

Efeito residual do fósforo numa sequência cultural por valorização agrícola de uma lama de ETAR

Residual phosphorus effects on sequential crops by agricultural valorization of sewage sludge

Cristina Sempiterno*, Rui Fernandes e Inês Bártolo

INIAV- Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária. Unidade Estratégia de Investigação e Serviços de Sistemas Agrários e Florestais e Sanidade Vegetal. Tapada da Ajuda, Apartado 3228 1301-903 Lisboa, Portugal
(*E-mail: cristina.sempiterno@iniav.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.20394>
Recebido/received: 2020.06.18
Aceite/accepted: 2020.09.30

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a disponibilização de fósforo residual após aplicação ao solo de uma lama de ETAR, utilizando uma sequência de duas culturas, milho (*Zea mays* L.) e azevém (*Lolium multiflorum* L.). O ensaio foi realizado em vasos, em ambiente condicionado e foi delineado em blocos completos casualizados, com três repetições e treze tratamentos experimentais: um tratamento testemunha, sem aplicação de fósforo; quatro tratamentos com níveis crescentes de fósforo veiculado por uma lama de ETAR; quatro tratamentos com níveis crescentes de fósforo veiculado pelo fosfato de cálcio; quatro tratamentos com os mesmos níveis crescentes de fósforo veiculado pela mistura proporcional de lama e fosfato de cálcio. Verificou-se que, ao contrário do observado na primeira cultura (milho), a aplicação da quantidade máxima de lama, equivalente a 120t/ha, causou um aumento significativo da produção do azevém. A recuperação aparente de fósforo, ou seja a percentagem de P absorvido do total que foi aplicado, foi muito superior na segunda cultura, em todos os tratamentos experimentais, o que demonstra a importância do seu efeito residual.

Palavras-chave: fósforo residual, lama de depuração, recuperação aparente.

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the availability of residual phosphorus delivered by the application of sewage sludge to the soil using a two crops sequence, maize (*Zea mays* L.) followed by ryegrass (*Lolium multiflorum* L.). The experiment was carried out in pots in a conditioned environment. A randomized complete block design was used, with three replicates, and thirteen experimental treatments as follows: (i) control, without phosphorus supply; (ii) four treatments with increasing levels of phosphorus supplied through sewage sludge; (iii) four treatments with increasing levels of phosphorus supplied through calcium phosphate and (iv) four treatments with the same levels of phosphorus but supplied through sludge plus calcium phosphate. The observed results show that the first crop (maize) reduced the biomass by maximum addition of sludge (equivalent to 120 t / ha), whereas a significant increase was observed for total ryegrass biomass. Apparent phosphorus recovery, meaning the percentage of absorbed P (in relation to the applied quantities) , was much higher in the second crop in all experimental treatments, showing the potential residual effect of this element in the soil.

Keywords: residual phosphorus, sewage sludge, apparent recovery.

INTRODUÇÃO

No modelo de economia circular, baseado na valorização de materiais dentro de um sistema fechado, a aplicação de lamas, provenientes de estações de tratamento de águas residuais ao solo agrícola apresenta-se como uma via de escoamento privilegiada, face ao destino final em aterro ou incineração, devido ao potencial que oferece para reciclar componentes valiosos, como sejam a matéria orgânica e diversos nutrientes nelas presentes, como por exemplo o azoto (N), o fósforo (P) e o cálcio (Ca). Com efeito, a correta utilização de lamas na agricultura, quando adequadamente tratadas (digestão aeróbia, digestão anaeróbia e desidratação, compostagem, entre outros processos) podem contribuir para a resolução de um problema ambiental e para o aumento da fertilidade do solo (Soveral Dias, 2004).

O fósforo é um elemento essencial para a nutrição das plantas, fazendo parte da composição de compostos fundamentais para o seu metabolismo. Entra na cadeia trófica após ser mineralizado no solo, sendo absorvido pelas plantas, através das raízes, na forma de ião ortofosfato primário (H_2PO_4^-) ou secundário (HPO_4^{2-}) (Tisdale *et al.*, 1985; Varennes, 2003; Santos, 2015), i.e., na forma inorgânica (Pi). A falta de disponibilidade deste elemento no solo limita a produção agrícola. Uma adequada nutrição em P contribui para a melhoria de vários aspetos fisiológicos como sejam a fotossíntese, a floração, a frutificação e maturação, a fixação simbiótica do N, bem como o crescimento das raízes (Mengel e Kirkby, 2001; Brady e Weil, 2002; Chalk *et al.*, 2010; Boucho *et al.*, 2019).

É sabido que apenas parte do P adicionado ao solo através de fertilizantes minerais ou orgânicos é absorvido pelas plantas no ano da sua aplicação. A maior parte do P aplicado está sujeita a reações de adsorção e de precipitação, lixiviação e percolação no solo. A parte adsorvida está em equilíbrio com o P da solução do solo, compensando as remoções do elemento pela absorção das plantas (Brady & Weil, 2002; FAO, 2008). Além das características dos fertilizantes fosfatados, as condições edafoclimáticas e as espécies vegetais têm um impacto decisivo na solubilidade do P e, conseqüentemente, na eficácia dos fertilizantes (Mengel & Kirkby, 2001). Relativamente a este

nutriente, existem três grandes problemas de fertilidade do solo. Assim, (i) a sua concentração na solução do solo é geralmente baixa; (ii) a maior parte do P presente no solo encontra-se em formas indisponíveis para as plantas, e (iii) as formas de P solúvel, adicionadas ao solo através de adubos e/ou corretivos orgânicos são geralmente adsorvidas na fração sólida do solo, resultando, assim, em formas menos disponíveis para as plantas (Brady & Weil, 2002; FAO, 2008).

