

Avaliação do potencial fertilizante de resíduos orgânicos de agro-pecuária e de fertilizantes de base biológica em solos agrícolas



Assessment of the fertilizing value of organic residues and of bio-based fertilizers in agricultural soils

Autores:
Carmo Horta
Verónica Oliveira

2022

© do texto:

© das imagens: os seus autores

Ficha Técnica

Edições

Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Av. Pedro Álvares Cabral n. 12

6000-048 Castelo Branco. Portugal

www.ipcb.pt

2022

Título

Avaliação do potencial fertilizante de resíduos orgânicos de agro-pecuária e de fertilizantes de base biológica em solos agrícolas

Assessment of the fertilizing value of organic residues and of bio-based fertilizers in agricultural soils

Autores

Carmo Horta e Verónica Oliveira

Capa

Rui Tomás Monteiro

Projecto gráfico e paginação

Rui Tomás Monteiro

Tiragem

100 ex.

Arte Final, impressão e acabamentos

Serviços Editoriais e de Publicação do IPCB

ISBN: 978-989-53931-0-7

Depósito Legal n.º 506680/22

DOI: 10.53681/2022.101/02

Todos os direitos reservados. Salvo o previsto na Lei, não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro que ultrapasse o permitido pelo Código de Direitos de Autor, como a sua recompilação em sistema informático, nem a sua transformação por meios electrónicos, mecânicos, por fotocópias, por registo ou por outros métodos presentes ou futuros, mediante qualquer meio para fins lucrativos ou privados, sem a autorização dos titulares do copyright e do autor que detêm a propriedade intelectual da obra. Nenhum texto, imagem ou marca é usado com o intuito de lesar direitos, autoria, reputação ou imagem de terceiros.

Índice

Resumo	7
Abstract	8
1. Introdução	9
Introduction	10
2. Caracterização físico-química de resíduos orgânicos de pecuária e compostos	11
3. Fertilização com resíduos orgânicos de agro-pecuária e compostos: Efeitos agronômicos	19
3.1. Avaliação de resíduos orgânicos de pecuária como fonte de fósforo para as culturas	19
3.2. Propriedades fertilizantes da fração sólida de um digerido em comparação com o chorume não digerido, aplicados a um solo ácido numa cultura forrageira	24
3.3. Propriedades fertilizantes da fração sólida de um digerido como corretivo orgânico e fonte de azoto para culturas hortícolas	27
3.4. Fertilização com Composto: Efeitos na sorção de fósforo e na disponibilidade de fósforo em solos ácidos	29
3.5. Fertilização com composto peletizado e sem peletizar na cultura da alfaca: Efeito na disponibilidade de N	31
4. - Fertilizantes de base biológica	37
4.1. - Tecnologias de recuperação de nutrientes	37
4.2. Avaliação agronômica de fertilizantes de base biológica	41
4.2.1. Avaliação do valor fertilizante de uma solução com azoto recuperado	41
4.2.2. Avaliação de valor fertilizante da estruvite	42
5. Considerações finais	47
Final remarks	48
6. Referências	49
Anexo	51

Resumo

As matérias fertilizante provenientes das atividades agro-pecuária e agro-industrial, tais como estrumes, chorume, digestatos e compostos, avaliadas através de ensaios agronômicos referidos neste livro, mostraram (i) apresentar valor fertilizante, (ii) conduzir a uma economia de recursos naturais no que respeita aos nutrientes vegetais e (iii) contribuir (algumas) para um aumento do stock em carbono orgânico do solo, com vantagens para a saúde dos solos agrícolas ajudando também na mitigação das alterações climáticas por diminuição do teor em CO₂ da atmosfera. Atualmente há cada vez mais um reconhecimento destes produtos não como resíduos, mas como recursos indispensáveis aos objetivos da economia verde no que respeita à implementação de práticas/tecnologias com zero de desperdício. Neste âmbito, também a produção de fertilizantes minerais de base biológica, obtidos através da extração de nutrientes vegetais a partir das referidas matérias fertilizantes, enquadradas aqui como fontes de nutrientes (matérias primas) mostrou ser uma tecnologia promissora, com resultados agronômicos semelhantes aos obtidos com os fertilizantes minerais tradicionais.

