

Ano 12, Vol XXIII, Número 2, Jul-Dez, 2019, p. 261-285.

PERDAS DE FÓSFORO POR LIXIVIAÇÃO EM NEOSSOLO REGOLÍTICO ADUBADO COM ESTERCO BOVINO CURTIDO EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

Kalline de Almeida Alves Carneiro
Marianne Costa de Azevedo
Vânia da Silva Fraga
Bruno de Oliveira Dias
Tancredo Augusto Feitosa de Souza
Marcus Metri Corrêa
Antonio Celso Dantas Antonino
Ignácio Hernán Salcedo

RESUMO: O fósforo (P) é considerado um nutriente imóvel no solo, pois o P liga-se fortemente ao Fe e Al. No entanto, foi observado em solos arenosos que o Fe e Al, mesmo em pequenas quantidades, influenciam a lixiviação de P. Objetivou-se avaliar a perda de P em amostras de um Neossolo Regolítico adubado e não adubado com esterco bovino curtido, e relacionar as perdas de P com as formas de Fe e Al. Foram coletadas quatro amostras de solo adubado e não adubado com esterco bovino curtido na profundidade de 0 - 10 cm no município de Esperança – PB. Após a coleta foram feitas análises de fertilidade do solo, incluindo P em Mehlich – 1 e P em água, Fe e Al extraído com Oxalato de amônio e Ditionito – citrato e bicarbonato. O ensaio de lixiviação foi realizado através do método de deslocamento miscível utilizando colunas acrílicas preenchidas com solo e uma solução salina de KCl e CaCl₂ a 0,001M para a lixiviação. A área A2 teve o maior teor de P_w (14,45 mg kg⁻¹) e P_{ext} (54,50 mg kg⁻¹), esta mesma área apresentou a maior perda de P_{lix} (128,83 mg L⁻¹). A correlação entre P_{lix} e as formas de Fe e Al foram não significativas. O P_{lix} teve maior correlação com as formas mais cristalinas de Fe e Al. A maior perda de P foi observada até 20 NVp.

Palavras – chave: Deslocamento miscível de P; Sorção e Lixiviação de P

PHOSPHORUS LOSSES BY LEACHING IN NEOSSOLO REGOLÍTICO FERTILIZED WITH CURED CATTLE DUNG IN SEMI-ARID CONDITIONS

ABSTRACT: Phosphorus (P) is considered an immobile nutrient in the soil, since P is strongly bound to Fe and Al. It was observed in sandy soils that Fe and Al, even in small amounts, influence the leaching of P. The objective was to evaluate P loss in

samples of a Regolithic Neossol fertilized and not fertilized with tanned manure, and to relate P losses with the Fe and Al forms. Four samples of soil fertilized and not fertilized with tanned manure at depth of 0 - 10 cm in the municipality of Esperança - PB. After collection, soil fertility analyzes were performed, including P in Mehlich - 1 and P in water, Fe and Al extracted with ammonium oxalate and Dithionite - citrate and bicarbonate. The leaching assay was performed by the miscible displacement method using soil-filled acrylic columns and a 0.001M KCl and CaCl₂ saline solution for the leaching. The area A2 had the highest content of Pw (14.45 mg kg⁻¹) and Pext (54.50 mg kg⁻¹), this same area presented the highest loss of Plix (128.83 mg L⁻¹). The correlation between Plix and the Fe and Al forms were not significant. Plix had a higher correlation with the more crystalline forms of Fe and Al. The greatest loss of P was observed up to 20 NVp.

Keywords: Miscible displacement of P; P Sorption and Leaching.

INTRODUÇÃO

O fósforo é um nutriente limitante para a produção agrícola nos solos brasileiros, por apresentar frequentemente baixos teores de P, tornando-se necessário a adubação orgânica ou inorgânica (MISSONG et al., 2018). Solos de textura arenosa são mais propensos à sofrerem com a perda de nutrientes por lixiviação, uma vez que esses solos possuem baixos teores de argila e maior quantidade de macroporos, o que aumenta a capacidade de infiltração de água desses solos (SCOPEL et al., 2013).

O fósforo (P) tem alta capacidade de interação com os oxihidróxidos de Fe e Al, fazendo com que este nutriente seja considerado imóvel em algumas classes de solo. No entanto, em solos arenosos, com pouca quantidade de oxihidróxido de Fe e de Al, influencia na maior perda de P por lixiviação, ocasionando o empobrecimento da camada superficial do solo, e deslocando o P para camadas mais profundas do solo, ocasionando a eutrofização e riscos ambientais (TOOR et al., 2015).

A adubação orgânica com esterco bovino curtido é eficiente para aumentar a produtividade das lavouras de agricultura familiar da região do Agreste Paraibano, como é apresentada no estudo de BORCHARTT (2011) e AZEVEDO et al. (2018). Porém, para que os níveis de P no solo não ultrapassem o exigido pelas culturas, é

necessário que se conheça a fertilidade do solo e a composição química do esterco utilizado (MENEZES et al 2007).

Solos adubados continuamente com esterco bovino curtido tendem à acumular nutrientes, principalmente na camada superficial do solo, onde há a maior taxa de atividade microbiana e conseqüente mineralização dos nutrientes presentes no esterco (GALVÃO et al 2008). Devido as características físicas dos solos da região do Agreste Paraibano, juntamente com a adubação contínua das áreas de cultivo com esterco bovino curtido, estima-se que parte do P presente na camada superficial do solo possa ser lixiviado.

A literatura científica sobre a lixiviação de P é escassa, uma vez que a maioria dos artigos e livros tratam do P como um nutriente imóvel no solo, porém estudos realizados em solos arenosos por OLIVEIRA (2011), GEBRIM (2010), GALVÃO et al. (2008), AZEVEDO et al. (2018) observaram a presença de P em camadas mais profundas do solo (40 – 60 cm) indicando que este nutriente é translocado das camadas superficiais para as camadas mais profundas, estes trabalhos ressaltam a importância de novos estudos sobre a mobilidade do P em solos arenosos adubados com esterco bovino curtido.

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência dos oxihidróxidos de Fe e Al nas perdas de fósforo em um Neossolo Regolítico em áreas de agricultura familiar do agreste paraibano, com a finalidade de investigar a seguinte hipótese: a) Além da influência dos teores de Fe e de Al, o aumento do grau de saturação do solo com o P proveniente das doses de esterco resultará no aumento do transporte de P, devido à diminuição dos sítios de adsorção.

METODOLOGIA

As amostras de solo foram coletadas em áreas de agricultura familiar, localizadas no município de Esperança - PB, no Agreste paraibano. O clima se caracteriza como quente e úmido (BRASIL,1972), com precipitação média anual de 610 mm, temperatura média de 25°C e umidade relativa do ar de 80%, respectivamente (AESA, 2018).

Foram coletadas quatro amostras de solo com diferentes manejos de adubação, em duas propriedades de agricultura familiar, na profundidade de 0-10 cm. O solo predominante

nas áreas selecionadas é o Neossolo Regolítico Eutrófico (Embrapa, 2018), de textura franco-arenosa.

