

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CDS/FACE-ECO/IB/IG/IQ
CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FIXAÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO: UMA REVISÃO

LUCIANA PINHEIRO PIRES

Brasília – DF

2023

LUCIANA PINHEIRO PIRES

FIXAÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO: UMA REVISÃO

Trabalho Interdisciplinar Integrado de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Uidemar Morais Barral

Brasília – DF

2023

Pires, L. P.

Fixação e disponibilidade de fósforo no solo: uma revisão / Pires, L. P.
– Brasília, 2023. 40 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade de
Brasília, Curso de Ciências ambientais, Brasília, 2023.

Orientador: Uidemar Morais Barral.

1. Absorção de fósforo. 2. Química do solo. 3. Fósforo disponível. 4.
Uso eficiente

LUCIANA PINHEIRO PIRES

FIXAÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO: UMA REVISÃO

Trabalho Interdisciplinar Integrado de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciências Ambientais.

Brasília, 24 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Uidemar Morais Barral

Instituto de Geociências - UnB

Orientador

Professor Dr. Diego Pereira Lindoso

Centro de Desenvolvimento Sustentável - UnB

Professor convidado

Dedico este trabalho a minha família e ao Sagrado Coração de Jesus, que a cada dia me surpreende com o seu amor.

“Quem não pode fazer grandes coisas, faça ao menos o que estiver na medida de suas forças; certamente não ficará sem recompensa.”

(Santo Antônio)

RESUMO

O fósforo (P) é considerado um elemento insubstituível, tendo em vista a sua importância para as plantas e animais. Mas a sua disponibilidade no solo é limitada, devido as características do solo que favorecem a fixação do fósforo. O uso de fertilizantes é necessário, mas o excesso e com baixa eficiência criam um estoque de fósforo inacessível para as plantas. O objetivo desse trabalho foi fazer um levantamento de trabalhos sobre o comportamento do fósforo no solo e de métodos usados para sua disponibilidade. Trata-se de uma revisão de literatura narrativa, com busca nas bases de dados Google Acadêmico, Scielo e Science Direct, utilizando-se as palavras chaves: *desorption of phosphate*, *desorption of phosphorus*, *phosphorus availability*, combinados com *soil*, *soil mineral particles*, *advances or technologies*. O critério de inclusão foram artigos entre os anos 2013 e 2023 que tinham como temática principal técnicas de disponibilização do P fixado no solo ou o seu uso eficiente. A pesquisa resultou na seleção de 84 artigos, que após a leitura dos resumos e verificação dos critérios de inclusão, foram considerados apenas 23 publicações. Os métodos encontrados foram: biocarvão, biofertilizantes, administração de nutrientes 4C e o reuso do fósforo recuperado de águas residuárias. Os resultados mostram que é possível tornar o fósforo fixado disponível novamente a partir do conhecimento do seu comportamento no solo, mas ainda existem muitos desafios devido à complexidade das dinâmicas do solo, sendo necessário o incentivo a pesquisas para o descobrimento de novas técnicas ou aprimoramento das existentes.

Palavras-chave: Absorção de fósforo; química do solo; fósforo disponível; uso eficiente.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is considered an irreplaceable element in view of its importance for plants and animals. But the availability of P in the soil is limited, due to the characteristics of the soil that favor the fixation of phosphorus. Using fertilizers is necessary, but the excess and low efficiency make a stock of phosphorus inaccessible to plants. The objective of this work was to make a survey of works on the behavior of phosphorus in the soil and methods used for its availability. This is a narrative literature review, with search in the databases Google Scholar, Scielo, and Science Direct, using the keywords: *desorption of phosphate, desorption of phosphorus, phosphorus availability*, combined with *soil, soil mineral particles, advances or technologies*. The inclusion criteria were articles between the years 2013 and 2023 that had as their main theme techniques of availability of the P fixed in the soil or its efficient use. The results show that it is possible to make the phosphorus fixed in the soil available again from the knowledge of its behavior in the soil, but there are still many challenges due to the complexity of the soil dynamics, being necessary to encourage research for the discovery of new techniques or improvement of existing ones.

Keywords: Phosphorus absorption; soil chemistry; available phosphorus; efficient use.

LISTA DE FIGURAS E QUADRO

Figura 1- Ciclo do Fósforo	13
Figura 2 - Formas de fósforo no sistema solo-planta; interdependências e equilíbrios.	16
Figura 3-Mapa nacional da capacidade de retenção de fósforo por solos no Brasil	20
Figura 4 -Representação geral da disponibilidade de fósforo conforme pH.....	23
Figura 5 - Fluxograma representativo da exclusão e inclusão dos artigos neste estudo	25
Quadro 1 - Comparativo entre as estratégias de manejo encontradas na literatura revisada.....	26

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS E QUADRO.....	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. Fósforo: um recurso natural	13
2.1.2. Dinâmica do fósforo no solo	14
2.1.3. Adsorção/fixação de P no solo	17
2.2. Características dos solos e suas relações com a fixação de fósforo	18
2.2.1. Mineralogia	19
2.2.2. Textura do solo.....	20
2.2.3. Matéria orgânica.....	21
2.2.4. pH do solo	22
3. OBJETIVO GERAL	24
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4. METODOLOGIA	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1. O “Legado” do fósforo.....	26
5.2. Biochar ou biocarvão	27
5.3. Biofertilizantes	29
5.4. Uso eficiente dos fertilizantes e reuso do fósforo	31
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

Por ser um nutriente essencial tanto para as plantas quanto para os animais, o fósforo é visto como um elemento insubstituível, e a sua escassez principalmente nos solos mais intemperizados gera preocupações no meio agrônômico e globalmente quando se trata da segurança alimentar (HORTA E TORRENT, 2010; OSORNO et al, 2018).

Apesar de se apresentar em sua forma orgânica e inorgânica, o fósforo (P) é o nutriente menos acessível as plantas em virtude da sua interação com os atributos do solo, principalmente com os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) presentes nos minerais de argila que são capazes de reter o fósforo na fração sólida do solo por meio dos seus sítios de adsorção, deixando-o indisponível para serem absorvidos pelos vegetais na solução do solo (OSORNO et al, 2018).

Dessa forma, como a produtividade das culturas depende da disponibilidade do fósforo, que atua no processo da fotossíntese e conseqüentemente no desenvolvimento das plantas, o uso de fertilizantes têm sido uma solução para reduzir a deficiência desse nutriente nos solos (NOVAIS et al., 2007; MENDES et al., 2022). Porém o seu uso indiscriminado, sobretudo dos fertilizantes fosfatados, tem não só colocado em questionamento a eficiência desses produtos, mas também gerado problemas ambientais como a eutrofização dos cursos d'água devido especialmente ao escoamento superficial (YANG et al., 2021; ROBERTS E JOHNSTON, 2015).

Dessa forma, houve um interessante crescente nos últimos anos em pesquisas voltadas para o aprimoramento das técnicas e estratégias de manejos existentes capazes de solucionar a falta desse elemento essencial para o desenvolvimento das plantas e alterar a dinâmica das transformações do P no solo de maneira sustentável (KLEIN E AGNE, 2012; MOURA et al., 2015).

O aumento da demanda por fertilizantes fosfatados e a possível escassez das reservas minerais utilizadas para sua produção também tem corroborado para a busca de outras alternativas e tecnologias que tornem a absorção do fósforo mais eficiente (PANTANO et al., 2016; TIECHER et al., 2023).

Como o solo possui um grande estoque de fósforo, seja pelo excesso de fertilizantes ou em decorrência de suas características naturais, mas a maior parte encontra-se indisponível (MENDES et al.,2022), surgiram os questionamentos: “*É possível reverter ou minimizar o processo de fixação do fósforo?*”; “*Se sim, o que está sendo feito para tornar acessível essa reserva ou eficiente o uso do fósforo?*”.

Assim, o objetivo desse trabalho foi fazer um levantamento de trabalhos sobre o comportamento do fósforo no solo e de métodos usados para sua disponibilidade. Para isso, foi realizado uma revisão de literatura nas seguintes bases de dados: Google Acadêmico, Scielo e Science Direct. Desse modo, este trabalho ganha importância para incentivar novas pesquisas voltadas para técnicas sustentáveis que disponibilizem o fósforo no solo, aproveitando-se principalmente da própria reserva de P existente nele.

No primeiro tópico do trabalho temos a introdução, seguida por um referencial teórico que contextualiza os pontos mais relevantes referentes a fixação do fósforo para compreensão das técnicas adotadas na reversão desse processo. Assim, na primeira parte do referencial teórico são abordadas características gerais do fósforo e a sua dinâmica no solo, além de discutir sobre as terminologias adotadas para identificar a formação do P não-lábil. Já a segunda parte, foca nos principais atributos do solo que contribuem para a fixação do fósforo. No terceiro item temos os objetivos do trabalho, e em seguida, é apresentado a metodologia, os resultados e as considerações finais.

