consideração é que esta proposta enfoca apenas o teor de P no solo e a sua liberação para a água após a saturação do solo com P. Contudo, se a área em questão sofrer perdas relevantes de solo por erosão, as partículas de solo (e, conseqüentemente, o P aderido) serão levadas para os córregos e, neste caso, contribuirão para a descarga de P no ambiente, mesmo que o solo esteja abaixo do LCA-P. Desta maneira, para que o LCA-P seja um parâmetro seguro, é necessário que a erosão hídrica esteja controlada através de técnicas de manejo do solo e que estas sejam adequadas para a área.

## REFERÊNCIAS

BARRETO, L. V.; BARROS, F. M.; BONOMO, P.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. S. Eutrofização em rios brasileiros. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, p.774–787, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [S.I.], v.37, n.4, p529-535, dec. 2019.

FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; FRANCA, G. E. de; COELHO, A. M. Fertilidade de solos: interpretação de resultados de análise de solo. Cultivo do milho. 4. Ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.

FATMA - Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina –. Instrução Normativa 11 versão outubro/2014. [Acesso em: 07 de dez. de 2019]. Disponível em: < <http://www.ima.sc.gov.br/>>

GARCIA, A. V.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, G. P.; COSTA, P. P.; OLIVEIRA, L. A. Disponibilidade hídrica de água outorgado na micro-bacia do Ribeirão Abóbora, Município de Rio Verde, estado de Goiás. **Caminhos de Geografia**, p.97–106, 2007.

GATIBONI, L. C.; SMYTH, T. J.; SCHMITT, D. E.; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C. M. B. Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de Santa Catarina. Lages: UDESC/CAV; 2014. (Boletim técnico, 2).

GATIBONI, L. C.; SMYTH, T. J.; SCHMITT, D. E.; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C. M. B. Limite crítico ambiental de fósforo para solos sul-brasileiros com adição de altas doses e nutrientes. **Tópicos Ci. Solo**, p.144-171, 2015.

SILVA, F. C. et al. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 2.ed. Brasília, DF; Embrapa Solos: Rio de Janeiro; Embrapa Informática Agropecuária: Campinas. p.627, 2009.

SILVA, F. C. et al. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilidades. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, p.370, 1999.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo. 1 Ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção e adubação. Planaltina: Embrapa, p.416, 2004.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, p.147-168, 2004.

## SUGESTÃO

Conforme Gatiboni et al. (2014) recomenda-se a adoção da equação LCA-P para o cálculo do Limite Crítico Ambiental de P para solo de Cerrado, seguindo-se a interpretação dos resultados e recomendações (FATMA, IN 11, 2014):

- 1) Quando o teor de P disponível pela análise do solo da camada de 0-20 cm for menor que o LCA-P calculado pela equação, o agricultor pode aplicar fertilizantes fosfatados baseado na quantidade de nutrientes (N, P e K) recomendada para as culturas que serão cultivadas na área.
- 2) Quando o teor de P disponível pela análise de solo da camada de 0-20 cm apresentar valor até 20% acima do LCA-P, ou seja, com teor de P entre o LCA-P e o P-Lim, o agricultor deve suspender temporariamente a aplicação de fertilizantes fosfatados até que os teores de P retornem a patamares seguros.
- 3) Quando o teor de P disponível pela análise de solo da camada de 0-20 cm apresentar valor acima do P-Lim do solo, além da suspensão da aplicação de fertilizantes fosfatados, são necessárias ações mitigatórias imediatas para diminuir o risco de



poluição ambiental. Essas ações mitigatórias podem ser o revolvimento do solo para diluição do P no perfil do solo (associadas com medidas para evitar a erosão) e o cultivo de plantas com alta capacidade de extração de P. Neste último caso, ressalta-se, para esse propósito, a maior eficiência de culturas onde é retirada do local grande parte da biomassa vegetal produzida, como culturas para silagem e fenação.

## ANEXOS

### ANEXO 1 – Perímetro das propriedades rurais que fazem parte da micro-bacia do Ribeirão Abóbora.