Histórico das áreas de coletas:

- Ambiente A: Área de agricultura familiar, com produção de feijão e erva doce em consórcio. Adubada anualmente com esterco bovino curtido.
 - A1: Área adubada com esterco bovino curtido dois meses antes da coleta. Latitude 06° 59' 08,6" Sul, Longitude 35° 52' 36,2" Oeste e 668 m de altitude.
 - A2: Área não adubada no ano de coleta, mas adubada um ano antes da coleta. Latitude 06° 59' 09,8" Sul, Longitude 35° 52' 35,6" Oeste e 661 m de altitude.
- Ambiente B: Área de agricultura familiar, com produção de feijão e erva doce em consórcio. Área sem nenhum tipo de adubação há mais de cinco anos.
 - B1: Área adubada dois meses antes da coleta. Latitude 06° 59' 03,7" Sul, Longitude 35° 51' 31,8" Oeste e 610 m de altitude
 - B2: Área sem adubação a cinco anos. Latitude 06° 58' 07,9" Sul, Longitude 35° 51' 30,3" Oeste 612 m de altitude.

Todas as análises químicas e ensaio de lixiviação foram realizadas no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo, DSER/UFPB. Nas análises químicas foram determinadas: P_{ext} (P mehlich), P_w (P em água), Ca^{2+} ; K^+ , Mg^{2+} ; Na^+ ; pH em água, Fe_{ox} (Ferro oxalato), Al_{ox} (Alumínio oxalato), Fe_{di} (Ferro ditionito) e Al_{di} (Alumínio ditionito). Os teores de P, Na e K foram extraídos por meio da solução extratora de Mehlich-1, sendo quantificados por espectrocolorimetria e fotometria de chama respectivamente; Ca e Mg trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e quantificados por complexometria com EDTA 0,0125M (EMBRAPA, 2017); Os teores de Fe e Al foram extraídos com solução de oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹, e também por solução de ditionito – citrato e bicarbonato ambos determinados por absorção atômica seguindo a metodologia de SCHWERTMANN (1964) e MCKEAGUE & DAY (1966), tabela 1. A análise química do esterco bovino foram realizadas segundo a metodologia de TEDESCO (1995), tabela 2.

Tabela 1: Caracterização dos atributos químicos de quatro amostras de um Neossolo Regolítico com diferentes manejos de adubação com esterco bovino

Atributos	A1	A2	B1	B2
pH (H ₂ O)	8,00	8,02	7,92	7,77
P ext (mg kg ⁻¹)	49,70	54,50	45,30	19,90
Pw (mg kg ⁻¹)	12,03	14,45	11,52	6,55
P lix (mg L)	85,61	128,83	91,69	40,38
H ⁺ (Cmolc kg ⁻¹)	7,32	7,35	5,07	7,66
Al ³⁺ (Cmolc kg ⁻¹)	0,09	0,10	1,04	1,46
Ca ²⁺ (Cmolc kg ⁻¹)	1,03	1,16	1,10	1,10
Mg ²⁺ (Cmolc kg ⁻¹)	0,35	0,29	0,34	0,12
K (mg kg ⁻¹)	140,5	150,2	71,8	178,0
Na (Cmolc kg ⁻¹)	0,003	0,003	0,007	0,011
M.O.S (dag kg ⁻¹)	2,44	2,27	2,41	3,01
SB (Cmolc kg ⁻¹)	5,91	6,30	3,77	7,00
CTC T (Cmolc kg ⁻¹)	13,32	13,75	9,88	16,12
CTC t (Cmolc kg ⁻¹)	6,00	6,40	4,81	8,46
V %	44,38	45,83	38,14	43,43
M %	1,50	1,56	21,64	17,26
Fe _{ox} (mg g ⁻¹)	0,307	0,165	0,287	0,267
Al _{ox} (mg g ⁻¹)	0,522	0,316	0,316	0,061
Fe _{di} (mg g ⁻¹)	0,511	0,494	0,781	1,33
Al _{di} (mg g ⁻¹)	0,319	0,311	0,489	0,736

Pext (Fósforo extraível em Mehlich – 1); Pw (Fósforo solúvel em água); H⁺ (Hidrogênio); Al³⁺ (Alumínio trocável); Ca²⁺ (Cálcio trocável); Mg²⁺ (magnésio trocável); K (potássio); M.O. (matéria orgânica); SB (soma de bases); CTC T (CTC total); CTC t (CTC efetiva); V% (Saturação por bases); M% (Saturação por alumínio); Fe_{ox} (Ferro oxalato); Al_{ox} (Alumínio oxalato); Fe_{di} (Ferro ditionito); Al_{di} (Alumínio ditionito).

Tabela 2: Características químicas do esterco bovino

Amostra	N (g Kg ⁻¹)	K (g Kg ⁻¹)	C (g Kg ⁻¹)	P (g Kg ⁻¹)	C/P (g Kg ⁻¹)
Esterco Bovino	4,78	48,03	67,39	1,04	65,11

Todas as análises físicas foram determinadas no Laboratório de Física do Solo, DSER – CCA, foram feitas análises de Densidade do solo (Ds) pelo método do cilindro volumétrico, densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico, porosidade total (P%) pelo método indireto e análise granulométrica, pelo método de separação de areia e método do densímetro (EMBRAPA, 2017), tabela 3.

Tabela 3: Caracterização dos atributos físicos de quatro amostras de um Neossolo Regolítico, com diferentes manejos de adubação com esterco bovino

Atributos	A1	A2	B1	B2
Areia (g kg ⁻¹)	832	833	830	824
Silte (g kg ⁻¹)	134	106	123	117
Argila (g kg ⁻¹)	34	61	47	59
Relação Silte/Argila	3,94	1,74	2,84	1,98
Ds (g cm ³)	1,43	1,49	1,46	1,39
Dp (g cm ³)	2,55	2,65	2,60	2,66
Porosidade (%)	43,92	43,77	43,85	47,74
Classe Textural	Areia Franca	Areia Franca	Areia Franca	Areia Franca

Ds (densidade do solo); Dp (densidade de partículas). ; 1: Área adubada no ano de coleta; e 2: Área sem adubação no ano da coleta

O conjunto de transporte de íons foram composto por colunas de acrílico com 50,50 cm³, com bases de PVC constituídas internamente com anel de borracha para garantir perfeita vedação do sistema. Na parte superior e inferior da coluna, foram colocados uma chapa de latão de 3 mm de espessura perfurada (orifícios com diâmetro de 2 mm) e, em seguida, um filtro de nylon para impedir a perda do solo durante a realização do ensaio.

O conjunto de coluna e base foram pesados antes e depois do preenchimento com solo para a determinação da densidade do solo no interior de cada coluna. As colunas foram preenchidas com solo em camadas de aproximadamente 2 cm, levemente compactada com um bastão de vidro.

As colunas foram preparadas em triplicatas para a camada de 0-10 cm. Após o acondicionamento do solo nas colunas, se iniciava o processo de saturação ascendente lento que durava em torno de 24 horas, utilizando uma solução salina constituída de cloreto de cálcio (CaCl_2) 0,001 M e cloreto de potássio (KCl) 0,001 M. Após a saturação iniciaram o processo de deslocamento miscível, utilizou-se uma bomba peristáltica IPC Ismatec, conectada por capilares utilizando a mesma solução salina utilizada na saturação, com vazão média utilizada de $2,90 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$.

O efluente foi coletado em tubos de ensaio com tempo pré-fixado, foi utilizado um coletor de fração automático Gilson FC206. O fósforo coletado foi quantificado por colorimetria segundo Murphy e Riley (1962). Em todas as colunas foram determinadas as seguintes propriedades: densidades do solo (D_s), densidade de partícula (D_p), porosidade (ε), vazão (Q), e volume de poros (V_p), tabela 4. Essas variáveis foram determinadas a partir da seguinte equação:

$$V_p = V_c * \varepsilon = \pi r^2 h \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right)$$

Sendo: V_p = volume de poros do solo na coluna (cm^3); V_c = volume da coluna (cm^3); ε = porosidade total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); π = constante igual à 3,14; r = raio do cilindro da coluna; h = altura do cilindro da coluna; D_s = densidade do solo no interior da coluna; D_p = densidade de partículas

A vazão (Q) foi calculada por meio da relação:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Onde: Q = vazão ($\text{cm}^3 \text{ h}^{-1}$); V = volume da solução (cm^3); t = tempo (h)

Tabela 4: Caracterização das colunas para ensaio de lixiviação com quatro amostras de um Neossolo Regolítico com diferentes manejos de adubação com esterco bovino.