Por outro lado, muitos estudos têm suscitado preocupação sobre o esgotamento das reservas mundiais de P proveniente de rochas fosfatadas. Vários autores referem que estas podem ser esgotadas nos próximos 50 a 100 anos (Smit *et al.*, 2009; Childers *et al.*, 2011). Segundo Cordell (2010), a partir de 2035 a procura deste elemento vai exceder a oferta. Além disso, a indústria de fertilizantes reconhece que a quantidade das reservas está em declínio e o custo de extração, processamento e transporte tem aumentado (Cordell *et al.*, 2009; Sattari *et al.*, 2012). Com tudo isto, a reciclagem ganha importância e os países desenvolvidos exploram novas tecnologias para este efeito. Assim, o recurso à reciclagem de lamas de ETAR e outros resíduos contendo P, pode ser uma das formas alternativas de obtenção deste nutriente. No entanto, a reutilização de lamas de ETAR na agricultura pode trazer alguns riscos como seja a presença de metais pesados indesejados, poluentes orgânicos e/ou agentes patogénicos, resíduos farmacêuticos, etc.. Além disso, a sua distribuição nos solos agrícolas apresenta algumas dificuldades logísticas, dado que as grandes quantidades são produzidas em cidades e as terras aráveis, disponíveis a uma distância razoável, são limitadas (Childers *et al.*, 2011; Cohen *et al.*, 2011).

Em virtude do P apresentar um valor de recuperação pela planta reduzido, faz com que exista uma acumulação, ao longo do tempo, do P retido no solo, constituindo o que se designa de P residual (Cohen *et al.*, 2011). No período 1965-2007, na Europa, registou-se uma acumulação média de cerca de 755 kg ha^{-1} de P nos solos (Sattari *et al.*, 2012).

O presente trabalho, desenvolvido no Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. (INIAV), teve como objetivo avaliar as quantidades

de P disponibilizadas a uma sequência de duas espécies forrageiras, uma de primavera-verão, o milho (*Zea mays* L.), e uma de outono-inverno, o azevém (*Lolium multiflorum* L.), através da aplicação ao solo de quantidades crescentes de uma lama de ETAR, quando comparada com a aplicação das mesmas quantidades de P nas formas de fosfato de cálcio e da mistura proporcional de lama com o citado adubo.

Avaliaram-se as respostas das culturas em termos de produtividade e quantidade de P exportado e recuperado pelas plantas teste, e os teores de P disponível presentes no solo antes da sementeira da segunda cultura, determinados por dois métodos distintos.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio decorreu sob ambiente condicionado no Horto Químico Agrícola Boaventura de Azevedo, utilizando vasos de polietileno branco preenchidos com 4,5 kg de terra. Foi delineado em blocos completos casualizados com 3 repetições, tendo sido considerados 13 tratamentos experimentais (T1 a T13). Um tratamento testemunha, sem aplicação de P mineral ou orgânico (T1), quatro tratamentos com níveis crescentes de lama (T2 a T5 correspondendo, respetivamente, à aplicação de 0,121; 0,245; 0,364 e 0,485 g P/vaso o que corresponde a valores entre 80 e 320 kg P/ha e a valores equivalentes a 30, 60, 90 e 120 t lama ha⁻¹), quatro tratamentos com níveis crescentes de fosfato de cálcio, com um grau de pureza *pro analyse* (T6 a T9), fornecendo a mesma quantidade de fósforo total por vaso provida em T2 a T5, e quatro tratamentos constituídos por níveis crescentes de fósforo veiculados, em partes iguais, pela mistura de lama e fosfato de cálcio (T10 a T13) (Quadro 1).

A terra utilizada no ensaio em vasos proveio de uma macro amostra colhida na camada superficial (0-20 cm) de um *Arenossolo dístrico* – ARdy, segundo a classificação de IUSS Working Group WRB (2015), da região de Alpiarça (39°13'00"N, 08°33'20"W), cujas principais características físico-químicas se apresentam no Quadro 2.

Trata-se de um solo arenoso, muito pobre em matéria orgânica e em nutrientes, ácido, pouco

Quadro 1 - Quantidade de fósforo (P) veiculado pela lama e/ou pelo fosfato de cálcio adicionados ao solo em cada tratamento experimental

Tratamentos experimentais	Nível de P	P veiculado pela lama (g/vaso)	P veiculado pelo fosfato de cálcio (g/vaso)	P total fornecido (g/vaso)
T1	0	0	0	0
T2	1 L	0,121	0	0,121
T3	2 L	0,245	0	0,245
T4	3 L	0,364	0	0,364
T5	4 L	0,485	0	0,485
T6	1 F	0	0,121	0,121
T7	2 F	0	0,245	0,245
T8	3 F	0	0,364	0,364
T9	4 F	0	0,485	0,485
T10	1/2 L+ 1/2F	0,061	0,061	0,122
T11	1L + 1 F	0,121	0,121	0,242
T12	3/2L + 3/2F	0,182	0,182	0,364
T13	2L + 2F	0,245	0,245	0,490

L- Dose de lama; F- dose de fertilizante mineral.

saturado e de muito baixa capacidade de troca catiónica sendo, por isso, um tipo de solo adequado à realização de ensaios em vaso, em que se pretende obter respostas à aplicação de fertilizantes num curto período de tempo.