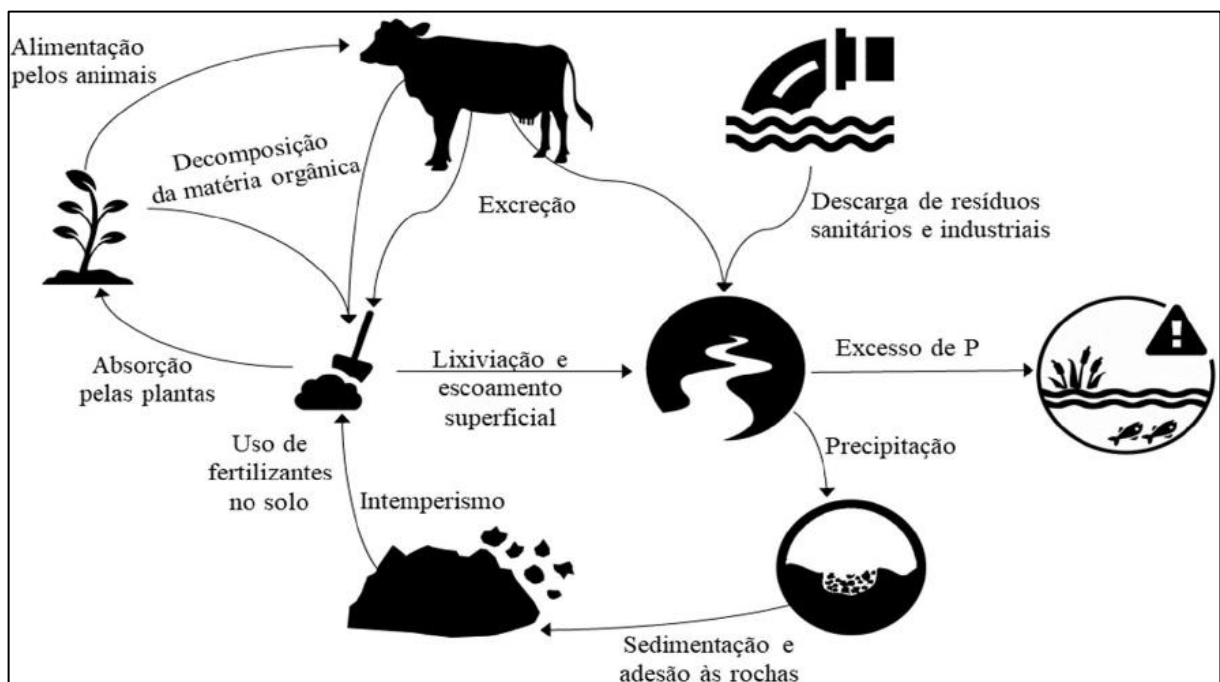
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fósforo: um recurso natural

Estando presente na cadeia trófica, por meio da absorção pelas plantas, e exercendo papel estrutural nas moléculas de DNA, RNA e fosfolipídios, o fósforo (P) é um elemento essencial para todas as formas de vida, tornando-se insubstituível (HORTA E TORRENT, 2010). Logo, é válida a preocupação quanto a sua escassez e pertinente pensar sobre o uso sustentável desse recurso (SASABUCHI et al., 2023).

Diferente do ciclo do carbono e do nitrogênio, o P apresenta particularidades que limitam a sua transferência física entre os ecossistemas. Por ser gerenciado basicamente pela hidrosfera e litosfera, o seu processo de movimentação é considerado longo, sendo necessário muitas vezes a atuação antrópica por meio da adição de fertilizantes no solo, como os fosfatados produzidos a partir de minerais, para manter o balanço do elemento e garantir a sua disponibilidade (PANTANO et al., 2016; HORTA E DUARTE, 2021).

Figura 1- Ciclo do Fósforo



Fonte: SASABUCHI et al., 2023.

Por influenciar no crescimento das plantas, a produção agrícola é a maior interessada na disponibilidade do P no solo. Estima-se que mais de 40% dos solos agrícolas possuem concentrações de fósforo abaixo do esperado, sendo necessário a utilização de fertilizantes

fosfatados (HORTA E DUARTE, 2021). Porém, a eficiência desses fertilizantes é considerada baixa uma vez que o P inorgânico fornecido por eles é rapidamente transformado em formas com menor grau de disponibilidade para serem absorvidos pelas plantas. Assim, a aplicação constante e em grande quantidade desses fertilizantes gera uma acumulação de P no solo, seja pelo processo de precipitação ou fixação, sendo de difícil acesso principalmente a curto prazo (LUZ E BRITO, 2022).

A principal fonte dos fertilizantes fosfatados são as rochas fosfáticas que contêm minerais de apatita, porém atualmente são poucas as reservas fosfáticas consideradas como de alta qualidade e com baixo teor de impurezas, o que tem acarretado um aumento no preço dos fertilizantes (PANTANO et al., 2016; TIECHER et al., 2023). SASABUCHI et al. (2023) afirmam serem dois os principais problemas que envolvem o fósforo: (I) o esgotamento desse recurso devido a extração predatória e (II) a eutrofização dos corpos hídricos em consequência do aporte de elevadas concentrações de fósforo.

Apesar de ser um elemento reutilizável, o fósforo não é uma fonte renovável. Estima-se que até 2035 haverá uma demanda por fósforo maior que a sua disponibilidade (SASABUCHI et al., 2023). A adsorção de fosfato (PO_4^-) pelos solos, principalmente nos mais intemperizados, faz com que eles sejam uma reserva de P, sendo mais uma fonte deste nutriente caso seja revertido o mecanismo de fixação (MOURA et al., 2015)

Dessa forma, é essencial desenvolver estratégias sustentáveis que disponibilizem ou facilitem o acesso ao estoque de fósforo presente no solo devido a fixação (TIECHER et al., 2023).

2.1.2. Dinâmica do fósforo no solo

Considerado um dos macronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, o fósforo (P) é visto como um elemento escasso na maioria dos solos tropicais que apresentam alto grau de intemperismo, tornando-se uma das preocupações do meio agrônômico, que busca soluções para suprir a falta desse nutriente para as culturas (VILAR E VILAR, 2013; ALMEIDA E VELLOSO, 1982).

A principal fonte de fósforo nos sistemas naturais são os minerais fosfatados primários como as apatitas (fosfatos de cálcio) que liberam o fósforo para a solução do solo a partir do processo de intemperismo, influenciado pelas características de formação do solo. Sendo assim, o fósforo está presente tanto na fase sólida do solo quanto na líquida, em sua forma orgânica e inorgânica, apresentando diferentes graus de estabilidade ou solubilidade, fatores determinantes

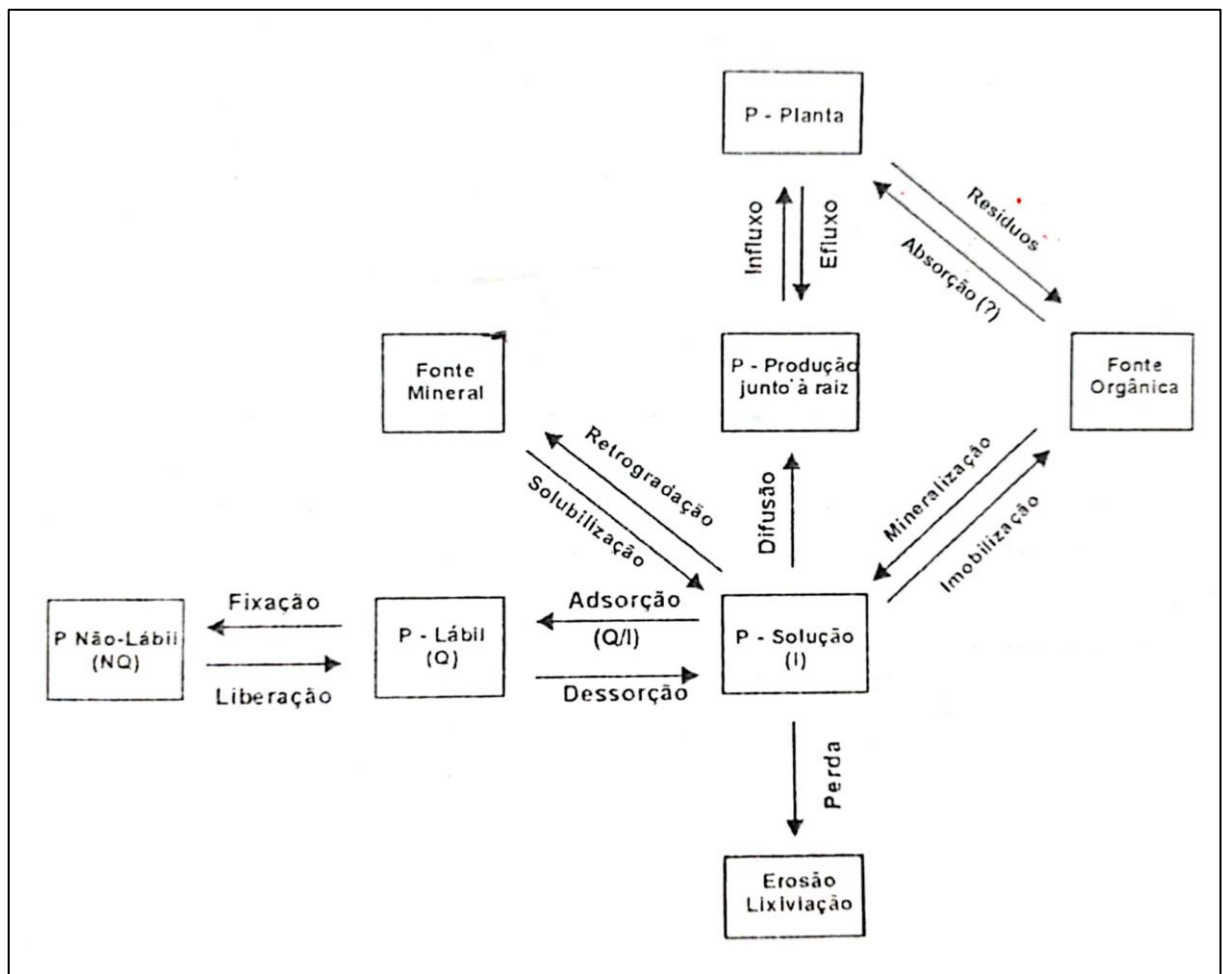
para a absorção desse nutriente pelas plantas (GATIBONI, 2003; KLEIN E AGNE, 2012; SOUZA et al., 2007).

O fósforo orgânico (Po) origina-se a partir da ligação do P com compostos orgânicos derivados do tecido vegetal, animal, microbiano ou de sua decomposição, sendo considerados compostos estáveis física e quimicamente. Já o fósforo inorgânico (Pi) pode ser encontrado nos minerais primários, adsorvido ao solo - devido a sua facilidade em formar complexos ligando-se ao alumínio, ferro ou cálcio -, precipitado ou na solução, onde de fato é absorvido pelas plantas na forma de íons ortofosfatos como H_2PO_4^- (di-hidrogenofosfato) e HPO_4^{2-} (hidrogenofosfato) (PAVINATO, 2007; GATIBONI, 2003; NOVAIS et al., 2007; PEREIRA, 2021).

