

SUBMETIDO 26/04/2022

APROVADO 21/08/2022

PUBLICADO ON-LINE 26/09/2022

PUBLICADO 10/04/2024

EDITORA ASSOCIADA

Monaliza Mirella de Moraes Andrade Cordeiro

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id6836>

ARTIGO ORIGINAL

Fluxo difusivo de fosfato em solos do Seridó Paraibano

RESUMO: A difusão é o principal meio de transporte do fósforo (P) no solo e depende de vários fatores, como a interação do P com os componentes da fase sólida, a textura, a mineralogia da fração argila, a umidade, a compactação e a fonte fosfatada. Assim, dada a variação de solos no Seridó Paraibano, é de se esperar variação no fluxo difusivo de P. Objetiva-se com este estudo analisar o efeito de níveis de fósforo no fluxo difusivo de fosfato em solos representativos do Seridó Paraibano. Foram utilizadas amostras, coletadas na camada 0-20 cm de profundidade, de seis solos representativos. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em fatorial 6×5 , sendo seis solos e cinco níveis de P (0%, 10%, 20%, 30% e 40% da capacidade máxima de sorção de P). Para estimativa do fluxo difusivo de P, utilizou-se como unidades experimentais anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno, com volume de solo de 300 cm^3 , que receberam os solos e as doses em estudo e serviram como câmara de difusão. Para avaliação do fluxo difusivo de P nos solos, utilizou-se o papel de troca aniônica (PA), que permaneceu em contato com o solo por 15 dias. Após esse período, a quantidade de P retida no PA foi quantificada. Os níveis de P promoveram o aumento do fluxo difusivo do fosfato de forma linear, com exceção do Neossolo Flúvico, no qual não foi verificada resposta significativa. O maior fluxo de P foi verificado no Planossolo ($0,0753 \mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias), seguido pelo Neossolo Regolítico ($0,0510 \mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias). O Neossolo Flúvico foi o solo que apresentou menor fluxo difusivo ($0,0274 \mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias). Conclui-se que a aplicação de P aumentou o fluxo difusivo do fosfato e que o fluxo difusivo de P foi maior no Planossolo e menor no Neossolo Flúvico.

Palavras-chave: difusão; disponibilidade de fósforo; fósforo; semiárido; solo.

Diffusive phosphate flux in soils of Seridó Paraibano

ABSTRACT: Diffusion is the main means of transport of phosphorus (P) in soil and depends on several factors, such as P interaction with the solid-phase components, texture mineralogy of the clay source, moisture, compaction and phosphate source. Thus, given the definition of soils in the Seridó Paraibano, variation in phosphorus diffusive flux is to be expected. The objective of this study is to study the levels of phosphorus in the diffusive phosphate flux in

 José Wellington de Medeiros Estrela ^{[1]*}

 Jandeilson Alves de Arruda ^[2]

 Sebastiana Joelma de Azevedo Santos ^[3]

 Tadeu Macryne Lima Cruz ^[4]

[1] wellingtonestrela18@hotmail.com

[2] jandeilson_agro@hotmail.com

[3] joelmaifpbpicuiy@gmail.com

[4] tadeumacryne@hotmail.com

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB),
Campus Picuí, Brasil

*Autor para correspondência.

representative soils of the Seridó Paraibano. Samples, collected in the 0-20 cm depth layer, from six representative soils were used. The experiment was carried out in a randomized block design, in a 6 × 5 factorial, with six soils and five P levels (0%, 10%, 20%, 30% and 40 % of the maximum P sorption capacity). To estimate the diffusive flow of P, PVC rings measuring 5 cm in height and 10 cm in internal diameter were used as experimental units, with a volume of soil of 300 cm³, that received the soils and doses in study and served as a diffusion chamber. To evaluate the diffusive flux of P in soils, paper of anionic exchange was used, which remained in contact with the soil for 15 days. P levels promoted a linear increase in phosphate diffusive flux, with the exception of Fluvic Neosol, in which no significant response was observed. The highest P flux was observed for Planosol (0.0753 μmol.cm-2/15 days), followed by Regolith Neosol (0.0510 μmol.cm-2/15 days). Fluvic Neosol was the soil that showed the lowest diffusive flow (0.0274 μmol.cm-2/15 days). It was concluded that the application of P increased the diffuse flux of phosphate and that the diffusive flux of P was higher in Planosol and lower in Fluvic Neosol.