Os teores de metais pesados determinados neste solo são inferiores aos limites máximos estabelecidos no DL n.º 276/2009 (MAOTDR, 2009), de 2 de outubro, para a utilização de lamas de depuração em solos agrícolas.

A lama aplicada era proveniente da ETAR de Beírolas, localizada no Parque das Nações em Lisboa e resulta do tratamento de efluentes urbanos (70%) e industriais (30%), procedentes da zona Oriental de Lisboa e parte do concelho de Loures. Nesta ETAR faz-se o aproveitamento energético do biogás da lama, submetendo-a a uma digestão anaeróbia e posterior desidratação. No Quadro 3 apresenta-se a composição da citada lama desidratada, determinada no Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva (LQARS), do INIAV. A lama apresenta as seguintes características: humidade = 19%, pH = 12, matéria orgânica = 644 g kg⁻¹, N = 73 g kg⁻¹, P = 15590 mg kg⁻¹ e Ca = 87336 mg kg⁻¹. Os teores em metais pesados são muito inferiores aos limites máximos estabelecidos na legislação para utilização em solos agrícolas (DL n.º 276/2009) e, em termos microbiológicos,

Quadro 2 - Características físico-químicas da amostra de solo utilizada no ensaio

Características			Características		
Areia	(%)	92,3	Acidez de troca	(cmol(+). kg ⁻¹)	1,1
Limo	(%)	4,9	SBT	(cmol(+). kg ⁻¹)	0,58
Argila	(%)	2,9	CTC	(cmol(+). kg ⁻¹)	1,68
Classificação textural		Arenosa	GSB	(%)	34,7
pH _{H2O}		5,4	Fe ext.	(mg. kg ⁻¹)	8
Nec. Cal	(t CaCO ₃ . ha ⁻¹)	2	Mn ext.	(mg. kg ⁻¹)	<2,5
N total	(g.kg ⁻¹)	0,25	Zn ext.	(mg. kg ⁻¹)	<0,10
CE	(mS. cm ⁻¹)	0,01	Cu ext.	(mg. kg ⁻¹)	2,7
MO	(g. kg ⁻¹)	3,5	B ext.	(mg. kg ⁻¹)	<0,20
P ₂ O ₅ ext.	(mg. kg ⁻¹)	11	Cd "total"	(mg. kg ⁻¹)	<0,05
K ₂ O ext.	(mg. kg ⁻¹)	13	Cu "total"	(mg. kg ⁻¹)	14,6
Mg ext	(mg. kg ⁻¹)	17	Ní "total"	(mg. kg ⁻¹)	1,8
Bases de troca			Pb "total"	(mg. kg ⁻¹)	2,8
Ca	(cmol(+). kg ⁻¹)	0,41	Zn "total"	(mg. kg ⁻¹)	3,6
Mg	(cmol(+). kg ⁻¹)	0,14	Hg "total"	(mg. kg ⁻¹)	0,006
K	(cmol(+). kg ⁻¹)	0,03	Cr "total"	(mg. kg ⁻¹)	1,9
Na	(cmol(+). kg ⁻¹)	0,01	MV _{ap}	(g. cm ⁻³)	1,65

Nec. Cal - necessidade de cal; CE - condutividade elétrica; MO - matéria orgânica; ext. - extraível; SBT - soma das bases de troca; CTC - capacidade de troca catiônica; GSB - grau de saturação de bases; MV_{ap} - massa volúmica aparente

revela ausência de *Salmonella* spp. e valores de *E. coli* inferiores a 1000 células/g de matéria fresca.

No ensaio, o milho (*Zea mays* L.) foi semeado como primeira cultura e colhido 45 dias após a sementeira, e o azevém (*Lolium multiflorum* L.) foi semeado como segunda cultura e sujeito a 4 cortes. Durante o ensaio, o teor de humidade do solo dos vasos foi mantido a 60-70% da capacidade máxima de retenção de água.