Atributos	A1	A2	B1	B2
Massa do solo (g)	80,60	81,70	80,40	82,60
Ds (g cm ³)	1,60	1,62	1,59	1,64
Vp (mL)	19,70	19,70	19,70	19,70
ε %	36,68	35,69	37,69	36,69
q (cm mim ⁻¹)	14,20	24,70	11,50	14,00
V	32,90	69,30	30,50	39,20
T (mim)	19,69	19,69	19,69	19,69

Volume da coluna 50,5 cm -3; Densidade do solo (Ds); Volume de poros (Vp); Porosidade (ε); Vazão média (q); Velocidade média da água (V); Tempo (T).

Os dados de pH, P_{ext}, P_w, Fe_{ox}, Al_{ox}, Fe_{di}, Al_{di} e P_{lix} foram submetidos a análises estatísticas utilizando o Software – R² pacote Vegam para as permutações. Foram feitas correlações entre as variáveis P_{lix} com Fe_{ox}, Al_{ox}, Fe_{di}, Al_{di} utilizando o programa Sigma Plot versão 11.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH do solo de todos os tratamentos avaliados variaram entre 7,77 e 8,02 indicando alcalinidade mediana (Tabela 1). Observou-se que os valores de pH do solo foram mais altos no ambiente A do que no ambiente B. Dentro do ambiente A, não foi observado efeito da aplicação de esterco bovino curtido (12 à 20 Mg ha) sobre variações no pH do solo, enquanto que no ambiente B, observou-se efeito positivo da aplicação de esterco com incremento de 1,67% no pH do solo (Figura 1).

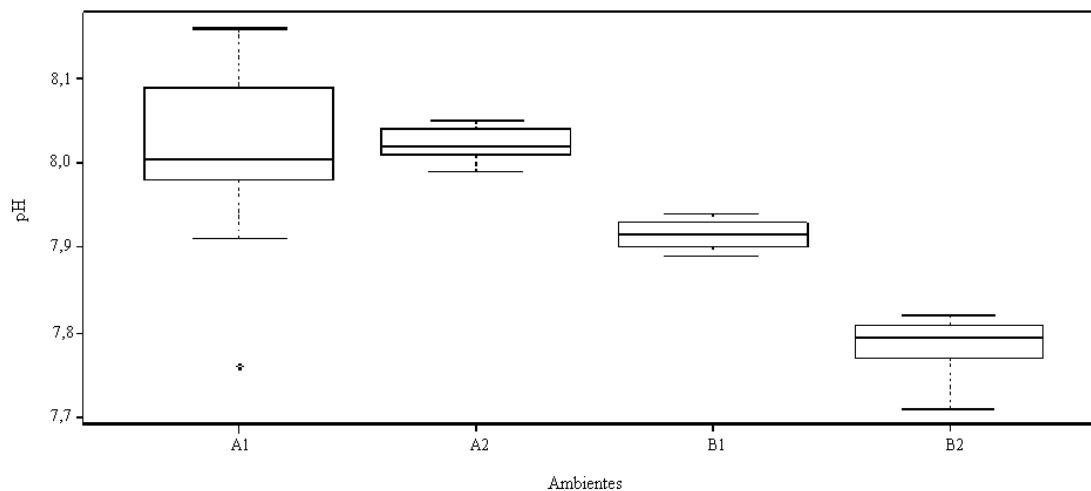


Figura 1: Valores de pH do solo em quatro amostras de solo submetidos a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança, PB, Brasil.

Os valores de pH do solo na faixa de alcalinidade mediana observados neste estudo não corroboram com os valores de pH acidez mediana (5,6 - 5,8) observados em outros Neossolos (ARRUDA, 2017; DUARTE, 2013; SOUCHIE, 2007). No entanto, estudos desenvolvidos por DUARTE (2013), BRITO et al (2005), GALVÃO & SALCEDO (2008) relatam que a aplicação de resíduos orgânicos (e.g., manipueira, vinhaça e esterco bovino) promovem incremento do pH do solo. Isto se deve ao fato de que, resíduos orgânicos independentemente da fonte são ricos em bases (e.g., Ca, Mg, e K). SOUZA et al. (2007) e FAGERIA (2001) relacionam o aumento do pH do solo com o incremento de bases no solo.

Com relação aos teores de P_w e P_{ext} , notou-se que o ambiente A possui maiores teores de P_w e P_{ext} (Figuras 2 e 3). Observa-se também que dentro do ambiente A, o tratamento A2 possui maiores teores de P_w ($14,45 \text{ mg kg}^{-1}$) e P_{ext} ($54,50 \text{ mg kg}^{-1}$) do solo. Dentro do ambiente B, o tratamento B1 dispõe de maiores teores de P_w ($11,52 \text{ mg kg}^{-1}$) e P_{ext} ($45,30 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figuras 2 e 3).

Esperava-se que as áreas adubadas no ano de coleta apresentassem maiores teores de P_{ext} e P_w . Porém constatou-se que a A2, possui maior teor de P_{ext} e P_w , quando comparada a A1, isto ocorreu devido o tratamento A2 ser uma amostra que foi adubada um ano antes da coleta de solo, logo evidencia-se que os nutrientes foram mineralizados

ao longo do ano, uma vez que os nutrientes presentes no esterco bovino são liberados lentamente durante o processo de mineralização, realizada pelos microrganismos (CARDOSO & ANDREOTE, 2016).

Já nos tratamentos do ambiente B observou-se que o tratamento B1 possui teores de P_{ext} e P_w ($45,30 \text{ mg kg}^{-1}$ e $11,51 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) superiores a B2, como são amostras de solo que passaram 5 anos sem adubação e apenas uma delas foi adubada 2 meses antes da coleta, nota-se que durante esse espaço de tempo houve a mineralização dos nutrientes.

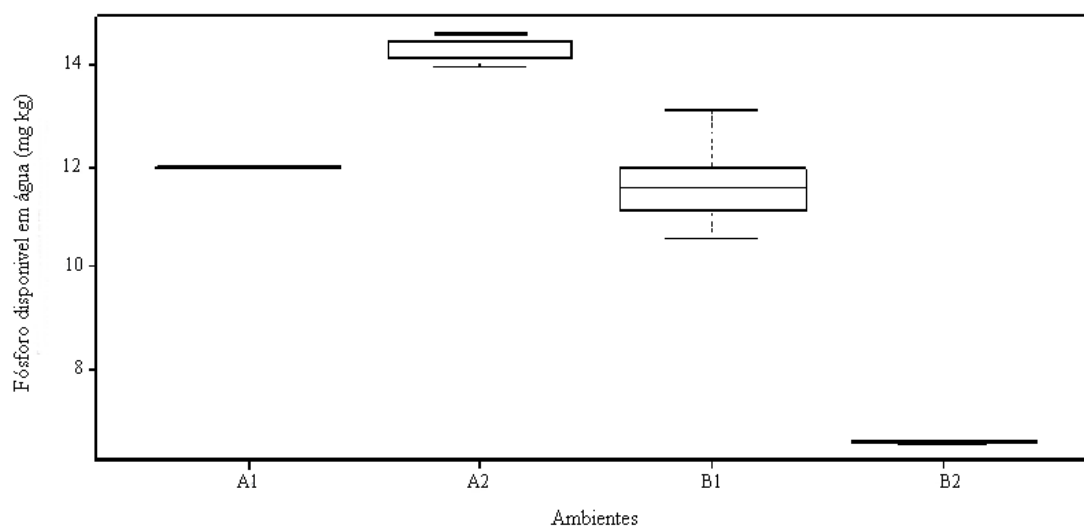


Figura 2: Teores de P extraído com água, em quatro amostras de solo submetidos a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança, PB, Brasil.