Keywords: diffusion; phosphor; phosphorus availability; semiarid; soil.

1 Introdução

Entre os diversos nutrientes, o fósforo (P) tem sido um dos mais limitantes à produção de biomassa vegetal em solos brasileiros, devido aos baixos teores do elemento nos materiais de origem, bem como à sua forte interação com a fase sólida dos solos (Novais; Smyth, 1999). Baixos teores de P são encontrados mesmo em solos pouco desenvolvidos do semiárido brasileiro (Salcedo, 2006), onde se encontra inserido o Seridó Paraibano (estado da Paraíba, Brasil).

O conhecimento da ocorrência, reação e movimento dos elementos químicos no solo é de suma importância para se compreender e analisar o seu comportamento no sistema solo-planta (Vinhali-Freitas *et al.*, 2010). A compreensão desses fenômenos possibilita conhecer a dinâmica dos nutrientes no solo, permitindo entender sua disponibilidade e consequente suprimento às plantas. Isso tem reflexo sobre o uso mais eficiente de fertilizantes (Pereira; Faria, 1998), além de um manejo mais racional e sustentável da fertilidade do solo.

O principal mecanismo de contato íon-raiz do P no solo é a difusão (Novais; Smyth, 1999; Santner *et al.*, 2015). Vários fatores podem influenciar o fluxo difusivo de fósforo (FDP), como a textura, a mineralogia da fração argila, a umidade, a compactação, a fonte fosfatada (Costa *et al.*, 2006; Novais; Smyth, 1999; Oliveira *et al.*, 2004; Silva; Barros; Souza, 2008) e a capacidade tampão (Horst *et al.*, 2001).

Ao quantificarem a sorção de P em solos do Seridó Paraibano, por meio do fósforo remanescente, Arruda *et al.* (2017) verificaram variação nesse atributo químico entre os solos estudados, indicando diferente capacidade sortiva. Dessa forma, é de se esperar que o fluxo difusivo do elemento também seja variável.

Estudos sobre o FDP em solos do Seridó Paraibano podem contribuir para a compreensão do comportamento do elemento nesses solos e, consequentemente, favorecer o manejo da adubação fosfatada e da agricultura praticada na região. Entretanto, poucas pesquisas foram realizadas com a finalidade de entender a dinâmica do P nos solos desse território do estado da Paraíba, não sendo encontradas na literatura informações acerca

da difusão de P. Com isso, objetivou-se com este estudo analisar o efeito de níveis de fósforo no fluxo difusivo de fosfato em seis tipos de solos representativos do Seridó Paraibano, haja vista a existência dessa lacuna no conhecimento sobre o fluxo difusivo do fosfato nos solos dessa região do estado da Paraíba.

Levando em consideração os baixos índices de teores de P nos solos brasileiros, o restante deste trabalho é dividido da seguinte forma: na seção 2 são apresentados os tipos de solos mais desenvolvidos bem como os menos desenvolvidos no Seridó Paraibano, e na seção 3, a metodologia utilizada no estudo, com foco nas formas de preparo do solo e no tempo da estimativa da difusão realizada pela quantificação do P adsorvido no papel de troca aniônica. Na seção de resultados e discussões (seção 4), são apresentados os maiores e menores valores de fluxo difusivo de fosfato em seis tipos de solos do Seridó Paraibano, e, por fim, na seção 5, é apresentada a conclusão do trabalho.

2 Referencial teórico

No Seridó Paraibano há predomínio de solos pouco desenvolvidos, como os Neossolos Litólicos e Regolíticos, Luvisolos e Planossolos (Brasil, 1972). Podem ser encontrados também, ainda que em pequena escala, solos mais desenvolvidos, como o Latossolo e o Argissolo, que ocorrem no topo de serras ou devido à natureza do material de origem (Arruda *et al.*, 2017).

Nesses solos, assim como na maioria dos solos da região semiárida do nordeste brasileiro, os teores de P são baixos (Pereira; Faria, 1998). Essa baixa disponibilidade é explicada pela pobreza de P nos materiais de origem dos solos e devido a diversos processos físico-químicos de retenção do elemento. Entre estes, o processo de sorção de P tem sido muito estudado devido, principalmente, ao fato de esse ser o principal processo de retenção do elemento no solo (Costa, 2010).