De modo a evitar a ocorrência de outros fatores limitantes ao desenvolvimento das plantas, antes da sementeira das duas culturas foi efetuada uma fertilização mineral igual em todos os vasos, veiculando os nutrientes N, K, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu e B em solução nutritiva. A aplicação de N, na forma de nitrato de amónio, foi fracionada em 3 aplicações, em ambas as culturas. A lama e a solução nutritiva, aplicadas antes da sementeira, foram incorporadas e homogeneizadas com a terra,

Quadro 3 - Caracterização da lama desidratada, da ETAR de Beirilhos, utilizada no ensaio

Características			Características			Valores limite	
MS	(%)	19	Ni	(mg kg ⁻¹)	43	300	
pH _{H2O}		12	Zn	(mg kg ⁻¹)	680	2500	
CE	(mS cm ⁻¹)	2,0	Cr	(mg kg ⁻¹)	18,5	1000	
MO	(g kg ⁻¹)	644	Pb	(mg kg ⁻¹)	20,6	750	
N total	(g kg ⁻¹)	73,9	Cd	(mg kg ⁻¹)	2,8	20	
P	(mg kg ⁻¹)	15590	Cu	(mg kg ⁻¹)	157	1000	
K	(mg kg ⁻¹)	1909	Hg	(mg kg ⁻¹)	1	16	
Ca	(mg kg ⁻¹)	87336	C/N		4,8		
Mg	(mg kg ⁻¹)	3558	<i>E. coli</i>	(células/g de MF)	<1000	<1000	
Na	(mg kg ⁻¹)	1200	<i>Salmonella</i> spp.	(células/g de MF)	ausente	ausente	

Valores referidos à matéria seca (MS), com exceção do pH, CE e *E. coli* e *Salmonella* que são referidos à matéria fresca (MF), os valores limite são os dispostos no DL n.º 276/2009.

nas quantidades previstas para cada tratamento experimental.

Para a análise ao solo e ao material vegetal recorreu-se aos métodos laboratoriais utilizados no INIAV – Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva (INIAV, I.P., 2016). As análises efetuadas à lama basearam-se nas características e normas de referência estipuladas no DL n.º 276/2009.

Antes da sementeira e após o último corte do azevém colheram-se amostras de solo em cada vaso, e analisaram-se, entre outras características, os teores de P extraível por lactato de amónio (método de *Egnér-Riehm* (ER)) (Egnér *et al.*, 1960) e por água (1:5) (Buurman *et al.*, 1996).

Avaliou-se a exportação de fósforo total (P_{exp}) pelas plantas de milho e azevém e a recuperação aparente de P (RAP), através das seguintes fórmulas de cálculo propostas por Mengel & Kirkby (2001) (valores referidos à matéria seca):

P_{exp} = Produção de biomassa da parte aérea × [P] da biomassa aérea

$RAP = ((P_{exp_{Tx}} - P_{exp_{Tt}}) / P \text{ aplicado}_{Tx}) \times 100\%$

Onde:

$P_{exp_{Tx}}$ – Fósforo exportado na biomassa aérea, para cada um dos tratamentos experimentais (mg vaso⁻¹);

$P_{exp_{Tt}}$ - Fósforo exportado na biomassa aérea, no tratamento testemunha (mg vaso⁻¹).

No caso do azevém, os valores de P_{exp} apresentados resultam do somatório das exportações relativas a cada corte (Quadro 4).

Para a análise estatística dos resultados experimentais, recorreu-se ao programa *Statgraphics Plus* (versão 5.1), tendo sido utilizados o método de análise de variância (ANOVA, Tipo II) para avaliação do efeito dos diferentes tratamentos experimentais sobre as diversas variáveis, o teste múltiplo de comparação de médias, método de *Duncan* ($p=0,05$), para comparação *a posteriori* das médias correspondentes às modalidades experimentais, e análise de regressão para avaliar

a relação entre o P no solo, extraído por água e por lactato de amónio (*Egnér-Riehm*), e o P veiculado pela lama e/ou pelo fosfato de cálcio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de biomassa

Os tratamentos experimentais exerceram um efeito altamente significativo ($p \leq 0,001$) na produção de biomassa de ambas as culturas. A importância da fertilização fosfatada foi demonstrada, nas condições em que o ensaio decorreu, tendo sido obtidas as produções mais baixas no tratamento experimental em que não foi aplicado fósforo, quer na forma mineral quer na forma orgânica (T1) (Figura 1).

No azevém observou-se uma resposta na produção de biomassa distinta da obtida na primeira cultura (milho). Assim, o aumento das quantidades de fósforo veiculadas pela lama deu origem, no azevém, a um acréscimo significativo ($p=0,05$) de produção, enquanto no milho se observou um decréscimo significativo quando se aplicou a dose mais elevada, correspondente a 120 t de lama ha⁻¹ (T5), sendo, no entanto, estatisticamente superior à da testemunha. O efeito de quebra de produção no milho, pela aplicação de doses excessivas de lama estará possivelmente relacionado com a presença dum teor elevado de azoto amoniacal na lama na fase de instalação do ensaio. Apesar de não ter sido possível efetuar esta determinação, por dificuldades técnicas ao nível do laboratório, sabe-se, no entanto, que a forma de N mineral dominante nas lamas é a amoniacal (Tisdale *et al.*, 1985; Soveral Dias, 2004). A volatilização do amoníaco que terá ocorrido, durante o ciclo da primeira cultura, e no intervalo de tempo que mediou entre a colheita do milho e a sementeira do azevém, estimulada pelo efeito alcalinizante da lama, justifica que a elevada dose de lama não tenha prejudicado o desenvolvimento desta segunda cultura. Nos restantes tratamentos experimentais não ocorreram aumentos de produção de biomassa na cultura do azevém quando se aplicou quantidades crescentes de fosfato de cálcio (T6 a T9) mas houve resposta crescente e significativa para as duas culturas quando foi aplicada a mistura deste com lama (T10 a T13).