Por ser responsável pelo crescimento do sistema radicular, produção de energia, além de atuar na fotossíntese, reprodução e outros processos nas plantas, a presença de P na solução do solo é de grande importância. Mas sua concentração é alterada devido a interferências de processos biológicos e químicos no sistema solo-planta (Figura 2), fazendo com que apenas uma pequena fração (<1%) de todo o fósforo presente no solo esteja prontamente disponível para absorção (NOVAIS et al., 2007; BARROS, 2020; LOURENÇO, 2020; ZHU et al., 2018).

À medida que o intemperismo ocorre e rompe a estrutura cristalina dos minerais primários, o fósforo é disponibilizado no solo e passa a compor a solução por meio do processo de solubilização. Porém, a depender de algumas condições do solo, por exemplo baixo pH, o compartimento P-solução reduz de tamanho com a precipitação do fósforo para formas menos solúveis (GATIBONI, 2003). Do mesmo modo, “as fontes orgânicas podem ser fonte (aumentar) ou ser dreno (diminuir) do P-solução” de acordo com Novais et. al (2007, p.476), já que, antes de ser acumulado no solo na forma mineralizada, o fósforo é temporariamente imobilizado na massa microbiana, auxiliando no crescimento da população dos organismos vivos.

Figura 2 - Formas de fósforo no sistema solo-planta; interdependências e equilíbrios.



Fonte: NOVAIS et. al. 2007.

Para tentar manter o equilíbrio na disponibilidade de P na solução para as plantas e os microrganismos, o solo possui um estoque na fase sólida conhecido como “P-lável”, responsável por repor o fósforo absorvido na solução. O P-lável é transformado em P não-lável conforme interage com a fase sólida do solo, formando compostos menos solúveis e tornando-se menos disponível para as plantas. A fração do P não-lável corresponde a maior parte do P_i nos solos que estão adsorvidos de forma específica de difícil reversão, mas que podem se transfigurar em lável pelo processo de liberação (Figura 2) que ocorrerá de forma lenta, ao longo de muitos anos (VILAR E VILAR, 2013; LOURENÇO, 2020; ROBERTS E JOHNSTON, 2015).

A ideia desse sistema é manter um equilíbrio entre as três “frações” de fósforo no solo: P não-lável, P-lável e P-solução (Figura 2), porém a realidade é outra, já que o estoque de P não-lável, ou seja, aquele P indisponível para as plantas, torna-se bem maior em comparação aos

demais em decorrência da forte ligação entre o fósforo e a fase sólida do solo, impedindo que esse se transforme em P-lábil e esteja presente na solução (PENN E CAMBERATO, 2019; PINTO et al., 2013).

À medida que o intemperismo aumenta, a manutenção do sistema torna-se mais difícil, pois o solo passa a competir com a planta pelo P, transformando-o rapidamente em não-lábil. Com o avanço do grau de intemperização ocorre uma mudança gradual das características do solo, a saturação por bases diminui, há um aumento da eletropositividade e conseqüentemente um aumento da adsorção aniônica, em especial do ânion fosfato (PO_4^{3-}). Nessa situação o solo deixa de ser fonte de fósforo e passa a ser dreno, retendo o fósforo na sua fase sólida (PAVINATO, 2007; NOVAIS et. al., 2007).

Em solos assim, a aplicação de fertilizantes para suprir a deficiência de P lábil para as culturas pode não ser uma solução eficiente, pois mais de 80% do que foi aplicado corre o risco de ser rapidamente retido pelo solo, contribuindo para um acúmulo de fósforo não-lábil (ZHU et al., 2018; MENDES et al., 2022).

2.1.3. Adsorção/fixação de P no solo

O processo de retenção do fósforo é benéfico quando se trata da utilização deste pelas plantas. Mas a retenção que resulta na formação de P não-lábil torna-se problemática quando o assunto é a fertilidade do solo. A terminologia utilizada para se referir a esse fenômeno pode variar de acordo com a literatura (VILAR E VILAR, 2013).

Um dos vocábulos empregados é adsorção, termo utilizado para designar reações químicas e até mesmo físicas que ocorrem em superfícies, chamadas de adsorventes, capazes de absorverem substâncias (adsorvato) em seus microporos, que ao passar do tempo, difundem-se para seu interior. Assim, a adsorção do fósforo acontece a partir da interação da sua forma solúvel – adsorvato - com os agregados do solo - adsorvente. No caso do compartimento do P-lábil, a adsorção é considerada não específica, pois ocorre por meio de atração eletrostática e formação de complexos de superfície de esfera externa com ligação de fraca energia e facilmente reversível. Em contrapartida, o P não-lábil é obtido pela formação de complexos de esfera interna devido a ligação covalente, sendo esta adsorção denominada específica e de difícil reversão (NOVAIS et al. 2007; LOURENÇO, 2020).

Outro termo considerado mais genérico e que também pode ser utilizado é “sorção”. Ele diz respeito as reações de adsorção e absorção, podendo incluir a precipitação: reação derivada da interação do P com ferro (Fe), alumínio (Al) ou até mesmo cálcio (Ca), onde uma nova fase ou composto pouco solúvel é formado e se torna inacessível para as plantas. Já a palavra

“fixação” é utilizada para se referir a formação de P não-lábil (FERNÁNDEZ, et al., 2008; PEREIRA, 2021). Como não há um consenso entre qual o termo adequado para ser adotado, neste trabalho os termos “adsorção” e “fixação” serão utilizados para se referirem apenas a adsorção específica de difícil reversão que forma o P não-lábil.

O processo de adsorção é influenciado pela área superficial, a temperatura do sistema, o pH do meio e pelas características do adsorvente, como tamanho dos poros, densidade, e grupos funcionais na superfície (PAVINATO, 2007). O clima tropical favorece a formação de solos mais intemperizados e conseqüentemente ácidos, como é o caso do Brasil. Esse tipo de solo possui em sua fração argila, óxidos de Fe e Al e argilas do grupo caulinita. Tais elementos contribuem para a fixação de P no solo, pois suas cargas são predominantemente positivas em ambientes ácidos, atraindo para si diversos ânions, dentre eles o fosfato (PO_4^{3-}) (VALLADARES et al., 2003).

Vinha et al., (2021) explica que a adsorção do fósforo no solo ocorre em três fases: na primeira, a reação acontece de forma rápida devido a presença de sítios muitos reativos de oxidróxidos que trocam seus ligantes OH^- e OH_2^+ . Na segunda fase, a adsorção ocorre em sítios menos reativos, enquanto a terceira é marcada pela precipitação do P.

Como forma de avaliar a fixação de fósforo no solo, as isotermas de adsorção são as mais utilizadas, porque de acordo com Valladares et al., (2003, p.112) permitem descrever “as relações de equilíbrio entre a quantidade de um elemento adsorvido e a quantidade remanescente na solução final”. Além disso, possibilitam expressar de forma numérica os atributos do solo, relacionando-os com a adsorção do fósforo (CORRÊA et al., 2011). Dentre elas, a mais comum é a isoterma de Langmuir, pois possibilita estimar a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), sendo que uma maior CMAP resulta na diminuição de P-lábil disponível (MOURA et al., 2015; VALLADARES et al., 2003; VINHA et al., 2021; ALOVISI et al., 2020). Outro parâmetro também utilizado por diversos autores para estimar a CMAP é o P remanescente (P-rem) (VILAR et al., 2010).

2.2. Características dos solos e suas relações com a fixação de fósforo

Estudos relacionam a facilidade de fixação do fósforo com atributos físicos e químicos do solo (THOMAZI et al., 1990; ALMEIDA E VELLOSO, 1982; VINHA et al., 2021), onde as principais características físico-químicas do solo que mais se relacionam com a fixação de P são o teor e natureza da argila, tipo de cátions trocáveis, matéria orgânica, teor de umidade, temperatura, concentração de fosfato solúvel, pH e tempo de reação (MELLO et al., 1979).

Existe uma tendência natural dos solos, principalmente quando ele se torna mais desenvolvido devido à intemperização, em fixar o fósforo (PAVINATO, 2007). Sendo assim, a maneira mais eficiente de diminuir a perda do P e ter acesso a esse nutriente “escondido” no solo, é não apenas compreender como os atributos atuam no processo de fixação, mas gerenciá-los de maneira sustentável, para que eles mesmos tornem o fósforo disponível novamente (TIECHER, et al., 2023). Assim, será discutido a seguir como as principais características do solo corroboram para a indisponibilidade do fósforo.

2.2.1. Mineralogia

Como visto anteriormente, a indisponibilidade do fósforo ocorre por meio da sua adsorção específica com os minerais do solo formando complexos de superfície de esfera interna (VILAR et al., 2010). Assim, compreender sobre a mineralogia do solo é essencial para se pensar em soluções que reduzam a adsorção do fósforo (FERNÁNDEZ et al. 2008; CESSA et al., 2009).

O número de minerais no solo torna-se reduzido com o avanço do intemperismo, sendo mais comum a presença do grupo dos filossilicatos que inclui os minerais de argila como a caulinita, e o grupo dos oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), representados por exemplo pelas hematitas (Hm), goethitas (Gt) e gibbsitas (Gb). Sendo considerada alta a afinidade do P com esses minerais, em decorrência da presença dos sítios ativos como a hidroxila em suas superfícies, quanto maior o teor de óxidos no solo maior será a adsorção de P, contribuindo assim para a diminuição da fração lábil do fósforo (SOUZA et al., 2007; PELUCO et al., 2015).