Deste modo, a utilização destas práticas de fertilização permite fechar o ciclo antropogénico dos nutrientes em agricultura aproximando as atividades agrícola, pecuária, florestal e agro-industrial num ciclo de reutilização, recuperação e reciclagem com benefícios agronômicos e ambientais significativos.

Palavras chave: agricultura sustentável; estrume; chorume; compostos; digestato; economia circular; recuperação de nutrientes.

Abstract

Fertilizer materials obtained from agriculture, livestock and agro-industrial activities were evaluated through agronomic experiments. These fertilizer materials were manures, slurries, digestates and composts. They showed to (i) have fertilizing value, (ii) save natural resources with regard to plant nutrients and (iii) contribute (some of them) for an increase of the soil organic carbon stock, with benefits for the soil health, and helping also to mitigate climate change by reducing atmospheric CO₂ content. Currently, there is an increasing recognition of these products not as a waste, but as essential resources for the green economy goals, with regard to the implementation of practices/technologies of zero waste. In this context, the production of biologically-based mineral fertilizers, obtained through the extraction of plant nutrients from the aforementioned fertilizer materials, which behave like nutrient sources (raw materials), also proved to be a promising technology. These biologically-based mineral fertilizers showed agronomic behavior similar to that obtained with the traditional mineral fertilizers.

Therefore, the use of the fertilization practices referred in this book makes possible to close the anthropogenic cycle of nutrients in agriculture, bringing together agricultural, livestock, forestry and agro-industrial activities in a cycle of reuse, recovery and recycling with significant agronomic and environmental benefits.

Key words: circular economy; composts; digestate; manure; nutrients recovery; slurry; sustainable agriculture.

1. Introdução

A agricultura, atividade do setor primário, assenta fundamentalmente em dois processos fisiológicos das plantas que dizem respeito à fotossíntese e à absorção de nutrientes. No primeiro processo, a fotossíntese, ocorre a transformação da energia radiante proveniente do Sol em biomassa, através da fixação do carbono (C) proveniente do CO_2 da atmosfera em moléculas orgânicas. Por sua vez, a absorção de nutrientes que ocorre fundamentalmente a partir da solução do solo através das raízes das plantas, é um processo fisiológico que necessita de dispêndio de energia por parte da planta e possibilita, juntamente com o C fixado através da fotossíntese, a formação das diversas substâncias orgânicas que formam a biomassa vegetal, os prótidos, os lípidos e os glúcidos. Deste modo são sintetizadas as substâncias orgânicas fundamentais à Vida e à alimentação do Homem e outros animais. Assim, não só o teor em nutrientes vegetais do solo, mas também a capacidade do solo em manter os nutrientes em formas disponíveis para as plantas absorverem, é fundamental para uma adequada nutrição das plantas, e para a formação da biomassa em quantidade e qualidade. Neste livro são abordados os aspetos agronómicos e ambientais relacionados com a fertilização das culturas através de matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos orgânicos provenientes das atividades agrícola, pecuária e humana. A utilização destas matérias fertilizantes para a nutrição das culturas pode contribuir para a concretização dos objetivos da economia circular, através do seu teor em nutrientes e em carbono, promovendo a sustentabilidade da produção agrícola.

Introduction

Agriculture and primary production are fundamentally based on two physiological processes of the plants that concern photosynthesis and nutrient absorption. In the first process, photosynthesis, the transformation of radiant energy from the Sun into biomass occurs, through the fixation of carbon (C) from the atmospheric CO₂ into organic molecules. In turn, the absorption of nutrients, which essentially occurs from the soil solution through the plant roots, is a physiological process that requires energy expenditure by the plant and allows, with the carbon fixed through the photosynthesis, the formation of the various organic substances that form plant biomass, proteins, lipids and carbohydrates. By this way, the organic substances that are fundamental to all the living organism's nutrition are synthesized. Thus, not only the content of the soil in plants nutrients, but also the soil ability to maintain the nutrients in available forms for plants' uptake, are essential for an adequate plant nutrition, and for the biomass synthesis in quantity and quality. In this book, the agronomic and the environmental aspects related to the fertilization of crops through fertilizing materials like organic residues obtained from agriculture and livestock production are addressed. These fertilizing materials can contribute to the achievement of the circular economy objectives and promoting the sustainability of the agricultural production.