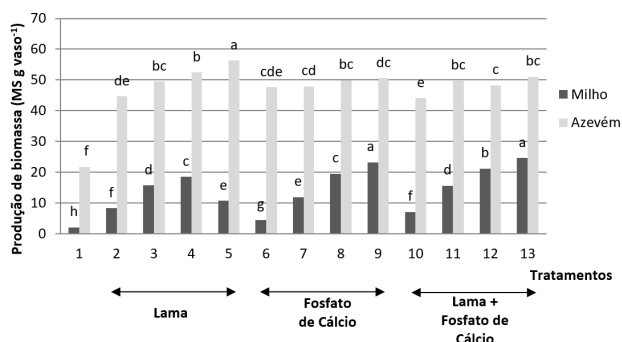


Figura 1 - Resposta da produção média de biomassa de milho e azevém (soma dos 4 cortes) aos tratamentos experimentais (T1= sem P; T2, T6, T10 = 0,121g P/vaso; T3, T7, T11 = 0,245 g P/vaso; T4, T8, T12 = 0,364 g P/vaso; T5, T9, T13 = 0,485 g P/vaso).

Teores de fósforo no solo antes da segunda cultura

O doseamento do P no solo pode ser feito por várias vias considerando-se a extração aquosa e o método de *Egnér-Riehm*, as vias mais utilizadas para efeitos de recomendação de fertilização em Portugal.

Existe uma grande diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos analíticos para determinação do fósforo disponível no solo antes da sementeira da segunda cultura (Figuras 2 e 3).

Métodos que usam soluções com maior capacidade extrativa, como o de *Egnér-Riehm*, permitem dosear a quantidade facilmente disponível para a cultura, bem como determinar a quantidade de fósforo que o solo pode disponibilizar ao longo do tempo e que se encontra adsorvido pelas partículas do solo (Coutinho, 1989; Ryser *et al.*, 1995; Sharpley, 2000; Brady & Weil, 2002). Este método, normalmente usado nos laboratórios de análise de solos em Portugal para efeitos de recomendações de fertilização, está calibrado para dosear o teor de P em solos ácidos, como é o caso neste estudo, precipitando/complexando o Ca, Fe e Al e provocando a desorção do P das superfícies de carbonato de cálcio ou de hidróxidos de Fe e de Al através do ião lactato (Horta & Torrent, 2010).

A Figura 2 permite observar um aumento linear do teor médio de fósforo presente no solo extraído pelo método de *Egnér-Riehm*, por adição de níveis crescentes do elemento veiculado pela lama, pelo fosfato de cálcio e pela mistura de ambos. Os teores

de P veiculados pela lama oscilam entre 38 mg P₂O₅ kg⁻¹ para a aplicação de 61 mg de P₂O₅ kg⁻¹ (T2) e 170 mg P₂O₅ kg⁻¹ para a aplicação de 246 mg de P₂O₅ kg⁻¹ (T5), que se traduz numa expressão linear muito significativa ($p \leq 0,01$), indicada na figura 2, com um coeficiente de determinação de 94%. O mesmo ocorre em relação ao fosfato de cálcio (T6=44 mg P₂O₅ kg⁻¹ a T9=119 mg P₂O₅ kg⁻¹) com um coeficiente de determinação de 99% ($p \leq 0,001$) e à mistura dos dois produtos (T10=41 mg P₂O₅ kg⁻¹ a T13=138 mg P₂O₅ kg⁻¹) com resposta também próxima do linear, muito significativa ($p \leq 0,01$), com coeficiente de determinação de 95%.

A aplicação dos níveis mais elevados de lama deu origem a um teor de fósforo residual no solo, após a primeira cultura, superior ao da adubação mineral ou com a mistura dos dois fertilizantes.

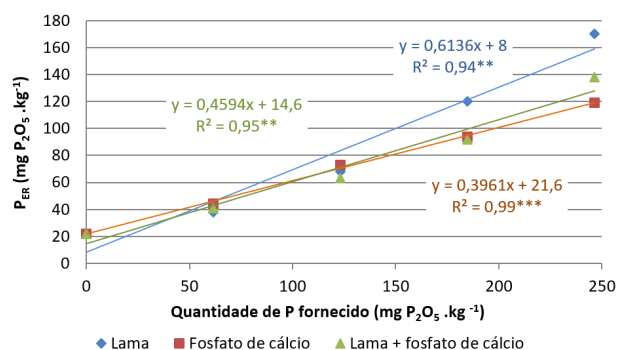


Figura 2 - Teores residuais de P_{ER} no solo (*Egnér-Riehm*), antes da sementeira da segunda cultura (azevém), em resposta à aplicação de doses crescentes de três tipos de fertilizantes fosfatados.

O método com extração aquosa permite dosear os elementos facilmente disponíveis para a planta ou seja, medir a intensidade da disponibilidade deste elemento. Com este método, os valores são mais baixos, pois incidem sobre a concentração do elemento na solução do solo. Vários autores referem que este método constitui um bom indicador do fósforo biodisponível, ou facilmente disponível para a planta, e que se apresenta bem relacionado com a resposta do desenvolvimento da planta (Thompson, 1960; Van der Paaw, 1971; Sorn-Srivichai *et al.*, 1988; Ryser *et al.*, 1995). Os valores obtidos por esta metodologia são independentes do tipo de solo em causa (Van der Paaw, 1971).