Alguns estudos relataram maior associação entre altos teores de Gt com o aumento da CMAP do que com a Hm, mas quando comparados aos óxidos de alumínio, os minerais férricos não possuem tanta influência na fixação do fósforo (VILAR et al., 2010; LEMOS et al., 2022; FERNANDÉZ et al., 2008).

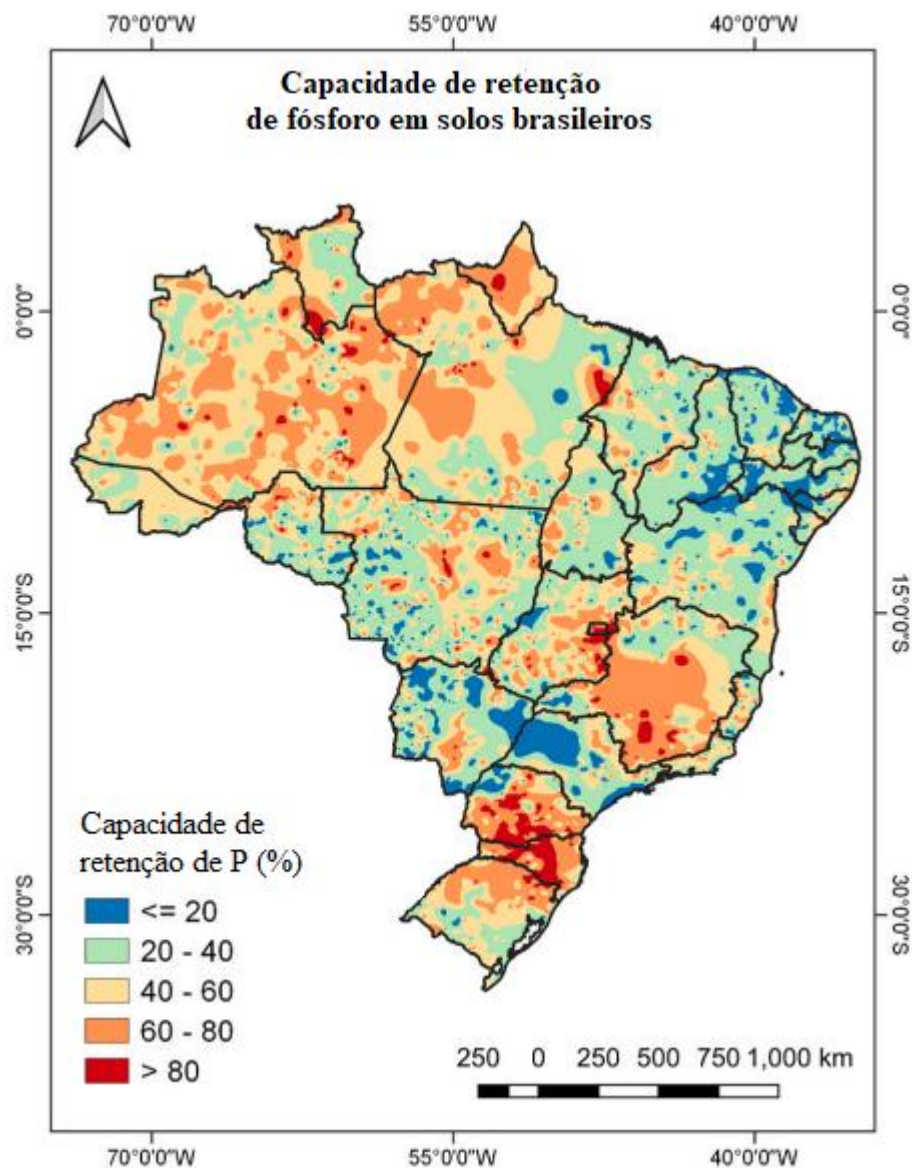
Uma das explicações para isso seria uma maior estabilidade das formas de Al com energias de ligação mais fortes do que às do Fe, além do arranjo espacial e maior área superficial específica que os minerais de alumínio podem apresentar. Assim, a gibbsita é apontada como o principal mineral responsável pela formação de P não-lábil (FERNANDÉZ et al., 2008).

Dentro os filossilicatos da fração argila, a caulinita possui um papel secundário na adsorção de P por possuir menos sítios ativos, sendo até mesmo capaz de ocasionar a redução da capacidade de adsorção de P (CESSA et al., 2009; MOTTA et al., 2002).

2.2.2. Textura do solo

No Brasil, como há uma variedade de tipos de solos, a capacidade de fixação do fósforo varia principalmente em decorrência da textura do solo (BARBOSA et al., 2022). A região Sul do país é a que apresenta maior proporção de solos com alta capacidade de fixação (Figura 3), já que predominam nessa região solos originados do basalto apresentando altos teores de argila com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) capazes de fixarem o P (Latosolos, Nitossolos e Cambissolos) (VALLADARES et al. 2010; PAVINATO et al. 2021).

Figura 3-Mapa nacional da capacidade de retenção de fósforo por solos no Brasil



Fonte: Adaptado de BARBOSA et al. 2022.

Já na região Nordeste a taxa de fixação de fósforo é menor (Figura 3) em virtude da textura arenosa. Apesar do fósforo apresentar baixa movimentação no solo, sua perda por lixiviação ou erosão em solos arenosos torna-se mais frequente do que o processo de fixação, devido a facilidade com que a água pode percolar o solo, já que os mesmos apresentam alta porosidade, removendo assim, as partículas que contêm o P (INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO, 1978). Assim, pode-se dizer que os solos que contêm maior fração arenosa não possuem “força” suficiente para reterem o fósforo (BARBOSA et al., 2022).

Nas outras regiões do país a fixação do fósforo possui valores intermediários: de médio a alto nas regiões Sudeste e Norte, e de baixo a média fixação no Centro-Oeste (Figura 3). Uma possível explicação seria a quantidade e qualidade da fração argilosa além do nível de saturação por bases que varia de acordo com a pedogênese de cada solo (BARBOSA et al., 2022). Mas Lourenço (2020) destaca que nem sempre um alto teor de argila configura na capacidade máxima de adsorção, pois a qualidade e o tipo de argila também interferem nesse fator.

De acordo com o grau de intemperização, a rocha que deu origem ao solo, as condições de drenagem, o valor do pH e outros fatores, a quantidade dos principais minerais presentes na fração argila que participam da fixação do fósforo, como hematita, gibbissita, goethita, caulinita, irá variar de solo para solo (BARBOSA et al., 2022). Igualmente, o tamanho dos seus minerais terá relevância no processo de fixação, pois as argilas silicatadas do tipo 1:1 possuem menor capacidade de adsorção do P em decorrência da sua pequena área superficial específica do que as 2:1 (LEMOS et al. 2022). A correlação positiva entre o teor de argila e a capacidade máxima de fósforo encontrada por Ranno et al. (2007 apud CORRÊA et al., 2011) demonstra justamente a dependência que os solos propensos a fixação tem dos constituintes da fração argila.

O fato de que a argila possui um papel mais significativa na estimativa da capacidade de fixação de P do que a areia pode ser exemplificado pelo estudo feito por Thomazi et al., (1990), onde os solos analisados no município de Piracicaba (São Paulo) apresentaram correlação negativa entre a areia e a quantidade de P fixada, enquanto que para a argila essa relação foi positiva. Conjuntamente, tal afirmação vai ao encontro dos resultados encontrados por Peluco et al. (2015) que ao avaliar diferentes Latossolos da região de São Paulo, observou que os solos mais argilosos possuíam maiores taxas de adsorção de P.

2.2.3. Matéria orgânica

Apesar de ter, mesmo que temporariamente, uma parcela na participação na retenção do fósforo para o funcionamento do seu metabolismo, a matéria orgânica (MO) possui moléculas de ácidos húmicos e outros ânions orgânicos, e uma grande quantidade de grupos carboxílicos

(-COOH) que ocupam os sítios de adsorção das argilas, dos óxidos de ferro e alumínio no lugar do fósforo (PAVINATO, 2007). Dessa forma, geralmente os maiores teores de P-lábil são encontrados nos horizontes mais superficiais, justamente onde há um predomínio da MO (LEMOS et al., 2022).

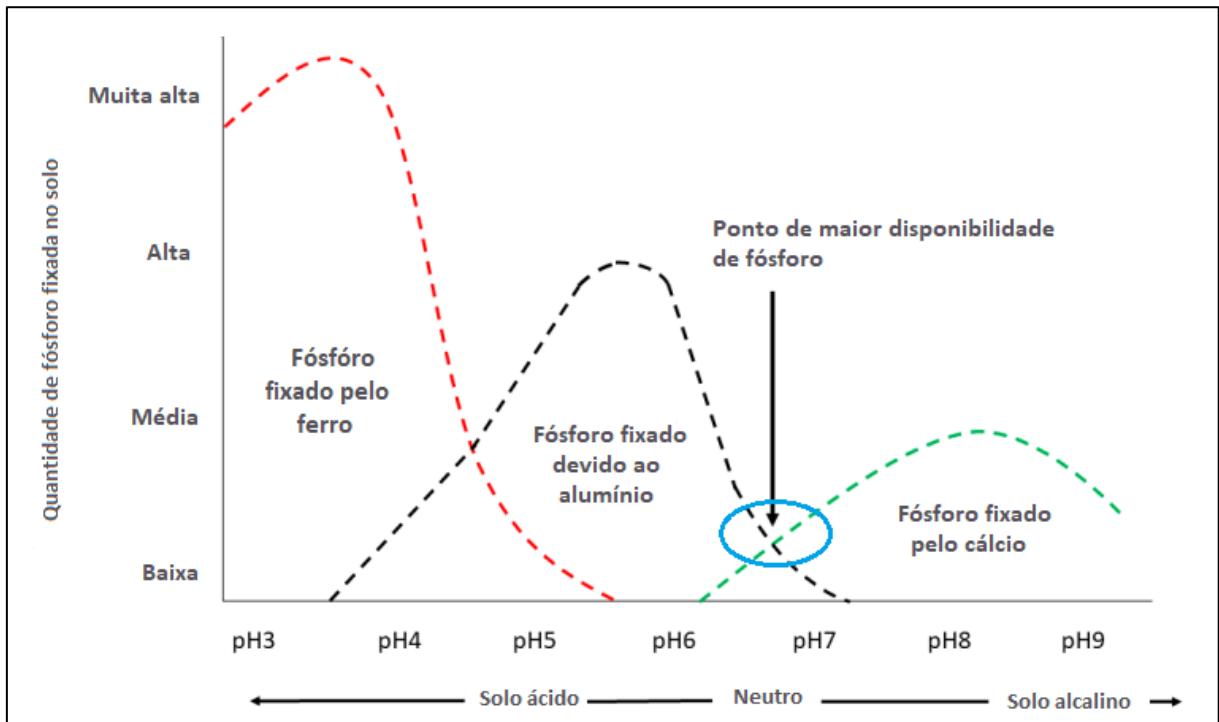
Moura et al. (2015) evidenciou essa afirmação ao avaliar a adsorção de P em um Latossolo Vermelho Distrófico sob vegetação de Cerrado por meio da isoterma de Langmuir. Os resultados do estudo demonstraram que mesmo a matéria orgânica competindo pela adsorção do fosfato, ainda havia uma quantidade considerável de fósforo disponível na camada superficial do solo analisado (0-20 cm) em comparação a camada inferior (20-40 cm).