2.1 Importância da difusão

Pela primeira lei de Fick, segundo Novais e Smyth (1999), a relação entre o fluxo difusivo de um soluto em uma solução pura, o gradiente de concentração e o coeficiente de difusão é expressa pela Equação 1:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

em que: F é o fluxo difusivo do soluto (dado em $\text{mol.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$); D é o coeficiente de difusão do soluto (em $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$); dC/dx é o gradiente de concentração ($\text{mol.cm}^{-3}.\text{cm}^{-1}$); C é concentração de P na solução do solo (mol.cm^{-3}); e x é a distância entre dois pontos (cm).

Uma maior tortuosidade do trajeto a ser percorrido pelos elementos e as interações existentes entre eles e as partículas do solo implicarão em um menor coeficiente de difusão efetivo dos nutrientes no solo em relação ao expressado na equação. Adaptando-se a lei de Fick para solos, a difusão do fósforo pode ser quantificada pela Equação 2 (Novais; Smyth, 1999), dada por:

$$D = D_1 \times q \times f_1 \frac{dC_1}{dC} \quad (2)$$

em que: D é o coeficiente de difusão de fósforo no solo (em $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$); D_1 é o coeficiente de difusão de fósforo em água ($0,89 \times 10^{-5} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$, a 25°C); q é o conteúdo volumétrico de água no solo (dado em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); f_1 é o fator de impedância (adimensional); C_1 é a concentração de P na solução do solo ou fator intensidade (I), dado em $\text{mol}.\text{cm}^{-3}$; C é a concentração de fósforo adsorvido-lábil ou fator quantidade (Q), em $\text{mol}.\text{cm}^{-3}$; e dC_1/dC é o inverso do fator capacidade do solo (dQ/dI).

O fator de impedância, f_1 , depende, fundamentalmente, da tortuosidade do caminho seguido pelo soluto através dos poros. Outras causas podem ser nele incluídas, tais como a redução do gradiente de concentração ao longo dessa distância e o aumento da viscosidade da água próximo à superfície das partículas sólidas do solo, afetando a mobilidade dos solutos. Tais razões reduzem a difusão de íons (Novais; Smyth, 1999).

Estudos relacionados ao fluxo difusivo de elementos no solo têm sido realizados, em sua maioria, com a utilização de resina de troca iônica (Costa *et al.*, 2006; Nunes *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2000; Silva; Barros; Souza, 2008) ou de papel-filtro impregnado com óxidos de ferro (Costa *et al.*, 2009). Apesar das dificuldades, tais métodos têm apresentado resultados satisfatórios na estimativa do FDP (Bastos *et al.*, 2008).

Ao estudarem o FDP em seis Latossolos do estado de Minas Gerais, Costa *et al.* (2006) verificaram que houve aumento do fluxo difusivo em resposta à adubação fosfatada e à elevação da umidade. Esses autores verificaram valores de FDP, para a maior dose de P e umidade de 100% da porosidade total, variando de 0,7419 a 5,9484 $\mu\text{mol}.\text{cm}^2/15$ dias.

Avaliando o efeito da compactação sobre o FDP em dois Latossolos Vermelhos de Minas Gerais, um de textura média e outro de textura argilosa, Silva *et al.* (2008) verificaram que houve aumento no FDP em resposta à elevação da densidade em ambos os solos, sendo o fluxo de P maior no Latossolo de textura média, em razão de sua menor capacidade de sorção de P. Estudando a influência da compactação do solo, com diferentes umidades, sobre a densidade e a difusão de P e Zn em dois Latossolos, os autores constaram o aumento do fluxo difusivo de fósforo e de zinco em resposta à compactação do solo; isso pode ser explicado pelo aumento da densidade do solo.

Bastos *et al.* (2008), avaliando o efeito de doses de P no fluxo difusivo do elemento em solos do estado de Alagoas, verificaram que o aumento das doses de P resultou em elevação do fluxo difusivo, sendo maior na dose correspondente a 30% da capacidade máxima de sorção de P (CMSP) em todos os solos estudados. Os mesmos autores encontraram maiores valores de FDP nos solos arenosos (Neossolo Flúvico e Neossolo Quartzarênico).