Assim, pelo método de extração com água obtiveram-se, como seria de esperar, valores muito inferiores aos obtidos pelo método de *Egnér-Riehm*, mas também com acréscimos significativos ($p \leq 0,05$), com a aplicação de quantidades crescentes de fósforo veiculado pela aplicação de lama, fosfato de cálcio ou pela mistura de ambos. Neste último caso, o tratamento que veiculou a maior quantidade de fósforo (T13) foi o que deu origem à maior quantidade de fósforo no solo, facilmente disponível, no final da primeira cultura. Este resultado pode ser explicado pela ação inibitória da matéria orgânica na adsorção de fósforo pelas partículas de solo pois o material orgânico compete com o fósforo na ocupação de locais de retenção no material mineral. Segundo Tisdale *et al.* (1985) vários estudos revelaram que aniões orgânicos formam complexos estáveis com Fe e Al, elementos dominantes em meio ácido como é o caso em estudo, reduzindo a adsorção do P pela fração mineral do solo e desta forma tornando-o mais disponível para ser absorvido. O aumento do pH para valores próximos da neutralidade (7,4-7,6, dados não publicados), causado pela presença da lama, explica também a maior solubilização do P.

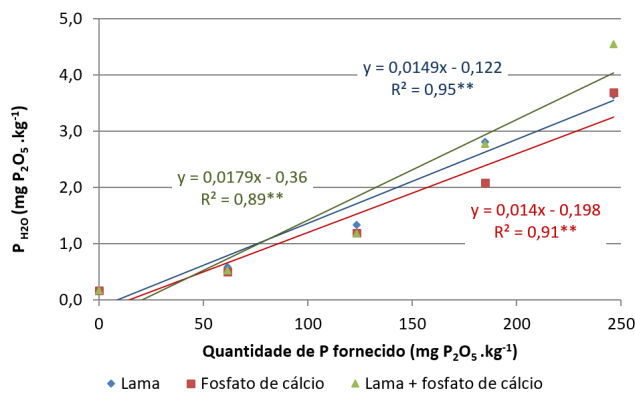


Figura 3 - Teores residuais de P_{H_2O} no solo (ext.com água), antes da sementeira da segunda cultura (azevém), em resposta à aplicação de doses crescentes de três tipos de fertilizantes fosfatados.

Exportação e taxa de recuperação aparente de fósforo

No Quadro 4 pode observar-se que foi no tratamento experimental com doses mais elevadas de fósforo, veiculado pelo fosfato de cálcio (T9), que foi exportada a maior quantidade do nutriente

pela parte aérea das plantas teste. Este resultado reflete os valores mais elevados de concentração de fósforo nos tecidos vegetais de ambas as culturas verificados neste tratamento experimental.

Quadro 4 - Fósforo exportado (Pexp) e recuperação aparente de fósforo (RAP) pelas plantas teste em cada um dos tratamentos experimentais

		Milho		Azevém	
Tratamentos experimentais		Pexp (mg vaso ⁻¹)	RAP (%)	Pexp (mg vaso ⁻¹)	RAP (%)
Ø	T1	1,9 h		14 i	
Lama	T2	9,7 fg	6,4 ab	37 h	18 def
	T3	17,2 d	6,2 ab	54 g	16 hi
	T4	21,9 c	5,4 bc	72 e	16 hi
	T5	14,7 de	2,7 e	88 c	15 i
Fosfato de cálcio	T6	4,0 h	1,7 e	42 h	23 a
	T7	12,2 ef	4,2 d	65 f	21 bc
	T8	21,2 c	5,3 bc	87 c	20 bcd
	T9	35,5 a	6,9 a	112 a	20 bcd
Lama e fosfato de cálcio	T10	7,2 g	4,4 cd	41 h	22 ab
	T11	16,6 d	6,0 ab	62 f	19 cde
	T12	23,5 c	5,9 ab	79 d	18 efg
	T13	32,4 b	6,3 ab	96 b	17 ghi
Sm (±)		1,044	0,365	1,880	0,635
c.v. (%)		10,8	12,3	4,9	5,9

Resultados expressos na matéria seca a 100-105 °C; Sm - desvio padrão da média; c.v. - coeficiente de variação; Ø(T1) = controlo; T2, T6, T10 = 0,121g P/vaso; T3, T7, T11 = 0,245 g P/vaso; T4, T8, T12 = 0,364 g P/vaso; T5, T9, T13 = 0,485 g P/vaso). Resultados experimentais, na coluna, seguidos de letras iguais não diferem significativamente entre si ($p=0,05$)

De um modo geral, um fornecimento mais elevado de fósforo, independentemente da fonte, deu origem a maiores valores de nutriente exportado na biomassa aérea, à exceção do caso da maior dose de lama (T5) que, na primeira cultura (milho), apresentou valores mais baixos devido à menor produção obtida.