Do mesmo modo, Souza et al. (2007) verificaram um aumento na quantidade de P disponível para as plantas a partir da adubação orgânica de solos do tipo Latossolo e Neossolo, presentes no estado de Minas Gerais. Entretanto, eles constataram que a medida em que o índice de matéria orgânica aumenta, o nível de fósforo disponível no solo diminui, pois ele passa a ser fixado por compostos húmicos presentes na MO. Tendo em vista o caráter aniônico da matéria orgânica, essa fixação se torna possível por uma ligação do tipo pontes de cátions, onde cátions polivalentes formam uma ponte entre superfícies com excesso de cargas negativas, principalmente em ambientes alcalinos (PILLON et al., 2002).

2.2.4. pH do solo

O pH do solo é uma das variáveis que também influencia a disponibilidade de fósforo na solução, sendo que suas formas mais solúveis ocorrem em ambientes mais neutros, com pH variando entre 6,5 -7,0 (Figura 4) (PENN E CAMBERATO, 2019). Isso se deve pelo fato de solos ácidos apresentarem quantidades maiores de óxidos de ferro e alumínio, os quais interagem facilmente com o fósforo em virtude dos seus sítios de adsorção. Já nos solos alcalinos, é a presença do carbonato de cálcio e magnésio que pode reduzir a disponibilidade de fósforo (YANG et al. 2021).

Figura 4 -Representação geral da disponibilidade de fósforo conforme pH



Fonte: Adaptado de PENN E CAMBERATO, 2019.

Boa parte dos solos do Brasil possuem caráter ácido (pH – 5,6) em virtude do alto grau de intemperismo e da lixiviação por bases (BARBOSA et al., 2022). Como forma de reverter a falta de nutrientes em solos intemperizados causada pelos baixos valores de pH do solo, a técnica da calagem é utilizada em várias culturas para corrigir a acidez. Com essa técnica é possível aumentar a decomposição de matéria orgânica e precipitar o ferro e o alumínio, o que corrobora para diminuir a fixação do fósforo. Além do mais, com a calagem e o aumento do pH, as cargas superficiais das partículas do solo tornam-se mais negativas, gerando menos atração entre o P e seus adsorventes (MOTTA et al., 2002; NOVAIS, et al., 2007; SOUZA et al 2007; PINTO et al., 2013).

Mas a fixação de fósforo em solos alcalinos também pode ocorrer, sendo derivada da interação do fósforo com o cálcio, que de acordo com Mello et al. (1979) pode formar fosfatos de cálcio insolúveis, precipitar sobre as partículas de carbonato de cálcio ou ficar retido nas argilas saturadas com cálcio. E de acordo com Souza et al. (2007, p.1539) “com o aumento do pH ocorre diminuição da forma $H_2PO_4^-$ (di-hidrogenofosfato) em relação a HPO_4^{2-} (hidrogenofosfato), sendo essa principal fonte de absorção de P pelas plantas”. Assim, como muitos processos ocorrem no solo simultaneamente, tornando a sua bioquímica complexa, prever o efeito do pH na dinâmica do solo pode ser uma tarefa difícil (HALLAMA et al. 2018).

3. OBJETIVO GERAL

Fazer um levantamento de trabalhos sobre o comportamento do fósforo no solo e métodos usados para sua disponibilidade.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

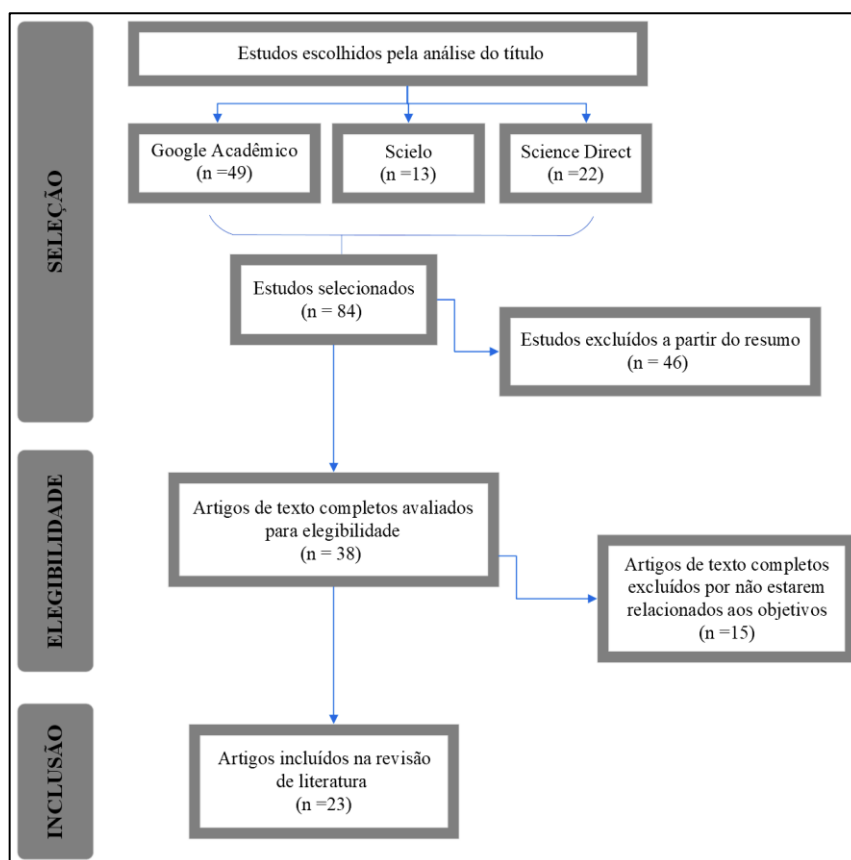
- Reunir informações acerca do fósforo e as características do solo que contribuem para a sua fixação a fim de compreender como ocorre esse processo;
- Identificar estratégias de manejo que tornam o fósforo disponível principalmente pela técnica de reversão/liberação ou técnicas que reduzam a sua perda para o solo.

4. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo deste trabalho foi realizada uma revisão de literatura narrativa, utilizando-se as bases de dados Google Acadêmico, Scielo e Science Direct. Na busca pelo material foram utilizadas as seguintes palavras chaves: *desorption of phosphate*, *desorption of phosphorus*, *phosphorus availability*, combinados com *soil*, *soil mineral particles*, *advances or technologies*. Foram incluídos artigos entre os anos 2013 e 2023, nos idiomas em inglês e português.

Como critério de seleção das publicações, foi avaliado inicialmente o título, sendo assim selecionados 84 trabalhos. Em seguida, foram excluídos os artigos que não tinham como assunto principal técnicas de disponibilização do P fixado no solo ou o seu uso eficiente a partir da leitura do seu resumo e os que não possuíam texto completo disponível online. Assim, foram consideradas apenas 23 publicações para esta revisão de literatura.

Figura 5 - Fluxograma representativo da exclusão e inclusão dos artigos neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 resume as estratégias encontradas na revisão de literatura para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e conseqüentemente reduzir o uso de fertilizantes fosfatados. Cada método apresenta suas vantagens, mas também limitações que podem ser resolvidas com estudos futuros para aprimoramento das técnicas. Além disso, as condições do solo e o tipo de agricultura irão determinar qual a melhor estratégia a ser utilizada. Nos itens a seguir, serão discutidos de forma mais aprofundada os principais tópicos encontrados na revisão de literatura.

Quadro 1 - Comparativo entre as estratégias de manejo encontradas na literatura revisada

Estratégia de manejo	Definição	Pontos positivos	Pontos negativos
Biochar ou biocarvão	Material originado a partir da conversão termodinâmica da biomassa, sendo capaz de alterar as propriedades físicas e químicas do solo.	Altera o pH do solo, atuando como corretivo; compete pelo sítio de adsorção do P deixando-o livre para ser absorvido pelas plantas; estabiliza a matéria orgânica; favorece a proliferação de fungos e bactérias benéficos para o solo.	Viabilidade econômica da produção e aplicação.
Biofertilizantes	Produtos que contêm microrganismos capazes de aumentar a concentração de nutrientes naturais do solo, dentre eles o fósforo.	Reduzem o pH da rizosfera; solubilizam o fósforo natural, competem pelo sítio de adsorção do P; formam complexos solúveis com compostos metálicos insolúveis de P.	Prazo de validade curto, sensibilidade a altas temperaturas, dificuldades com armazenamento e transporte.
Administração de Nutrientes 4C	Método teórico que auxilia os agricultores a utilizarem a fonte certa de fertilizantes no lugar, quantidade, e tempo certos.	Evita o uso excessivo de fertilizantes e promove maior absorção dos nutrientes pelas plantas.	-
Reuso do fósforo	Reutilizar o fósforo recuperado dos efluentes sanitários por meio de processos químicos, físicos ou biológicos.	O reuso do P recuperado dos efluentes sanitários como fertilizante pode satisfazer até 20 % da demanda mundial por fósforo, além de também servir como neutralizante de solos ácidos.	Custos elevados para operação, altos volumes de lodo, e complexidade das operações.