No estudo de Costa *et al.* (2009), a média do fluxo difusivo de P em solos de Alagoas (dois Latossolos Amarelos coesos, um Argissolo Acinzentado e um Neossolo Flúvico), sob diferentes graus de umidade, variou de 1,88 a 2,21 $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$ em 30 dias, sendo maior no Neossolo Flúvico, que é mais arenoso. Os autores verificaram ainda que a elevação da umidade favoreceu o fluxo difusivo.

Dados sobre o fluxo difusivo de P em solos do Seridó Paraibano não foram encontrados na literatura, porém, há de se esperar que haja variação nesse fluxo, tendo em vista a variação de classes de solos que ocorrem na região e de suas capacidades sortivas.

3 Método da pesquisa

O experimento foi realizado no Laboratório de Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Picuí.

Tabela 1 ▼
Características químicas e físicas dos seis solos representativos do Seridó Paraibano.
Fonte: dados da pesquisa

Foram utilizadas amostras, coletadas na camada 0-20 cm, de seis solos representativos do Seridó Paraibano, sendo estes selecionados com base na sua ocorrência e importância agrícola, utilizando dados disponíveis no Levantamento exploratório de reconhecimento de solos do estado da Paraíba (Brasil, 1972). Os solos foram secos ao ar, passados por peneira de 2 mm de malha e caracterizados química e fisicamente seguindo métodos descritos por Teixeira *et al.* (2017), conforme apresentado na Tabela 1.

¹ Solo	pH	P	K	Na	Ca+Mg	Al	Areia	Silte	Argila	² CMSP	³ a
		----- mg.kg ⁻¹ -----	----- mg.kg ⁻¹ -----	-----	-- ⁴ cmol _c .kg ⁻¹ --	-----	----- g.kg ⁻¹ -----	-----	mg.g ⁻¹	L.mg ⁻¹	
TC	5,3	0,8	30,8	268,5	9,9	0,0	604	239	157	0,23	0,397
SN	6,3	4,1	40,0	478,3	9,5	0,0	663	180	157	0,28	0,095
RR	5,6	4,8	65,3	19,0	1,8	0,0	852	115	33	0,06	0,424
RL	6,7	16,0	345,0	88,5	4,6	0,0	761	167	72	0,08	0,201
RY	6,1	44,4	170,8	89,2	7,6	0,0	710	220	70	0,09	0,226
LA	5,0	1,3	106,3	84,5	3,4	0,4	527	77	396	0,15	0,577

¹Tipos de solos: TC = Luvisso Crômico; SN = Planossolo Nátrico; RR = Neossolo Regolítico; RL = Neossolo Litólico; RY = Neossolo Flúvico; LA = Latossolo Amarelo. ²Capacidade máxima de sorção de P. ³Constante relacionada à energia de sorção. ⁴Centimol de carga.

Os procedimentos adotados foram os descritos em Bastos *et al.* (2008). Câmaras de difusão foram confeccionadas utilizando anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno e volume de 300 cm³, fixados sobre uma placa de isopor para vedação da parte inferior. Esses anéis foram preenchidos com os solos em estudo. As doses de P avaliadas corresponderam aos níveis 0%, 10%, 20%, 30% e 40% da capacidade máxima de sorção de P (CMSP) dos seis solos e foram aplicadas via solução, utilizando-se como fonte o fosfato de potássio monobásico (KH₂PO₄).

Utilizou-se o esquema fatorial 6 × 5, sendo seis solos e cinco doses de fósforo recomendadas pela capacidade máxima de sorção do fósforo, com quatro repetições, perfazendo o total de 30 tratamentos e 120 parcelas, dispostas em blocos casualizados.

Para avaliação do FDP, utilizou-se o papel de troca aniônica (PA). O PA foi preparado utilizando papel de filtração lenta, de 11 cm de diâmetro, imerso em solução de cloreto de ferro (FeCl₃.6H₂O) 0,4 mol.L⁻¹ durante 15 segundos. Decorrido o período, cada folha foi posta sobre um vidro liso para eliminação do excesso de cloreto de ferro, pressionando-se a folha tratada em outra ainda limpa, com o intuito de evitar precipitação desuniforme do hidróxido de ferro; em seguida, a folha tratada foi transferida para uma solução de hidróxido de amônio (NH₄OH) 2,7 mol.L⁻¹, também por 15 segundos, sendo então observada mudança da cor do papel, de amarelo para marrom-avermelhado, indicando a formação de hidróxido de ferro (Villani, 1995). Após ser retirado da solução de hidróxido de amônio, o papel foi lavado com água destilada e colocado para secar. Depois de seco, o papel foi cortado em tiras de 10 cm² e fixadas sobre uma lâmina de microscópio.