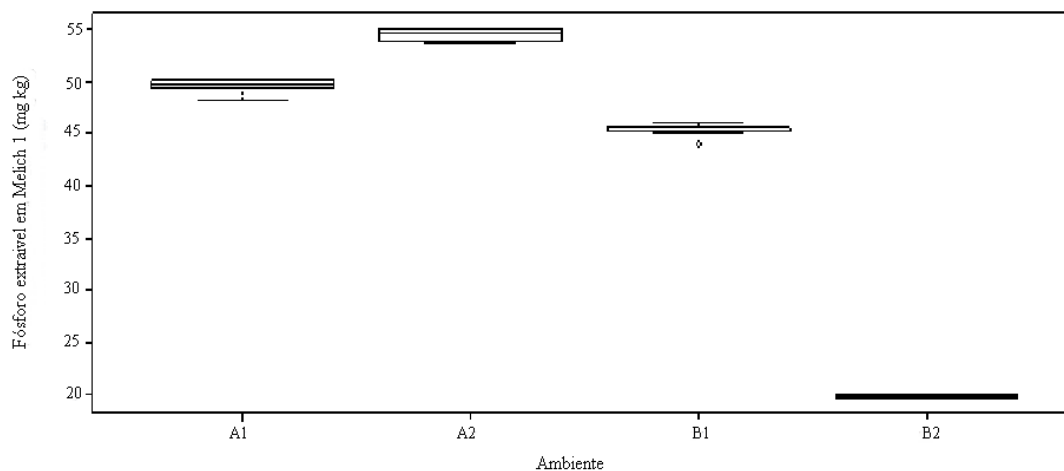


Figura 3: Teores de P extraído com Melich – 1 em quatro amostras de solo submetidos a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança - PB, Brasil.

Em condições naturais o Neossolo Regolítico é uma classe de solo que apresenta baixos teores de P, diferentemente dos teores encontrados no presente trabalho. Estudos realizados por ARRUDA et al. (2017) e DUARTE et al. (2013), com Neossolo Regolítico, apontam teores de P_{ext} abaixo de 5 mg kg^{-1} , teor este considerado baixo, podendo causar redução da produtividade da lavoura, porém, a quantidade de P_{ext} encontrada nas quatro amostras de solo da presente pesquisa foram consideradas propícias para o cultivo de culturas perenes e anuais (A1, A2, B1), podendo ser limitante ao cultivo de hortaliças (B2) (PREZOTTI & GUARÇONI, 2013).

Analisando os teores de Al_{di} verificou-se que o ambiente B apresentou um maior teor de Al_{di} , B1 com $0,489 \text{ mg kg}^{-1}$ e B2 com $0,736 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 4). Os teores de Al_{di} dos tratamentos A1 e A2 são semelhantes ($A1 = 0,319 \text{ mg g}^{-1}$ e $A2 = 0,311 \text{ mg g}^{-1}$). Em relação aos teores de Fe_{di} , os maiores teores foram encontrados nos tratamentos B1 = $0,781 \text{ mg g}^{-1}$ e B2 = $1,33 \text{ mg g}^{-1}$. Já os teores de Fe_{di} dos tratamentos A1 ($0,511 \text{ mg kg}^{-1}$) e A2 ($0,494 \text{ mg kg}^{-1}$) são semelhantes (Figuras 5 e 6).

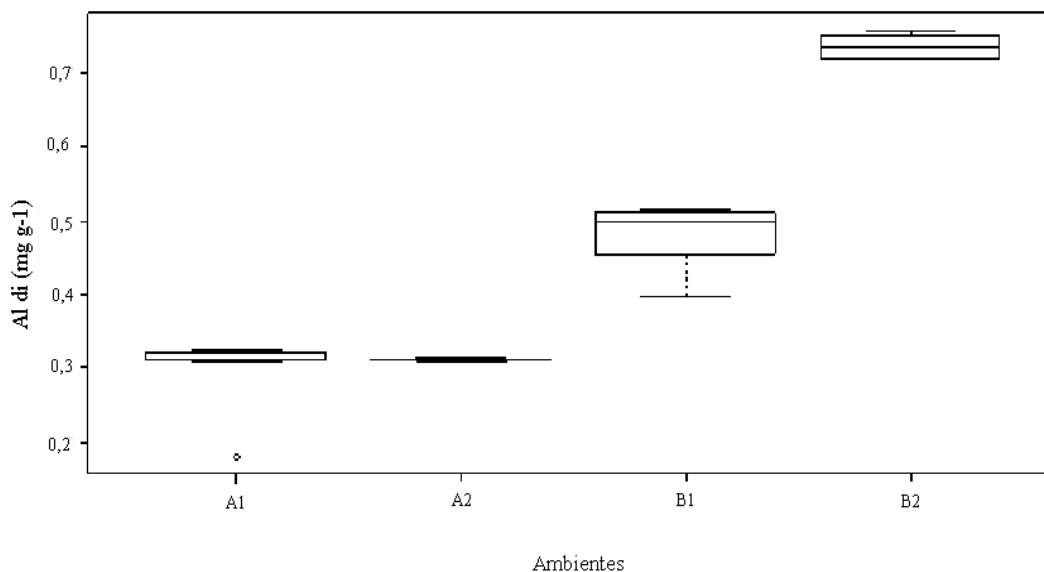


Figura 5: Teores de Alumínio extraído com ditonito em amostras de solo adubadas com esterco bovino curtido.

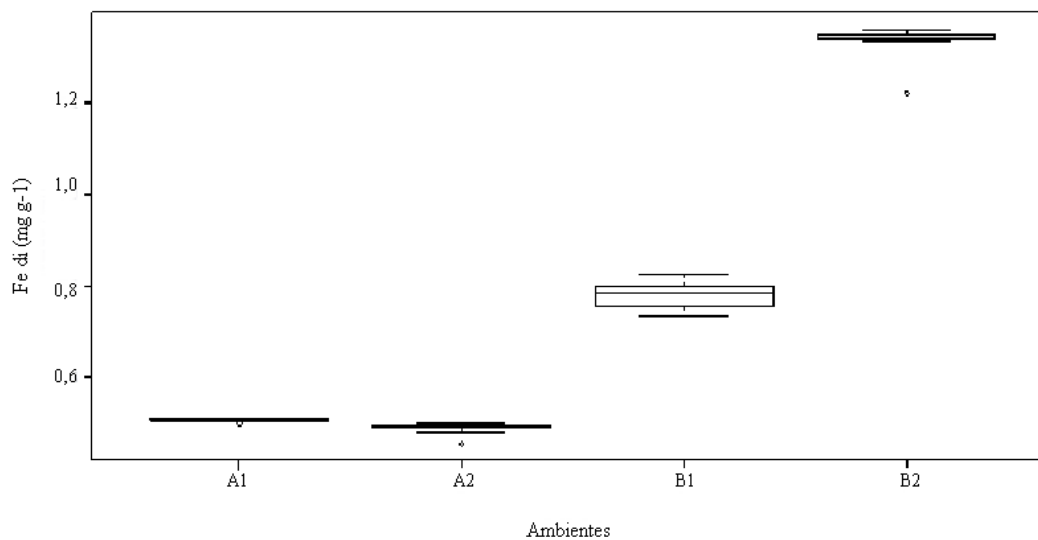


Figura 6: Teores de Ferro extraído com ditonito em amostras de solo adubadas com esterco bovino curtido.