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

5.1. O “Legado” do fósforo

A aplicação constante e excessiva de fertilizantes inorgânicos sem levar em consideração o provimento de fósforo das fontes naturais do solo, resulta numa

superacumulação de P que se torna uma fonte secundária desse nutriente com potencial para substituir os fertilizantes, caso seja possível a sua reversão para formas lábeis prontamente disponíveis para a absorção das plantas (ROWE et al., 2015).

Esse fósforo acumulado devido à alta capacidade de fixação dos solos e a baixa eficiência dos fertilizantes, é conhecido pela literatura como “P residual” ou “Legado do P”, e definido como o fósforo adicionado ao solo por fertilizantes e adubos, menos a quantidade de P removida pela cultura, erosão e lixiviação (KARAMESOUTI E GASPARATOS, 2017). Além disso, o legado do fósforo é reconhecido como a principal causador da eutrofização nos ambientes aquáticos por ser uma fonte de P solúvel (ROWE et al., 2015).

De acordo com ZHU et al. (2018), se a quantidade de fósforo acumulado pela agricultura estivesse disponível, seria possível sustentar as plantações em todo o mundo por 100 anos. Mas como a maior parte do legado do fósforo não está livre para ser absorvido pelas plantas e sim fixado, é necessário manipulações no solo para aumentar a sua disponibilidade que podem ser complexas, tendo em vista que a sua disponibilidade depende de vários fatores, desde o tipo de solo às condições socioeconômicas necessárias para mudar o tipo de manejo do solo (ROWE et al., 2015).

Vários estudos demonstraram que é possível reverter esse fósforo acumulado (ROWE et al., 2015; ZHU et al., 2018; HOSSAIN et al., 2020; MENDES et al., 2022). porém é fundamental ter informação e abordagens diferentes que sejam viáveis para lidar com as características de cada tipo de solo que contribuem para a fixação do P, e assim não só manter a qualidade do solo, mas ter uma agricultura precisa e sustentável (FAUCON et al., 2015; KARAMESOUTI e GASPARATOS, 2017).

5.2. Biochar ou biocarvão

O biochar ou biocarvão é um material originado a partir de conversão termodinâmica de biomassa em um ambiente sem a presença de oxigênio e com altas temperaturas (JÚNIOR et al., 2022). A sua aplicação no solo contribui para o aumento da produtividade agrícola, pois influencia na disponibilidade de nutrientes ao alterar as propriedades físicas e químicas do solo (HASSAIN et al., 2020).

Tendo em vista as suas características, o biochar (BC) é comumente relacionado com os solos da Amazônia denominados “terra preta”: ricos em matéria orgânica, nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), carbono (C), e por possuir alta capacidade de troca catiônica. Esse tipo de solo foi formado através de anos de deposição de material orgânico

(restos de animais e vegetais) queimados por civilizações passadas (HASSAIN et al., 2020; JÚNIOR et al., 2022).

Do mesmo modo, o biocarvão pode ser feito a partir da queima de qualquer material orgânico, que juntamente com o tipo do processo da sua formação, que inclui o tempo e a temperatura, irão influenciar na qualidade e propriedades do BC (TRAZZI et al., 2016). No entanto, o biochar derivado dos resíduos de animais e plantas é o que apresenta resposta mais positiva no tratamento do solo (GLASES e LEHR, 2019).

Dentre as principais funções do biochar no solo, a que mais se destaca é a sua capacidade em atuar como corretivo, alterando o pH. Ele atua de maneira diferente quando aplicado em solos ácidos e alcalinos, já que nestes o BC aumenta a concentração de bases que passam a interagir negativamente com o fósforo deixando-o indisponível (GAO et al., 2019).

Já nos solos ácidos o BC promove o aumento do pH, em virtude da quantidade de bases trocáveis presentes em sua superfície e a sorção de H^+ , diminuindo a sua concentração no meio. Assim, com a desprotonação da superfície dos minerais de carga variável como os óxidos de ferro, é possível ter um aumento da disponibilidade de P no solo (GUEDES et al., 2021).

Além disso, a matéria orgânica presente no biochar bloqueia os sítios de adsorção do ferro e alumínio em ambientes ácidos pela liberação de ácidos orgânicos, impedindo a fixação do fósforo no solo. Desta forma, mesmo em ambientes com altos teores de ferro, é possível observar a dessorção do P com a aplicação do biochar (GUEDES et al., 2021).

O biocarvão também interfere na capacidade do solo em reter água e estabiliza a matéria orgânica principalmente nos solos arenosos, em razão da atuação de grupos funcionais hidrofílicos que possuem afinidade com a água e estão presentes nos poros do BC. As propriedades biológicas do solo também são alteradas, por exemplo a respiração e a atividade biológica, além do fato da porosidade do biochar se tornar um habitat favorável para fungos e bactérias do solo (HASSAIN et al., 2020).

A pirólise é o processo mais comum responsável pela formação do biochar e pode ocorrer de maneira rápida e lenta, com temperaturas altas ou baixas que irão interferir na estrutura e função do biochar, principalmente no tamanho da sua área superficial que favorecerá a retenção de nutrientes para as plantas, bem como irá fornecer os nutrientes que estão escassos no solo (GAL et al., 2019; GUEDES et al., 2021, JÚNIOR et al., 2022).

Diversos trabalhos já comprovaram o aumento da quantidade de fósforo disponível no solo com a aplicação de BC não apenas tornando-o disponível, mas também sendo fonte desse nutriente já que dependendo do material de origem, o P pode estar presente na composição do biochar (GAO et al., 2019; GUEDES et al., 2021). De acordo com Hassan et al. (2020), o

biochar produzido a partir do adubo e lodo de esgoto resulta em um BC rico em nutrientes como N e P, mais do que aquele derivado de madeira ou palha.

Mas nem todo solo irá apresentar um aumento na disponibilidade do P a partir da aplicação do biochar. Tudo depende das características do solo e do tipo de biochar utilizado (TRAZZI et al., 2016). Hassan et al. (2020) exemplifica que solos de regiões arenosas e de textura franco arenosa não alteraram os seus teores de fósforo livre com a adição de biochar. Além do mais, BC modificados ou fortificados podem até mesmo aumentar a capacidade do solo em reter o fósforo.

Além disso, apesar do uso potencial do biochar para disponibilizar o fósforo e outros nutrientes, há que se levar em consideração a viabilidade econômica da aplicação do biochar em diferentes cenários, que irá depender dos custos da produção do plantio, material de origem e o método de aplicação (JÚNIOR et al., 2022).

5.3. Biofertilizantes

Uma das alternativas para o uso de fertilizantes minerais, e assim minimização dos seus impactos, é a aplicação de biofertilizantes contendo microrganismo que aumentam a concentração de nutrientes naturais do solo, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn), promovendo assim, o crescimento e desenvolvimento das plantas (OSORNO et al., 2018).

Na agricultura, já é reconhecido o papel fundamental dos microrganismos na dinâmica do solo, principalmente quando se trata do fósforo, tanto que há um esforço para incluí-los nos modelos de ciclo do P (HALLAMA et al., 2018). Os microrganismos são capazes de solubilizar as rochas fosfáticas, aumentar o fluxo de fósforo na matéria orgânica, solubilizar o fósforo inorgânico e mineralizar o fósforo orgânico (MENDES et al., 2022).

Porém, dependendo da temperatura do solo, seu pH, salinidade, as causas de insolubilidade de fósforo, a energia de ligação e a escolha da cepa do microrganismo utilizado, cada planta pode responder de maneira diferente a aplicação do biofertilizante (SHERMA et al., 2013).

Diferentes estudos comprovaram a existência de diversos gêneros de bactérias e fungos que possuem potencial para serem utilizados como biofertilizantes já que beneficiam as plantas, dentre eles as bactérias solubilizadoras pertencentes ao gênero *Bacillus* e *Pseudomonas* e os fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* (MENDES et al., 2022, SHERMA et al., 2013; PRABHU et al., 2019).

Os principais mecanismos utilizados pelos microrganismos solubilizadores de P são a produção de ácidos orgânicos, solubilização de fósforo orgânico, e mineralização de fosfato (MACIK et al., 2020).

Os ânions orgânicos são produtos de metabolismo microbiano que contribuem para a redução do pH da rizosfera, competem pelo sítio de adsorção do P, solubilizam o fósforo natural ou adicionado ao solo, além de serem considerados agente quelantes, formando complexos solúveis com compostos metálicos insolúveis de fósforo (Ca-P, Al-P, Fe-P) (WANG e LAMBERS, 2019; MACIK et al., 2020, OSORNO et al., 2018).

Vale ressaltar que os ânions orgânicos exercem uma influência mínima na acidificação da rizosfera, já que esta depende do balanço da absorção de cátions e ânions pela raiz, e do quanto de OH^- e H^+ é excretado por ela (WANG e LAMBERS, 2019).

A solubilização do fósforo orgânico é outro processo importante envolvendo os organismos solubilizadores para disponibilização do fósforo. Como as plantas não conseguem absorver fontes de P diretamente do solo, enzimas fosfatases são liberadas por processos bioquímicos dos microrganismos, convertendo o fósforo orgânico para a sua forma inorgânica, sendo esta preferencialmente absorvida pelas plantas (MENDES et al. 2022).