Cada câmara de difusão teve metade do seu volume preenchido com solo (de acordo com o tipo de solo e dose correspondente ao tratamento), e a lâmina contendo o PA foi

então disposta horizontalmente na superfície. Em seguida, o volume restante dos solos foi colocado nas câmaras, às quais foi adicionada água em quantidade suficiente para atingir a umidade correspondente a 50% da porosidade total, para que os solos fossem ocupados meio a meio com água e ar.

O experimento foi conduzido nessas condições, em laboratório, durante 15 dias. Após esse período, as lâminas foram retiradas e lavadas com jatos de água, para remoção do solo aderido, e o excesso de água foi retirado com papel filtro.

O P adsorvido pelo PA foi extraído pela agitação do papel com 50 mL de uma solução de cloreto de amônio (NH_4Cl) $0,8 \text{ mol.L}^{-1}$ + ácido clorídrico (HCl) $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$ durante uma hora, em agitador horizontal a 120 rotações por minuto. A quantificação do P foi realizada de acordo com Braga e Defelipo (1974). A estimativa da difusão (fluxo difusivo) foi realizada pela quantificação do P adsorvido ao PA, correspondendo ao fósforo que atingiu o PA no período de 15 dias.

As análises estatísticas consistiram em análise de variância e regressão, sendo realizadas no software SISVAR (Ferreira, 2014).

4 Resultados e discussão

Os valores de FDP nos solos estudados, de modo geral, aumentaram com os níveis de fósforo aplicados (Tabela 2). O tratamento com a aplicação do maior nível do elemento promoveu os maiores valores de fluxo difusivo em todos os solos, com exceção do Neossolo Flúvico (RY). A aplicação de P levou ao aumento no gradiente de concentração (dC/dx da Equação 1), favorecendo a difusão do elemento.

Para o tratamento sem adição de P, houve pequena variação no FDP entre os solos, sendo verificado maior fluxo do elemento no Neossolo Litólico (Tabela 2).

Tabela 2 ▼
Fluxo difusivo de fósforo influenciado por níveis do elemento em solos representativos do Seridó Paraibano.
Fonte: dados da pesquisa

Níveis de P ¹	Solo ²					
	TC	SN	RR	RL	RY	LA
----- $\mu\text{mol.cm}^{-2}/15 \text{ dias}$ -----						
0	0,0149	0,0135	0,0198	0,0214	0,0157	0,0136
10	0,0201	0,0244	0,0211	0,0273	0,0252	0,0145
20	0,0331	0,0633	0,0469	0,0308	0,0298	0,0217
30	0,0636	0,1255	0,0553	0,0427	0,0387	0,0409
40	0,0801	0,1498	0,1120	0,0662	0,0278	0,0718
Média	0,0424	0,0753	0,0510	0,0377	0,0274	0,0325

¹ Porcentagem da capacidade máxima de sorção de P. ² TC = Luvissoilo Crômico; SN = Planossolo Nátrico; RR = Neossolo Regolítico; RL = Neossolo Litólico; RY = Neossolo Flúvico; LA = Latossolo Amarelo.

Estudando os efeitos de diferentes doses de fósforo no fluxo difusivo, Costa *et al.* (2006) constataram o aumento do fluxo com o incremento das doses do elemento e a inserção de água, sendo o tratamento com a maior dose de fósforo e a maior umidade responsável pelo maior valor do fluxo difusivo em todos os solos estudados.

Ao avaliarem os efeitos de diferentes fontes de fósforos com diferentes níveis de umidade sobre o fluxo difusivo em solos de Alagoas, Costa *et al.* (2009) verificaram os

maiores valores de fluxo difusivo para os solos arenosos, nos quais, segundo os autores, o transporte de fósforo é favorecido, em comparação a solos argilosos.

Também em solos do estado de Alagoas, Bastos *et al.* (2008) avaliaram o efeito de doses de P no fluxo difusivo do elemento e constataram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo, no qual o aumento da aplicação de P nos solos promoveu aumento do FDP.