No que se refere aos teores de Al_{ox} , os tratamentos A1 ($0,522 \text{ mg kg}^{-1}$) e A2 ($0,317 \text{ mg kg}^{-1}$) apresentaram maiores teores de Al_{ox} (Figura 7). Entre os tratamentos B1 ($0,316 \text{ mg kg}^{-1}$) e B2 ($0,061 \text{ mg kg}^{-1}$) notou-se uma grande diferença entre os teores de Al_{ox} . Sobre os teores de Fe_{ox} , o tratamento com maior teor de Fe_{ox} foi o A1 ($0,307 \text{ mg kg}^{-1}$), seguido pelos tratamentos B1 ($0,287 \text{ mg kg}^{-1}$); B2 ($0,267 \text{ mg kg}^{-1}$) e A2 ($0,165 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 8).

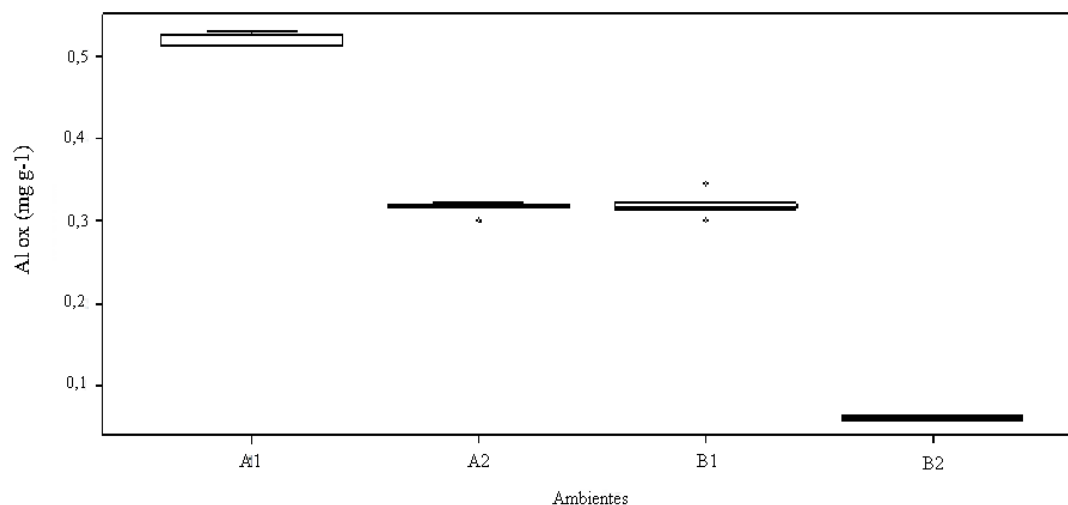


Figura 7: Teores de Alumínio extraído com oxalato em amostras de solo adubadas com esterco bovino curtido.

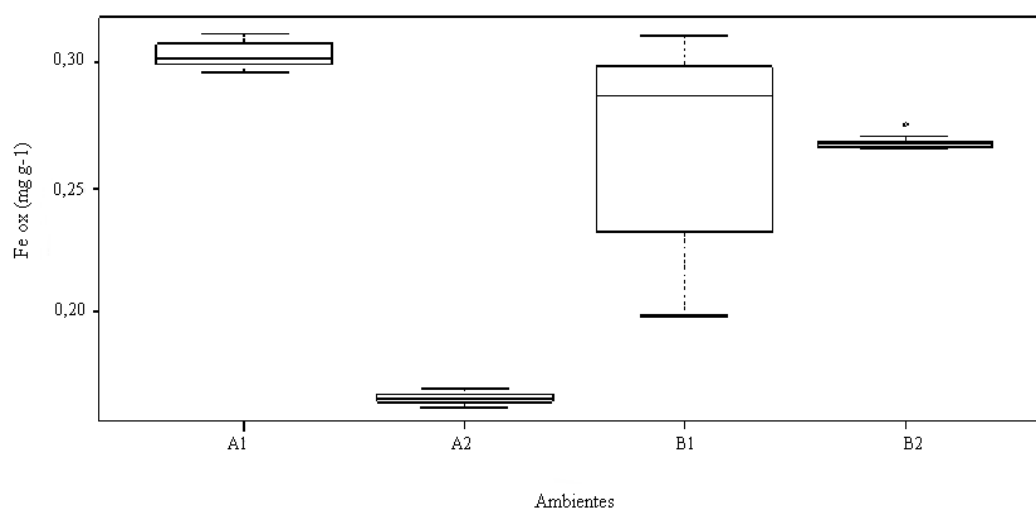


Figura 8: Teores de Ferro extraído com oxalato em amostras de solo adubadas com esterco bovino curtido.

Por se tratar de um Neossolo Regolítico de textura arenosa, com pouca quantidade de argila, este solo possui baixos teores de oxihidróxidos de Fe e de Al, estes teores corroboram com os teores de formas de ferro e alumínio encontrados por Santos (2015) ($Fe_{ox} = 0,800 \text{ mg g}^{-1}$, $Al_{ox} = 1,300 \text{ mg g}^{-1}$, $Fe_{di} = 0,500 \text{ mg g}^{-1}$, $Al_{di} = 0,900 \text{ mg g}^{-1}$) e Lima (2013) ($Fe_{ox} = 0,300 \text{ mg g}^{-1}$, $Al_{ox} = 0,150 \text{ mg g}^{-1}$) que também trabalharam com esta mesma classe de solo, sobre as mesmas condições ambientais.

Em todos os tratamentos, com exceção do tratamento B2, observou-se que os teores de Al_{ox} ($A1 = 0,522 \text{ mg g}^{-1}$; $A2 = 0,316 \text{ mg g}^{-1}$; $B1 = 0,316 \text{ mg g}^{-1}$) foram superiores aos teores de Fe_{ox} ($A1 = 0,307 \text{ mg g}^{-1}$; $A2 = 0,165 \text{ mg g}^{-1}$; $B1 = 0,287 \text{ mg g}^{-1}$). A substituição isomórfica de Fe por Al nas estruturas dos óxidos de Fe, é responsável pelos maiores teores de óxidos de Al em relação aos óxidos de Fe. De acordo com este mesmo autor, os óxidos de Fe com baixa cristalinidade como é o caso do Fe_{ox} possuem maior superfície específica, ocasionando uma maior interação com os íons de ortofosfato (VENDRAME, 2011).

Avaliando a ocorrência de formas de Fe em um Neossolo Litólico sob diferentes sistemas de uso Ferreira (2007) observou que não houve variação dos teores de Fe_{ox} e Fe_{di} entre a área de floresta e a área de lavoura, porém na área de pastagem foi observado os menores teores de Fe_{ox} e Fe_{di} , que segundo o autor foi ocasionado pelo baixo teor de argila na área, devido ao processo erosivo no solo da pastagem, evidenciando a relação entre os teores de Fe_{ox} e Fe_{di} e o teor de argila do solo, como também é relatado no trabalho de Lorenzon (2011).