Atendendo aos resultados da recuperação aparente de fósforo, observa-se que, no azevém, ocorreu um decréscimo significativo ($p=0,05$) no aproveitamento de fósforo pelas plantas quando se utilizaram doses crescentes quer de lama, quer de fosfato, quer da mistura de ambos. Na primeira cultura, milho, observou-se o mesmo resultado quando se usaram doses crescentes de lama mas, contrariamente ao expectável, houve uma recuperação aparente do nutriente crescente e significativa ($p=0,05$) com o aumento da quantidade

de P fornecido na forma mineral, o que se deveu a uma absorção exponencial deste nutriente com o aumento da aplicação de fosfato ($y = 0,083 e^{(-2,48918 + 1,00659x)^*}$, $R^2=83\%$) (de acordo com Bártolo, 2016).

Na segunda cultura, os valores mais elevados de recuperação aparente de P foram atingidos com a aplicação de P unicamente na forma mineral (T6 a T9), revelando valores entre os 20 e 23%, e com o tratamento com a dose mais baixa da mistura de fósforo mineral e lama (T10), atingindo o valor de 22%.

De salientar o forte incremento nas taxas de recuperação médias de fósforo observadas, de um modo geral, na segunda cultura (entre 15 e 23%) quando comparadas com as obtidas na primeira (entre 1,7 e 6,9%).

Os resultados observados neste estudo aproximam-se do intervalo encontrado por Johnston and Poulton (2019) que, num levantamento global dos ensaios executados durante 175 anos em Rothamsted (United Kingdom), registaram valores entre 5 a 25% de recuperação de P. Já Boucho *et al.* (2019) obtiveram valores de recuperação até cerca de 50% com adição de P mineral em solos muito ácidos.

A análise do solo no final do ensaio apresenta concentrações de fósforo disponível suficientemente elevadas para poder suprir as necessidades das culturas seguintes, em particular nos tratamentos que só receberam lama (T4 = 79 mg P_2O_5 kg⁻¹ e T5 = 107 mg P_2O_5 kg⁻¹), estando de acordo com a estabilidade específica deste elemento ao longo do tempo e sendo consequência da menor recuperação aparente observada.

Estes resultados estão de acordo com o previsto, uma vez que, como se sabe, nos fertilizantes minerais os nutrientes encontram-se, de uma forma geral, mais disponíveis para absorção pelas plantas do que nos fertilizantes orgânicos necessitando, neste caso, de serem previamente mineralizados para poderem ser absorvidos.

Como é referido por vários autores (Tisdale *et al.*, 1985; Brady & Weil, 2002; Santos, 2015) é evidente que a adição de matéria orgânica ao solo tende

a provocar um aumento da disponibilidade de fósforo existente no solo. Esse efeito foi visível neste estudo, levando a concluir que, quando a lama é misturada com formas inorgânicas de fósforo (T6 a T9) é possível obter resultados equivalentes aos obtidos com a utilização, apenas, de fertilizantes inorgânicos (T10 a T13).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo confirmam a importância de manter, no solo, um fornecimento adequado de P prontamente disponível para as plantas, de modo a satisfazer as necessidades das culturas. Com efeito, a produção de biomassa das plantas teste revelou elevada dependência da fertilização fosfatada, registando valores significativamente superiores na maioria dos tratamentos experimentais que receberam maiores quantidades de fósforo.

Os resultados observados vêm também, mais uma vez, demonstrar que o fósforo é um elemento que apresenta valores de recuperação aparente muito baixos.

As lamas de ETAR podem conter quantidades elevadas de fósforo total que se encontra, sobretudo, na forma orgânica e que, gradualmente, vai ficando disponível, à medida que ocorre a sua mineralização no solo. Por este facto, é conveniente que as lamas sejam aplicadas atempadamente, de modo a que se possa aumentar a sua eficácia no fornecimento de nutrientes à cultura, e também uma diminuição no teor de azoto amoniacal presente na lama, resultando em benefícios, não só agronómicos, mas também económicos e ambientais.