De acordo com Sherma et al. (2013, p.3) “no solo, as bactérias solubilizadoras correspondem a 1-50% e fungos 0,1-0,5% do total de suas respectivas populações”, mas os fungos são os que possuem maior aptidão e importância quando se trata da solubilização do fósforo, já que produzem mais ácidos orgânicos do que as bactérias, tornando-se mais eficientes. Eles também podem modificar a arquitetura das raízes das plantas e aumentar a sua extensão (HALLAMA et al., 2018). O impacto positivo de biofertilizantes com microrganismos solubilizadores de P já foi confirmado em várias culturas, como milho, alface, cana de açúcar e trigo (MACIK et al., 2020).

Diferente dos microrganismos solubilizadores, os mobilizadores de fosfato aumentam a absorção de fósforo pelas plantas imobilizando os compostos de P no solo ao invés de solubilizá-los. Isso ocorre por meio da associação simbiótica de fungos com as raízes das plantas, fazendo com que a planta absorva mais nutrientes por meio da colonização da raiz (MACIK et al., 2020).

Os biofertilizantes podem ser aplicados nas sementes, ou diretamente no solo, sendo que cada técnica possui suas vantagens e desvantagens. O tratamento de sementes é a prática mais comum de aplicação devido a simplicidade e a baixa quantidade de produto necessário para o processo. Já para ser aplicado diretamente no solo, é preciso um tratamento prévio para evitar

a perda do inoculante, além de uma quantidade maior de biofertilizante e equipamentos especializados para aplicação, tendo um custo financeiro elevado (MACIK et al., 2020).

Apesar dos seus benefícios, os biofertilizantes possuem limitações que os tornam menos competitivos no mercado, como prazo de validade curto, sensibilidade a altas temperaturas, e dificuldades com armazenamento e transporte. Além do mais, as condições do solo e o tipo de inoculante utilizado interferem na sua eficácia, e os resultados da sua ação são percebidos apenas após o seu uso prolongado (MACIK et al., 2020).

Tendo em vista a complexidade da interação das plantas e dos microrganismos, sendo controlada por diversos fatores e assim apresentando resultados diferentes em solos com características diferentes, a exploração dos processos microbianos é fundamental para facilitar a disponibilização do fósforo (MENDES et al. 2022). Além do mais, a produção dos biofertilizantes com parâmetros de qualidade e técnicas que facilitem o manejo, estoque e transporte, são fundamentais para a aceitação do uso destes pela comunidade agrícola (SHERMA et al., 2013).

5.4. Uso eficiente dos fertilizantes e reuso do fósforo

A rocha fosfatada é o principal reservatório de fósforo na natureza e um recurso natural não renovável, que já apresenta um grau de preocupação quanto a durabilidade da sua reserva e a qualidade do P extraído, devido ao aumento da demanda por fertilizantes para serem utilizados na agricultura (RIBEIRO et al., 2017).

O fósforo é um nutriente essencial para as plantas, tendo um papel importante na produção de alimentos, mas sua presença no solo na forma solúvel de íons fosfatos para serem absorvidos é limitada, porque a dinâmica do solo contribui para a fixação do P e sua consequente transformação para formas menos solúveis ou totalmente insolúveis. Assim, a necessidade do uso de fertilizantes fosfatados é justificável no setor agrícola. Mas os fertilizantes acabam sendo utilizados de forma errônea e em grande quantidade, fazendo com que grande parte do P aplicado seja rapidamente fixada, permaneça nos solos ou seja arrastado para as águas superficiais (KARAMESOUTI e GASPARATOS, 2017; RIBEIRO et al., 2017).

A alta concentração de nutrientes, especialmente em N e P, nas águas doces superficiais resultam no processo de eutrofização, onde ocorre proliferação de algas que liberam cianotoxinas e bloqueiam a radiação solar, podendo inviabilizar o uso da água, causar a mortalidade de peixes e reduzir a diversidade de espécies. O excesso de nutrientes geralmente são consequências do descarte de esgotos domésticos e industriais não tratados ou tratados de

forma inadequada, e do escoamento de áreas de cultivos para rios e lagos (SASABUCHI et al., 2022).

Tendo em vista a diminuição do teor de fósforo nas rochas fosfáticas utilizadas na fabricação de fertilizantes minerais que contribui para o encarecimento do produto, e o efeito negativo que o excesso de fertilizantes pode causar nos recursos hídricos, esforços estão sendo feitos para aumentar a eficiência dos fertilizantes e a disponibilidade de P nas áreas de cultivos. Dentre eles temos a abordagem da Administração de Nutrientes 4C, que incentiva os produtores a se questionarem se estão utilizando a fonte certa de fertilizante ou produto, na dosagem certa, na hora certa e no local certo (KARAMESOUTI e GASPARATOS, 2017).

A escolha da fonte certa nem sempre é simples, pois as características particulares do solo e do fertilizante irão influenciar na decisão. Em solos alcalinos e neutros, a redução do pH perto dos grânulos do fertilizante com a co-aplicação de sais de amônia podem aumentar a solubilidade e efetividade dos fertilizantes fosfatados. Por outro lado, em solos ácidos a utilização de compostos sílicos podem romper as ligações do P com os óxidos de Al e Fe, liberando-o para a solução (ROBERTS e JOHNSTON, 2015; KARAMESOUTI e GASPARATOS, 2017).

Já para o estabelecimento da dosagem certa é essencial compreender a demanda da planta pelo nutriente e a sua capacidade em absorvê-lo, podendo ser observados com testes de solo ou da planta em laboratórios, ou fazendo uso de parcelas de omissão fornecendo uma estimativa indireta da capacidade do solo em fornecer P (ROBERTS e JOHNSTON, 2015).

Os fertilizantes que apresentam características de liberação lenta de nutrientes buscam igualmente melhorar a eficiência da nutrição da planta e reduzir a quantidade de insumo utilizado, evitando assim o excesso de P e minimizando a eutrofização dos corpos d'água (PANTANO et al., 2016).

As condições climáticas e a drenagem do solo afetam a capacidade de atuação dos fertilizantes. As secas podem limitar a difusão do P para a rizosfera, enquanto que em períodos chuvosos as chances de perda dos nutrientes por escoamento aumentam. O ciclo do crescimento da planta também interfere no momento oportuno para a aplicação dos fertilizantes, sendo que nos estágios iniciais a planta demanda mais nutrientes (KARAMESOUTI e GASPARATOS, 2017).

O lugar onde o fertilizante é aplicado pode ter um papel importante na absorção dos nutrientes. Aplicar próximo das raízes facilita o acesso das plantas a eles, especialmente quando se trata do fósforo que possui pouca mobilidade no solo. A aplicação nas sementes também favorece a eficiência do P mais do que se o fertilizante for aplicado na superfície. Porém as

condições do solo, do manejo e tipo da cultura, além de aplicações passadas, influenciam o local da aplicação do fertilizante (ROBERTS e JOHNSTON, 2015).

Tecnologias para reduzir os desafios atrelados ao P também estão sendo estudadas e aprimoradas, dentre elas a recuperação e reuso do P em efluentes sanitários (SASABUCHI et al., 2022). Ribeiro et al. (2017) explica que a reciclagem do fósforo se baseia na economia circular para um uso mais eficiente dos recursos e fornece para a sociedade benefícios intangíveis, como a melhoria da segurança hídrica e alimentar.

O resíduo semi-sólido (lodo de esgoto) produzido nas estações de tratamento contém matéria orgânica e nutrientes como o nitrogênio e fósforo, além de outros elementos químicos e biológicos, a exemplo de metais e microrganismos patogênicos que podem contaminar o solo caso o lodo de esgoto seja aplicado no solo diretamente (PANTANO et al., 2016). Mas por meio de alguns processos é possível recuperar o P para que ele seja reutilizado corretamente no setor agrícola (SASABUCHI et al., 2022).

Esses processos podem ser de natureza química, biológica ou física, mas que ainda apresentando desvantagens, como custos elevados, altos volumes de lodo e complexidade das operações. A utilização do mecanismo de Remoção Biológica Melhorada de Fósforo é uma das soluções mais comum no tratamento de efluentes domésticos, baseando-se na assimilação do fósforo total dissolvido por bactérias acumuladoras de fósforo. Devido as características do biossólido gerado como produto final, ele pode ser facilmente utilizado como fertilizante (FRITZEN e BENETTI, 2019).

Outra forma de recuperar e reutilizar o fósforo é a partir da precipitação do mesmo com cálcio e magnésio pelo mecanismo de cristalização, formando os compostos hidroxiapatita e estruvita, respectivamente. Essa técnica possui boa eficiência e baixos riscos ambientais, mas necessita de condições específicas para acontecerem, principalmente relacionadas ao pH. A utilização de sais de Fe e Al também é possível, porém a reutilização do P neste caso é mais difícil, pois os sais de fosfato formado não ficam disponíveis para as plantas em condições normais de pH, sendo assim considerado resíduo sólido (FRITZEN e BENETTI, 2019; MARONEZE e al., 2017).

A adsorção do fósforo a um sólido pode possuir mais de 90 % de eficiência na remoção do nutriente das águas residuárias e lodos, até mesmo em efluentes com baixo nível de fosfato. Os compostos gerados podem ser uma alternativa para os fertilizantes minerais e serem utilizados até mesmo como neutralizantes de solos ácidos (FRITZEN e BENETTI, 2019).

Para essa tecnologia, o ideal seria o uso de adsorventes de baixo custo, como os derivados de resíduos ou subprodutos agrícolas (RSA), a exemplo, casca de ovo, de arroz e

resíduos de suco de fruta. Mas infelizmente os RSA ainda apresentam baixa capacidade de adsorção em comparação com adsorventes convencionais, sendo necessário modificações para melhoramento das suas habilidades por meio de transformações termais (MARONEZE e al., 2017).