As perdas de P, apresentaram maiores perdas na área A2, com perda total de $P = 128,83 \text{ mg L}^{-1}$, seguindo os tratamentos B1 com perda total de $P = 91,69 \text{ mg L}^{-1}$; A1 com $85,61 \text{ mg L}^{-1}$; e B2 com perda total de $P = 40,38 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 9).

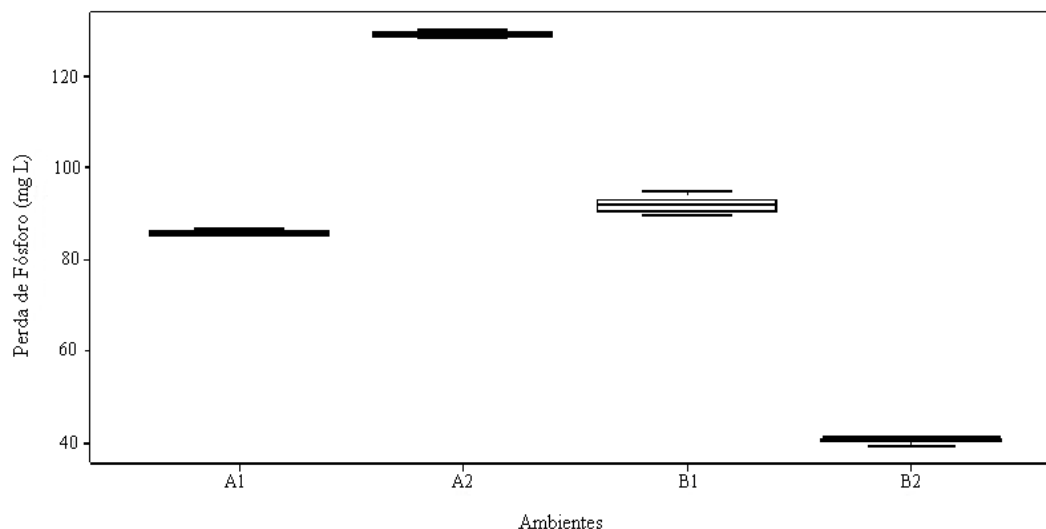


Figura 9: Perda total de fósforo durante o ensaio de lixiviação nos diferentes ambientes estudados submetidos a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança, PB, Brasil.

Comparando as figuras 2 e 3, que apresenta os teores de P_w e P_{ext} , com a figura 9, que mostra as perdas de P no ensaio de lixiviação, é possível ver que o tratamento com os maiores teores de P_{ext} e P_w , obteve também a maior perda de fósforo, tratamento A2.

Da mesma forma que o tratamento com menor perda de P tinha os menores teores de P_{ext} e P_w , tratamento B2. Constatou-se que os tratamentos A1 e B1 continham quantidades de P_w semelhantes (Figura 2), esses mesmos tratamentos apresentam uma pequena diferença em relação aos teores de P lixiviado (Figura 9).

O teor de P_{lix} (Figuras 10, 11, 12 e 13), apresentou correlação não significativa a 5% com os teores de Fe_{ox} , Fe_{di} , Al_{ox} e Al_{di} , supõem – se que outros fatores como pH do solo, teor de argila e mineralogia do solo estejam atuando sobre a adsorção de P no solo. Os teores de P_{lix} apresentaram correlação negativa com os teores de Fe_{ox} , Fe_{di} e Al_{di} e correlação positiva apenas com o teor de Al_{di} . Nota-se que o P_{lix} tem maior correlação com as formas de Fe e Al mais cristalinas (Fe_{di} e Al_{di}), semelhante aos resultados encontrados por Vilar (2010) que observou em seu estudo que a adsorção de P no solo está mais relacionada com as formas mais cristalinas de Fe e Al (Fe_{di} e Al_{di}) do que com as formas menos cristalinas (Fe_{ox} e Al_{ox}).

De acordo com Kleinman et al. (2017) as formas menos cristalinas $Fe_{(ox)}$ e $Al_{(ox)}$ influenciam diretamente na CMAP, do que as formas livres por apresentar uma alta superfície específica e uma alta interação do fosfato com a solução. A sorção de P em solos tropicais úmidos, foram influenciados com os altos teores de argila e de óxidos de Fe e Al cristalinos e não cristalinos em geral, principais componentes responsáveis pela adsorção de P (CAMPOS et al., 2016).

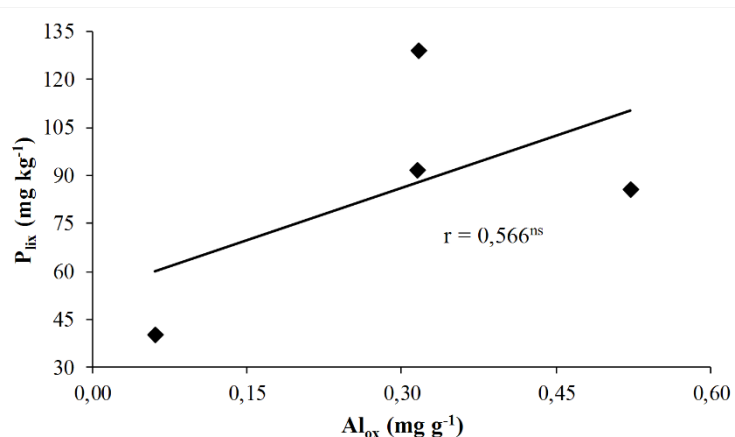


Figura 10: Correlações entre o teor de P_{lix} e os teores de Al extraído com oxalato

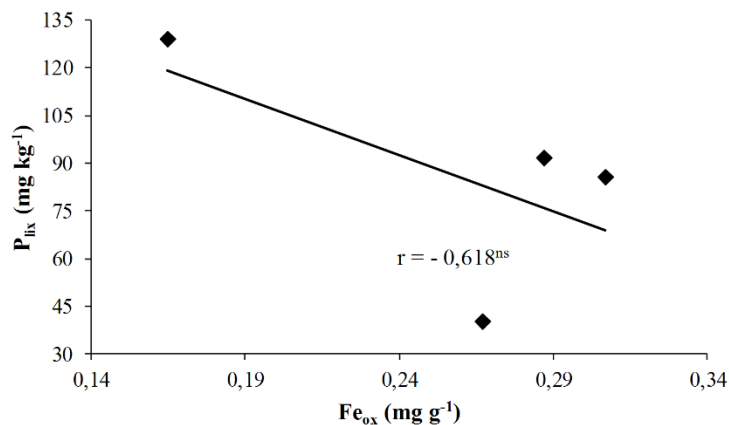


Figura 11: Correlações entre o teor de P_{lix} e os teores de Fe extraído com oxalato

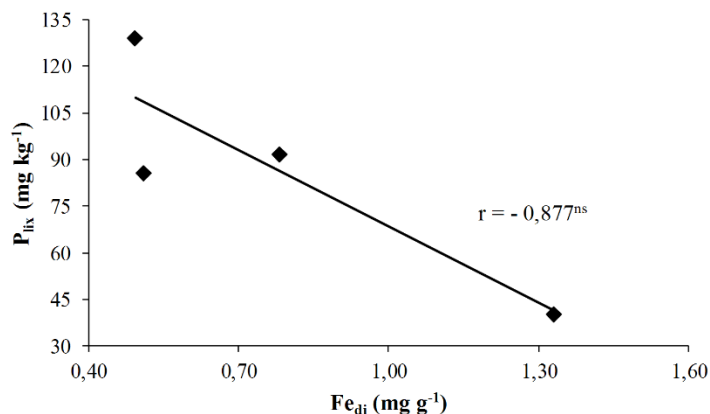


Figura 12: Correlações entre o teor de P_{lix} e os teores de Fe extraído com ditonito