Horst *et al.* (2001) afirmam que quanto mais fósforo disponível no solo, maior será o gradiente de concentração desse elemento, razão pela qual ocorre o aumento do FDP.

Para Costa (1998) e Godinho *et al.* (1997), quando há um acréscimo de doses de fósforo aplicadas ao solo, ocorre um aumento do coeficiente de difusão do elemento devido à saturação progressiva da superfície de adsorção, o que resultará em um aumento na concentração do elemento. Considerando o FDP médio (Tabela 2), o fluxo difusivo variou de 0,0274 $\mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias, no RY, a 0,0753 $\mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias no Planossolo (SN).

O menor fluxo difusivo no RY não era esperado, em virtude da sua textura arenosa e das baixas CMSP e energia de ligação (Tabela 1). Tal fato deve estar relacionado à constituição mineralógica da fração areia desse solo, que é formada em grande parte por muscovita. As partículas da mica devem ter reduzido a continuidade dos poros, pelo ajuste face a face das lâminas, reduzindo assim o fator de impedância e o coeficiente de difusão, dificultando a movimentação do P nesse solo.

Costa (1998), estudando a difusão de potássio em função da compactação e da umidade do solo, verificou que seus valores diminuíram em todos os níveis de umidade e nos três solos estudados, quando se promoveu a compactação. O autor também verificou que as alterações na difusão de um íon quando um solo é submetido à compactação, aumentando-se a densidade, são atribuídas a mudanças no fator de impedância que envolve a tortuosidade.

Silva *et al.* (2008), estudando o fluxo difusivo de fósforo influenciado pela compactação em dois solos distintos, observaram que os maiores valores de FDP se deveram à menor adsorção de fosfato no Latossolo Vermelho, que apresenta menor teor de argila e maior P remanescente e, conseqüentemente, uma menor capacidade de adsorção. O estudo constatou a necessidade de aplicação de doses mais elevadas de fósforo no solo para que o fluxo difusivo de P não seja limitante para o crescimento das plantas.

O maior fluxo difusivo de P verificado para o Planossolo deve estar relacionado à menor energia de ligação do elemento com as partículas de solo (Tabela 1). Apesar de esse ser o solo com maior capacidade de sorção de P, a baixa energia de ligação parece favorecer a movimentação do elemento no solo. Aliado a esse fato, pode ter havido uma maior saturação de sítios de adsorção pela maior quantidade de P aplicado, tendo em vista que as doses foram calculadas com base em percentuais da CMSP.

Um comportamento semelhante foi verificado por Costa *et al.* (2006) em solos de Minas Gerais, onde um Latossolo Vermelho Amarelo com 330 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de argila e CMSP de 744 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ apresentou maior fluxo difusivo do que o Latossolo Vermelho de textura arenosa e CMSP de 399 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Os autores justificaram esse fato pela menor energia de ligação do Latossolo Vermelho Amarelo (0,580 $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$) em comparação ao Latossolo Vermelho (0,868 $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$).

A resposta do FDP à aplicação das doses do elemento foi linear para os solos, com exceção do Neossolo Flúvico, para o qual não houve resposta significativa (Quadro 1). O aumento no fluxo difusivo de P no Planossolo foi de 0,0037 $\mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}/15$ dias para cada unidade percentual da CMSP aplicada ao solo na adubação. Esse valor é três vezes

maior do que o verificado para o Neossolo Litólico ($0,0011 \mu\text{mol.cm}^{-2}/15$ dias por unidade percentual da CMSP), que foi o solo com menor incremento no fluxo difusivo.

Quadro 1 ►

Equações de regressão relacionando o fluxo difusivo de fósforo ($\mu\text{mol.cm}^{-2}/15$ dias) com as doses de fósforo (% da CMSP) em seis solos do Seridó Paraibano.
Fonte: dados da pesquisa

Solo ¹	Equação	R ²
TC	$\hat{y}=0,0075+0,0017 x$	0,9420
SN	$\hat{y}=0,0006+0,0037 x$	0,9551
RR	$\hat{y}=0,0073+0,0022 x$	0,8502
RL	$\hat{y}=0,0167+0,0011 x$	0,8752
RY	$\hat{y}=\bar{y}=0,0274$	-
LA	$\hat{y}=0,004+0,0014 x$	0,8450

¹ TC = Luvissole Crômico; SN = Planossolo Nátrico; RR = Neossolo Regolítico; RL = Neossolo Litólico; RY = Neossolo Flúvico; LA = Latossolo Amarelo.