A reutilização de nutrientes, em especial do fósforo, é fundamental para garantir sustentabilidade no seu uso e prevenir problemas ambientais (PANTANO et al., 2016) De acordo com Fritzen e Benetti (2019) a recuperação do fósforo presente nas águas residuárias podem satisfazer de 15% a 20% da demanda mundial, mas o desenvolvimento de tecnologias para a efetividade desse processo ainda é necessário para vencer os desafios e dificuldades relacionados a ele.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fósforo é um nutriente imprescindível tanto para as plantas como para os animais, sendo, portanto, um elemento insubstituível. Porém ter acesso a ele pode ser uma tarefa difícil, já que diferente de outros elementos, a sua ciclagem no ecossistema é considerada longa, sendo necessária a interferência humana com o uso de fertilizantes fosfatados para provimento desse nutriente as plantas.

A utilização dos fertilizantes é justificada, já que a deficiência do P nos solos é grande, em virtude de determinadas características, como mineralogia, grau de desenvolvimento do solo, pH, textura, que contribuem para a fixação do elemento na fase sólida, reduzindo a sua disponibilidade para as plantas.

Porém a demanda da produção agrícola e a baixa eficiência dos fertilizantes tem levado a aplicações exageradas podendo causar problemas ambientais como a eutrofização. Mais do que isso, as altas dosagens de P contribuem para a criação de um estoque do mesmo no solo, mas em formas insolúveis, que poderiam sustentar as plantações no mundo inteiro por 100 anos, caso fossem convertidas para formas lábeis do fósforo.

Com esta revisão de literatura, foi possível demonstrar que é possível não só reverter e minimizar a fixação do fósforo no solo, mas também tornar eficiente o seu uso. O uso do biocarvão aumenta a disponibilidade de nutrientes e a produtividade agrícola principalmente em solos ácidos, pois atua como corretivo do pH do solo. Além disso, os seus componentes competem pelos sítios de adsorção do fósforo, tornando-o disponível para a solução, e também são fontes de P para o solo.

A utilização de biofertilizantes contendo bactérias e fungos capazes de solubilizarem os compostos naturais ou adicionados que tem em sua composição o fósforo, e também desafixar o P das superfícies dos minerais, pode ajudar a reduzir o uso de fertilizantes naturais.

Saber utilizar os fertilizantes, levando em consideração as suas propriedades e os atributos do solo, é fundamental para garantir a eficácia e diminuir as perdas dos nutrientes.

Além disso a exploração de fontes alternativas de fósforo que sejam eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis, pode ter um significado importante para a segurança alimentar global e ambiental, como por exemplo a recuperação e reuso do fósforo proveniente de águas residuárias das estações de tratamento de esgoto.

Apesar das possibilidades ainda existem muitos desafios, pois o manejo do P no solo não é algo simples, tendo em vista que não existirá uma solução apenas que torne o fósforo disponível em todos os solos. Cada solo possui suas características com diversas reações acontecendo ao mesmo tempo. Mesmo a mineralogia, as forças de ligações e o pH sendo os

principais controladores da reversibilidade do P fixado, ainda assim esse processo se torna complexo, pois cada solo pode reagir de modo diferente a determinado manejo.

Sendo assim, os estudos voltados para o aprimoramento e novas técnicas de reversibilidade do fósforo e seu uso eficiente, precisam ser incentivados para não só manter esse recurso disponível, mas caminhar para a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. L.; VELLOSO, A. C. Fixação de fósforo em solos do estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.17, n.7, p.1023-1029, 1982.
- ALOVISI, A. M. T. et al. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, 7p. 2020.
- BARBOSA, J. Z. et al. National-scale spatial variations of soil phosphorus retention capacity in Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.128, 2022.
- BARROS, J. F. C. Fertilidade do solo e nutrição das plantas. 2020. Texto de apoio para as Unidades Curriculares de Sistemas e Tecnologias Agropecuárias e Noções Básicas de Agricultura. **Escola de Ciências e Tecnologia Departamento de Fitotecnia – Universidade de Évora**, Portugal, 2020.
- CESSA, R. M. A. et al. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em solos Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p. 1153-1162, 2009.
- CORRÊA, R. M. et al. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33 n.1, p. 153-159, 2011.
- FAUCON, MP. et al. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. **Advances in Agronomy**, v.134, p.51-79, 2015.
- FERNÁNDEZ, I. E. et al. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II – Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 2319-2330, 2008.
- FRITZEN, R. R. & BENETTI, A. D. Tecnologias de remoção e recuperação de fósforo. **II Congresso de Água, Ambiente y Energía**, 2019.
- GAO, S. et al. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis. **Science of the Total Environment**, n.654, p.463-472, 2019.
- GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2003.
- GLASER, B. & LEHR, V-I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis. **Scientific Reports**, v.9, 2019.
- GUEDES, R. S. et al. Biochar and conventional compost reduce hysteresis and increase phosphorus desorbability in iron mining waste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, 2021.
- HALLAMA, M. et al. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, n.434, p.7-45, 2019.

- HORTA, C. & DUARTE, A. C (2021). **Sustentabilidade da fertilização fosfatada: fontes alternativas de fósforo como fertilizantes agrícolas**. Curitiba, Brasil. Editora ARTEMIS. 14p. 2021.
- HORTA, M. C. & TORRENT, J. **Dinâmica do fósforo no solo, perspectiva agrônômica e ambiental**. Castelo Branco, Portugal. Edições IPCD. 97p, 2010.
- HOSSAIN, M. Z. et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. **Biochar**, v.2, p.379-420, 2020.
- INSITUTO DA POTASSA & FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2 ed. Piracicaba: Potafos, 1998.
- JÚNIOR, C. D. C. et al. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e futuras pesquisas. **Research, Society and Development**, v.11, n.2, 2022.
- KARAMESOUTI, M. & GASPARATOS, D. Sustainable management of soil phosphorus in a changing world. **Adaptive Soil Management: From Theory to Practices**, 2017.
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Rio Grande do Sul, v.8, n.8, p.1713-1721, 2012.
- LEMOS, J. O. et al. Phosphorus fractions in soils with distinct mineralogy and their relationship with phosphate buffer capacity indicators in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.44, 2022.
- LOURENÇO, M. **Avaliação da capacidade máxima de adsorção de fósforo na fração argila de latossolos da região do Triângulo Mineiro**. 2020. 52 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, Paraná, 2020.
- MACIK, M. et al. Biofertilizers in agriculture: an overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. **Advances in Agronomy**, v.162, p.31-87, 2020.
- MARONEZE, M. M. et al. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente & Água**, v.9, n.3, 2014.
- MELLO, F. A. F. *et al.* Fixação de fósforo por um Latossolo Vermelho Escuro-Orto. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo**, São Paulo, v.36, p. 53-66, 1979.
- MENDES, W. D. et al. Efeito de bactérias solubilizadoras de fósforo na cultura da soja no Brasil revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v.11, n. 16, 2022.
- MENDES, W. D. et al. Efeito de bactérias solubilizadoras de fósforo na cultura da soja no Brasil: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v.11, n.16, 2022.
- MOTTA, P. E. F. et al. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, p. 349-359, 2002.
- MOURA, J. B. et al. Adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho Distrófico sob vegetação de Cerrado em Rio Verde - GO. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**. V.4, n.3, p.199-208, 2015.
- NOVAIS, R. F. et al. Fósforo. In: **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007.

- OSORNO, L. et al. Phosphate desorption by a soil fungus in selected Hawaiian soils differing in their mineralogy. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v.95 n. 2, p. 154-166, 2018.
- PANTANO, G. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n.6, p.732-740, 2016.
- PAVINATO, P. S. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. 2007. 158 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Campus de Botucatu, São Paulo, 2007.
- PAVINATO, P. S. et al. Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. **Scientia Agricola**, v.78, n.6, 2021.
- PELUCO, R. G. et. al. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.3, p.259-266, 2015.
- PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v. 9, p.1-18, 2019.
- PEREIRA, D. S. et. al. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, São Paulo, v. 5, p. 1-4, 2021.
- PILLON, C. N. et. al. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. **Embrapa Clima Temperado – Documentos 105**. 2002.
- PINTO, F. A. et al. P-sorption and desorption in savanna brazillian soils as a support for phosphorus fertilizer management. *Ciência e Agrotecnologia*, v.37, n.6, p.521-530, 2013.
- PRABHU, N. et al. Phosphate solubilizations by microorganisms: overview, mechanisms, applications and advances. **Advances in Biological Science Research**, p.161-176, 2019.
- RIBEIRO, R. et al. Estratégia para recuperação de fósforo de águas residuais urbanas. **Revista Águas e Resíduos**, v.4, n.2, (2017).
- ROBERTS, T. L. & JOHNSTON, A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v.105, p.275-281, 2015.
- ROWE, H. et al. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.104, n.3, p.393-412, 2016.
- SASABUCH, I. T. M. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do Estado de São Paulo, Brasil. **Química Nova**, v.46, n.2 p.185-198, 2023.
- SHARMA, S. B. et al. Phosphate solubilizing microbes, sustainable approach for managing phosphorus deficiency agricultural soils. **SpringerPlus**, v.2, 2013.
- SHEN, J. et. al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, p. 997-1005, 2011.
- SOUZA, R. F. et. al. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 31, p. 1535-1544, 2007.

- THOMAZI, M. D. et. al. Fatores que contribuem para a fixação do fósforo em solos do município de Piracicabana. **Anais ESALQ**, Piracicaba, v.47, n.1, p.177-191, 1990.
- TIECHER, T. et al. Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v.435, 2023.
- TRAZZI, P. A. et al. Adsorption and desorption of phosphate on biochars. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, p. 37-46, 2016.
- VALLADARES, G. S. et. al. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p.111-118, 2003.
- VILAR, C. C. et. al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p. 1159-1168, 2010.
- VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v.8, n.2, p. 37-44, 2013.
- VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Mato Grosso, v.9, n.1, p.30-35, 2021.
- WANG, Y. & LAMBERS, H. Root-released organic anions in responses to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. **Plant and Soil**, n. 447, p.135-156, 2020.
- YANG, F. et al. Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances. **Science of the Total Environment**, v.768, 2021.
- ZHU, J. et al. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, v.612, p. 522-537, 2018.