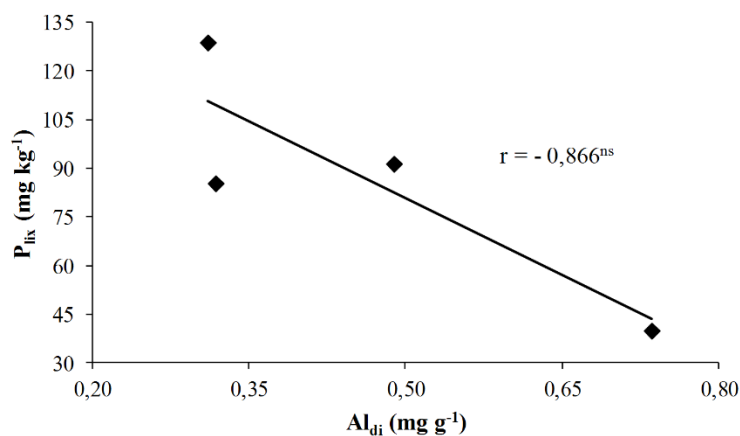


Figura 13: Correlações entre o teor de P_{lix} e os teores de Al extraído com ditonito

As formas de Fe e Al estão diretamente relacionadas com a adsorção de P no solo, logo solos com alta capacidade de adsorção de P possuem menores perdas de P por lixiviação (LIMA, 2012).

Gonçalves (2011) estudou a relação entre a adsorção de P com teores de Fe_{ox}, Fe_{di}, teor de argila e de matéria orgânica do solo e concluiu que a adsorção de P pelo solo está mais relacionada com os teores de Fe_{ox} e Fe_{di}. Broggi (2011) estudou quatro amostras de solo com diferentes constituições mineralógicas e concluiu que quanto maior o teor de alumínio no solo maior será a sua capacidade de adsorção de P.

Em todos os tratamentos A1, A2, B1, B2 a maior parte do P removido durante o ensaio de lixiviação ocorreu até 20 NVp (número de volume de poros) (Figuras 14 e 15).

Levando em consideração que a precipitação média anual do município onde o solo foi coletado é de 610 mm, estima-se que as chuvas que caem ao longo de um ano podem

ser o suficiente para remover parte do P que se encontra na camada 0 – 10 cm. Após o 10 NVp ocorre a redução da velocidade do deslocamento miscível de P.

Estudos mostraram que adubação a longo prazo com esterco pode promover mudanças na adsorção do fósforo, influenciando seu deslocamento vertical (DEL CAMPILLO et al., 1999; SILVA & MENEZES, 2007; OJEKAMI et al., 2011; ABDALA et al., 2012; BHATTACHARYYA et al., 2015).

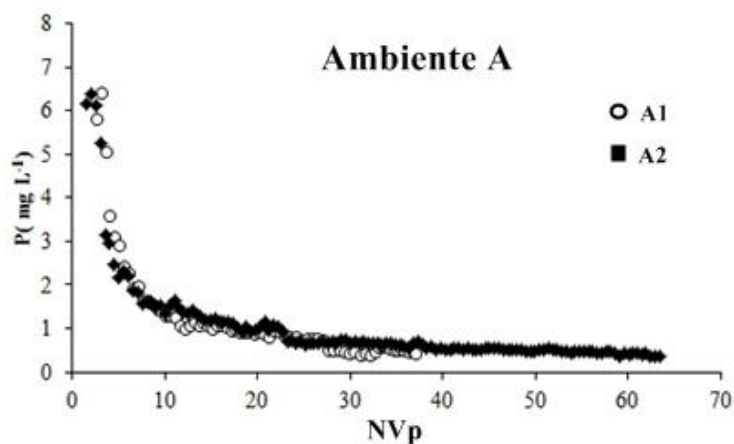


Figura 14: Deslocamento miscível de fósforo no ambiente A submetido a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança, PB, Brasil.

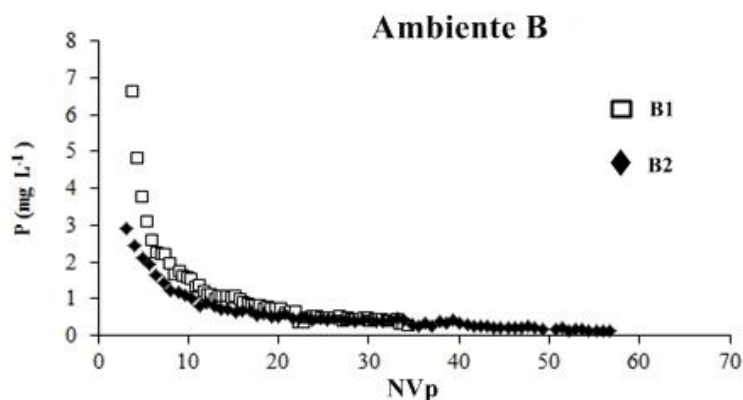


Figura 15: Deslocamento miscível de fósforo no ambiente B submetido a diferentes frequências e uso de esterco bovino curtido em Neossolo Regolítico, Esperança, PB, Brasil.

Segundo Galvão (2008) o esterco possui P nas formas orgânicas e inorgânicas e ambas as formas podem ser lixiviadas, sendo que o P orgânico é mais passível de perda por lixiviação, pois possui uma menor interação com as partículas do solo.

O adubo fosfatado comercial por ser de mais fácil solubilização quando comparado ao adubo orgânico, favorecem a perda de P por lixiviação em um menor espaço de tempo (BERTOL, 2010).

Avaliando as perdas de P em um Neossolo Regolítico em amostras de solo de diferentes profundidades, observaram que nas camadas mais profundas dessa classe de solo possuíam maiores teores de óxidos de Fe e Al, o que fazia com que a perda de P nessas camadas fosse menor do que a perda de P da camada superficial (LIMA, 2012).

O deslocamento vertical de P além do alcance das raízes, ocorre em consequência do seu acúmulo no solo. Este fato, além de representar uma perda econômica para o agricultor, pode tornar-se um problema ambiental devido à possível contaminação de águas subterrâneas (GALVÃO et al. 2008; LEE & AO, 2013; BOL et al., 2016).

CONCLUSÕES

As maiores perdas por lixiviação de P foram encontradas nas áreas que receberam adubação contínua.

Independente da adubação com esterco bovino, os oxihidróxidos de Fe e Al contribuíram com a redução da lixiviação do P nas áreas de Neossolos Regolíticos.

REFERÊNCIAS

AESA - Agencia Executiva de Gestão das Águas do Estado Paraíba, da. **Monitoramento Pluviométrico.** Disponível em: <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/monitoramentoPluviometria.do?metodo=listarChuvasnuaisAtual>>. Acesso em: 30 fev. 2018.

ARAUJO, R. O. A. et al. Agricultura às margens da Rodovia BR-230 no Estado da Paraíba, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró - Rn, v. 7, n. 3, p.24-32, jul. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. V. 1. Recife: Sudene, 1973, 359p. (Boletim Técnico, 26).

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. suplemento, 2005.

CARDOSO, Elke Jurandy Bran Nogueira; ANDREOTE, Fernando Dini. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba - Sp: Esalq, 2016. 218 p.

CAMPOS, M. ANTONANGELO, J. A.; ALLEONI, L. R. F.; Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil e Tillage Research**, n. 156, p. 110 – 118, 2016.