5 Considerações finais

A análise constatou que a aplicação de P aumentou o fluxo difusivo do fosfato nos solos estudados, com exceção do Neossolo Flúvico.

O fluxo difusivo de P variou de 0,0274 a 0,0753 $\mu\text{mol.cm}^{-2}/15$ dias, sendo menor no Neossolo Flúvico e maior no Planossolo Nátrico.

Mais estudos precisam ser realizados para melhorar a compreensão dos fatores que influenciam o fluxo difusivo de fósforo nos solos do Seridó Paraibano, como, por exemplo, o efeito da umidade e da compactação do solo.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

ARRUDA, J. A.; ESTRELA, J. W. M.; FREIRE, J. L. O.; SANTOS, S. J. A. Fósforo remanescente em solos do Seridó Paraibano. **Revista Principia**, n. 35, p. 42-49, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n35p42-49>.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 136-142, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200005>.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, n. 113, p. 73-85, 1974.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **I. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado da Paraíba**. II. Interpretação para uso agrícola dos solos do estado da Paraíba. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; Série Pedologia, 8). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/330784>. Acesso em: 26 nov. 2021.

COSTA, H. S. **Cinética de sorção e disponibilidade de fósforo em função do tempo de contato do fósforo com o solo**. 2010. 56 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

COSTA, J. P. V. **Fluxo difusivo de fósforo e de potássio em Latossolos**. 1998. 67 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

COSTA, J. P.V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A.W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000400007>.

COSTA, J. P. V.; BASTOS, A. L.; REIS, L. S.; MARTINS, G. O.; SANTOS, A. F. Difusão de fósforo em solos de Alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 229-235, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/1227>. Acesso em: 26 nov. 2021.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

GODINHO, V. P. C.; SAMPAIO, R. A.; VENEGAS, V. H. A.; RUIZ, H. A. Adsorção de fosfatos em três solos da região semi-árida do Rio Grande do Norte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 819-823, 1997. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4727>. Acesso em: 25 nov. 2021.

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measurements for increasing P availability to crops. **Journal Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 211-223, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013353610570>.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV: DPS, 1999. 399 p.

NUNES, F. N.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; GEBRIM, F. O.; SÃO JOSÉ, J. F. B. Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 423-429, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300003>.

OLIVEIRA, E. M. M.; RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2-3, p. 196-203, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000200006>.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NEVES, J. C. L. Aluminum diffusion in Oxisols as influenced by soil water matric potential, pH, lime, gypsum, potassium chloride, and calcium phosphate. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 15-16, p. 2523- 2533, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620009370606>.

OLIVEIRA, M. F. G.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A. Fluxo difusivo de zinco em amostras de solo influenciado por textura, íon acompanhante e pH do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 609-615, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300014>.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1179-1184, 1998. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/132824>. Acesso em: 26 ago. 2022.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. **Revista de Geografia**, v. 23, n. 3, p. 108-123, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228677/23099>. Acesso em: 26 ago. 2022.

SANTNER, J; MANNEL, M; BURRELL, L. D; HOEFER, C; KREUZEDER, A; WENZEL, W. W. Phosphorus uptake by *Zea mays* L. is quantitatively predicted by infinite sink extraction of soil P. **Journal Plant and Soil**, v. 386, p. 371-383, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2271-x>.

SILVA, R. S.; BARROS, N. F.; SOUZA, C. M. Fluxo difusivo de fósforo e zinco influenciado pela compactação de dois solos. **Revista Ceres**, v. 55, n. 6, p. 619-624, 2008. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/index.php/ceres/article/view/3384>. Acesso em: 1 dez. 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Manual de métodos de análises de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 230 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 26 ago. 2022.

VILLANI, E. M.A. **Fluxo difusivo do fósforo influenciado por fontes e por tempo de contato do fósforo com o solo**. 1995. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

VINHAL-FREITAS, I. C.; MALDONADO, A. C. D.; ALVARENGA, C. B.; CAMARGO, R.; WENDLING, B. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 31, n. 2, p. 153-163, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/at/article/view/4516>. Acesso em: 26 ago. 2022.