Os resultados permitem concluir que a aplicação controlada de lamas de ETAR devidamente tratadas a solos agrícolas poderá constituir um substituto parcial dos fertilizantes minerais fosfatados, já que o uso conjugado dos dois permite obter resultados equivalentes aos obtidos usando apenas os adubos inorgânicos, em termos de produtividade e recuperação aparente de fósforo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bártolo, I.M.M. (2016) - *Valorização agrícola de lamas de ETAR – Estudo da disponibilidade do fósforo*. Tese de mestrado. Lisboa, FCT. Universidade Nova de Lisboa 79 p.
- Boucho, A.C.; Carranca, C.; Redondo, R.; Calouro, F. & Madeira, M. (2019) – Biomass, nodulation and N₂ fixing response by subclover and pink serradela to phosphorus fertilization. *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 65, n. 10, p. 1431-1445. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1566712>
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2002) - *The Nature and Properties of Soil*. New Jersey, Pearson Education, 960 p.
- Buurman, B.; van Lagen, B. & Velthorst, E.J. (1996) – *Manual for soil and water analysis*. Leiden, Backhuys Publishers, 314 p.
- Chalk, P.M.; Alves, B.J.R. & Boddey, R.M. (2010) - Integrated effects of abiotic stresses on inoculant performance, legume growth and symbiotic dependence estimated by ¹⁵N dilution. *Plant and Soil*, vol. 328, p. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0187-7>
- Childers, D.L.; Corman, J.; Edwards, M. & Elser, J.J. (2011) – Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle. *Bioscience*, vol. 61, n. 2, p. 117-124. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.2.6>
- Cohen, Y.; Kirchmann H. & Enfa, O. (2011) - Management of Phosphorus Resources. Historical Perspective, Principal Problems and Sustainable Solutions. In: Kumar, S. (Ed.) - *Integrated Waste Management*. Volume II, p.247-268. ISBN: 978-953-307-447-4
- Cordell, D. (2010) - *The story of phosphorus: sustainability implications of global P scarcity for food security*. PhD dissertation. Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sidney, Australia. 241 p.
- Cordell, D.; Drangert, J.O & White, S. (2009) - The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, vol. 19, n. 2, p. 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Coutinho, J.F. (1989) - *Acidez do solo e toxicidade do alumínio. Calibração de método de avaliação da necessidade de cal*. Tese de doutoramento em engenharia agrônoma. Vila Real, UTAD, 709 p.
- MAOTDR (2009) - Decreto Lei n.º 276/2009, de 02 de outubro. *Diário da República*, nº 192 – I Série. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa, p. 7154-7165.
- Egnér, H.; Riehm, H. & Domingo, W.R. (1960) - Untersuchungen über die chemische bodenanalyse als grundlage für die beurteilung des nährstoffzustandes der böden. II: Chemische extraktion methoden zur phosphor- und kalium-bestimmung. *Kunliga Lantbrukshögskolans Annaler*, vol. 26, p. 199–215.
- FAO (2008) – Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* n. 18, 219 p.
- Horta, M.C. & Torrent, J. (2010) – *Dinâmica do fósforo no solo, Perspetiva Agronómica e Ambiental*. Edições IPCB. Instituto Politécnico de Castelo Branco, 98 p.
- INIAV (2016) - *Lista de determinações e métodos analíticos na Área de Ambiente e Recursos Naturais*. Agosto 2016, 9 p.
- IUSS Working Group WRB (2015) - World Reference Base for Soil Resources 2014. Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Roma, World Soil Resources Report, 106, 203 p.
- Johnston, A.E. & Poulton, P.R. (2019) – Phosphorus in agriculture: A Review of results from 175 years of Research at Rothamsted, UK. *Journal of Environmental Quality*, vol. 48, n. 5, p. 1133-1144. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0078>
- Mengel, K. & Kirkby, E.A. (2001) – *Principles of plant nutrition*. Dordrecht, Netherlands, 5th ed., Kluwer Academic Publishers, 849 p.
- Ryser, J.P.; Gysi, Ch. & Heller, W. (1995) – Analyse de terre et interprétation en cultures spéciales. *Revue Suisse de Viticulture d'Arboriculture et d'Horticulture*, vol. 27, n. 6, p. 365-372.
- Santos, J.Q. (2015) - *Fertilização. Fundamentos agroambientais da utilização dos adubos e corretivos*. Lisboa, Publindustria, Ed. Técnicas, 537 p.
- Sattari, S.Z.; Bouwman, A.F.; Giller, K.E. & van Ittersum, M.K. (2012) - Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 109, n. 16, p. 6348-6353. <https://doi.org/10.1073/pnas.1113675109>

- Sharpley, A. (2000) - Phosphorus availability. In: Sumner, M.E. (Ed.) - *Handbook of Soil Science*. USA, CRC press, D-18 -33.
- Sorn-Srivichai, P.; Syers, J.K.; Tillman, R.W. & Cornforth, I.S. (1988) – An evaluation of water extraction as a soil-testing procedure for phosphorus II. Factors affecting the amounts of water-extractable phosphorus in field soils. *Fertilizer Research*, vol. 15, p. 225-236. <https://doi.org/10.1007/BF01051344>
- Smit, A.L.; Bindraban P.S.; Schröder, J.J.; Conijn, J. G. & van der Meer, H.G.(2009) - *Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments*. Report to the Steering Committee Technology Assessment of the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, The Netherlands Plant Research International B.V., Wageningen. 41 p.
- Soveral Dias, J.C. (2004) - *Guia de Boas práticas – Aplicação de lamas na agricultura*. Lisboa, Reciclamas - multigestão ambiental SA., 159 p.
- Thompson, E.J.; Oliveira, A.L.F.; Moser, U.S. & Black, C.A. (1960) - Evaluation of Laboratory Indexes of Absorption of Soil Phosphorus By Plants: II, *Plant and Soil*, vol. 13, n. 1, p. 28- 38. <https://doi.org/10.1007/BF01666473>
- Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. & Beaton, J.D. (1985) - *Soil fertility and fertilizers*. 4^a Ed., New York, Macmillan Publishing Company, 754 p.
- Van der Paaw, F. (1971) - An effective water extraction method for the determination of plant available phosphorus. *Plant and Soil*, vol. 34, p. 467–481. <https://doi.org/10.1007/BF01372799>
- Varenes, A. (2003) - *Produtividade dos solos e Ambiente*. Lisboa, Escolar Editora, 490 p.