DUARTE S., Anamaria et al. Alterações dos atributos físicos e químicos de um Neossolo após aplicação de doses de manipueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 9, 2013.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Solos do Nordeste**. Recife - Pe: Embrapa Solos, 2014. 16 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília – DF : Embrapa Solos, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H.C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5ª edição. Revista e Ampliada. Embrapa, p. 1 – 590, 2018.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; DE OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 99-105, 2008.

GIRACCA, E. M. N.; NUNES, J. L. da S. **Fertilizantes** : Fósforo (P). Disponível em:<http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes_fosforo.aspx>. Acesso em: 27 jan. 2017.

KLEINMAN, P. J.A. The Persistent Environmental Relevance of Soil Phosphorus Sorption Saturation. *Current Pollution Reports*. n. 3, p.141–150, 2017.

LEE, Y.; OA, SW. Nutrient transport characteristics of livestock manure in a farmland. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2:1, 2013.

LIMA, P. A. **TRANSPORTE DE FÓSFORO EM SOLO ARENOSO ADUBADO COM ESTERCO BOVINO**. 2012. 85 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-pe, 2012.

LOPES, A. S. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. 2. ed. Piracicaba - Sp: Potafos, 1998.

MACHADO, V. J.; DE SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Bioscience Journal*, v. 28, n. 1, 2012.

MENEZES, R. S. C; SALCEDO, I. H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.11, n.4, p.361-367, 2007.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, Evangraf, 2010. 4^a ed. 266p.

MISSONG, A.; BOL, R.; NISCHWITZ, V.; KRÜGER, J.; LANG, F.; SIEMENS, J.; KLUMPP, E. Phosphorus in water dispersible-colloids of forest soil profiles. Springer. *Plant Soil*.v. 427, p. 71–86, 2018.

McKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. **Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils**. Can. J. Soil Sci., 46: 13-22, 1966.

MURPHY, J. & RILEY, J.P. A Modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Oxford, v.27, n.1, p.31-36, 1962.

NASCIMENTO, J. A. M. et al. Macronutrientes na cultura da melancia cultivada em Neossolo com esterco bovino. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife - Pe, v. 10, n. 2, p.224-229, jan. 2015.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. 1017p.

NOVAIS, S. V.; MATTIELL, E. M.; VERGUTZ, L.; MELO, L. C. A.; FREITAS, I. F.; NOVAIS, R. F. Loss of extraction capacity of mellich-1 and Monocalcium phosphate as a variable of remaining P and its relationship to critical levels of soil phosphorus and sulfur. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.39, p.1079-1087, 2015.

OLIVEIRA, A. A. S. **Efeito da concentração de fósforo da solução de equilíbrio utilizada para análise do fósforo remanescente em solos da região nordeste do Brasil Mossoró**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró – Rn, 2017.

OLIVEIRA, F. F.; SALCEDO, I. H.; GALVÃO, S. R. Adubação orgânica e inorgânica de batatinha em solos arenosos: Produtividade, nutrientes na planta e lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1228-1234, 2011.

OLIVEIRA, M. F. M. de et al. Estimativa do potencial de perda de fósforo através da metodologia “P Index”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - Pb, v. 14, n. 3, p.267-273, jan. 2010.

PINTO, Flávio Araújo. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de cerrado**. 2012. 47 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Jataí - Goiás, 2012.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. **GUIA DE INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISE DE SOLO E FOLIAR**. Vitória - Es: Incaper, 2013. 104 p.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais.** NBL Editora, 2002.

RAIJ, B. V.. **Fertilidade do solo e adubação.** São Paulo - Sp: Agronômica Ceres Ltda, 1991. 343 p.

ROLIM NETO, F. C. et al. **Adsorção De Fósforo, Superfície Específica E Atributos Mineralógicos Em Solos Desenvolvidos De Rochas Vulcânicas Do Alto Paranaíba (Mg):** Seção Ii - Química E Mineralogia Do Solo. 28. ed. [S.l.]:Revista Brasileira de Ciência do Solo, 953-964 p. 2004.

SANTOS, D. R.; COLPO GATIBONI, L.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, 2008.

SANTOS, J. C. B. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, São Paulo - Sp, v. 36, n. 3, p.683-696, 2012.

SANTOS, J. Z. **TRANSPORTE DE FÓSFORO EM SOLO ARENOSO ADUBADO COM ESTERCO.** 2015. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Areia - Pb, 2015.

SCOPEL, I. et al. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E POTENCIAL DE USO DE SOLOS MUITO ARENOSOS NOS CERRADOS (SAVANAS) DO BRASIL. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia - Go, v. 33, n. 2, p.203-219, maio 2013.

SCHWERTMANN, U. **Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung.** Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd, 105: 194-202, 1964.

SILVA, S. M. S. e et al. Características físicas e químicas de um Neossolo Regolítico Eutrófico do Agreste pernambucano. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, XXXIV., 2013, Florianópolis - SC. **Características físicas e químicas de um Neossolo Regolítico Eutrófico do Agreste pernambucano.** [S.l.: s.n.], 2013. p. 1-4. Disponível

em:<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/965331/1/caracteristicaquimicaefisica.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2017.

SIMS, J.T.; SIMARD, R.R.; JOERN, C.B. Phosphorus losses in agricultural drainage: Historical perspective and current research. **Journal Environmental Quality**. v.27, p.277-293, 1998.

SOUCHIE, E. L.; DE SOUZA ABOUD, A. C. Solubilização de fosfato por microrganismos rizosféricos de genótipos de Guandu cultivados em diferentes classes de solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, n. 1, 2007.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. Cap.5, p.205-275.

SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.R.F. & BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:975-983, 2006.

TARKALSON, D. D.; LEYTEM, A. B. Phosphorus mobility in soil columns treated with dairy manures and commercial fertilizer. **Soil Science**, v.174, p.73-80, 2009.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (UFRGS. Boletim Técnico; 5).

TOOR, G. S.; SIMS, J. T. Managing Phosphorus Leaching in Mid-Atlantic Soils: Importance of Legacy Sources. *Advancing Critical Zone Science*. P. 1-12, 2015.

VENDRAME, Pedro Rodolfo Siqueira; EBERHARDT, Diogo Néia; RODRIGUES, Osmar. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado Iron and aluminum forms and their relationship with texture, mineralogy and organic carbon in the Cerrado Oxisol. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. suplemento 1, p. 1657-1666, 2011.

WHITE, R. E. Princípios e práticas da ciência do solo. 4. ed. São Paulo - Sp: Andrei Editora Ltda, 2009.

Recebido em 30/9/2019. Aceito em 13/11/2019.

Sobre os autores:

Kalline de Almeida Alves Carneiro - Doutora em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus II, Areia, PB, Brasil.

Contato: kallinequimica2014@gmail.com

Marianne Costa de Azevedo - Mestranda pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus II, Areia, PB, Brasil.

Contato: mariagro13@gmail.com

Vânia da Silva Fraga - Departamento de Solos e Engenharia Rural, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Areia, PB, Brasil.

Contato: vanciasfraga@gmail.com

Bruno de Oliveira Dias - Departamento de Solos e Engenharia Rural, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Areia, PB, Brasil.

Contato: b2dias@yahoo.com.br

Tancredo Augusto Feitosa de Souza - PNPd do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Areia, PB, Brasil.

Contato: tancredo-agro@hotmail.com

Marcus Metri Corrêa - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Contato: marcus.metri@gmail.com

Antônio Celso Dantas Antonino - Universidade Federal de Pernambuco.

Contato: acdantonino@gmail.com

Ignácio Hernán Salcedo - Departamento de Solos e Engenharia Rural, Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Areia, PB, Brasil. “Em Memória”.