2. Caracterização físico-química de resíduos orgânicos de pecuária e compostos

A atividade pecuária intensiva produz elevadas quantidades de resíduos orgânicos, constituídos por resíduos sólidos provenientes das camas dos animais (estrupe), ou efluentes líquidos (chorume) resultantes da mistura dos dejetos dos animais com a água de lavagem das instalações pecuárias.

A quantidade e composição média de estrumes e de chorumes não diluídos, produzidos anualmente por diferentes espécies pecuárias e a sua conversão em cabeça normal (CN) é apresentada no Anexo V da Portaria 259/2012 de 28 de agosto (Anexo I). Pela informação desta Tabela observamos por exemplo, que relativamente às instalações pecuárias de vacas leiteiras, por CN são produzidos anualmente 17,5 toneladas de estrupe ou 19,2 m³ de chorume. Enquanto que, relativamente às suiniculturas, na exploração em ciclo fechado, esse valor é de 8,6 toneladas ou 12,8 m³ de estrupe ou chorume por ano respetivamente. Em relação ao teor em nutrientes nomeadamente em azoto total (Nt), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) expressos em kg/CN e ano para o estrupe e chorume de vacas leiteiras os valores são, respetivamente: Nt: 93 e 82; P₂O₅: 39 e 35; K₂O: 189 e 153. Para os suínos, em ciclo fechado, esses valores são: Nt: 67 e 77; P₂O₅: 60 e 49; K₂O: 72 e 56. Como se pode observar por esta Tabela (Anexo 1), o teor em nutrientes contido no estrupe e chorume produzido anualmente é muito elevado, assumindo a sua utilização como fertilizantes um aspeto fundamental na gestão dos nutrientes a nível destas explorações, permitindo a circularidade dos nutrientes e uma poupança efetiva de fertilizantes minerais. Existem, no entanto, algumas limitações ao seu uso devido fundamentalmente a elevada variabilidade entre as diversas espécies pecuárias, não só nos volumes de estrupe ou chorume produzidos, como também na sua concentração em nutrientes, que se irá traduzir na prática pela necessidade de implementação de práticas de fertilização diferenciadas.

Na Tabela 1 apresenta-se a composição físico-química de alguns resíduos orgânicos provenientes da atividade pecuária veiculados no estado sólido, neste caso de estrumes frescos, provenientes de explorações pecuárias da região Interior Centro de Portugal. As espécies pecuárias cujos estrumes são reportados na Tabela 1 foram: bovinos para produção de leite ou de carne, suínos, galinhas poedeiras, coelhos e cabras.

Como se pode observar, estes estrumes apresentam uma elevada variabilidade na sua composição físico-química (Tabela 1). A origem desta variabilidade diz respeito por um lado a diferenças na alimentação e metabolismo entre as diversas espécies pecuárias e, por outro lado dentro da mesma espécie pecuária a diferenças provenientes da idade e do tipo de manejo. Estes estrumes são provenientes das camas dos animais e são constituídos por dejetos, palha e restos de ração ou apenas dejetos e restos de ração.

O coeficiente de variação observado nos diversos parâmetros avaliados (Tabela 1), apresenta valores entre 118% para o teor em fósforo (P) e 9% para o valor de pH. O teor de humidade, além de apresentar uma elevada variabilidade (47%), apresenta um valor médio muito elevado (60%), facto que encarece o transporte para aplicação ao solo do estrume produzido nestas explorações. Este elevado teor em humidade também diminui, por tonelada de produto fresco, a sua concentração não só em matéria orgânica (MO) como em nutrientes. Como se pode observar, alguns estrumes apresentam um valor de humidade muito alto (96%). Neste caso, os estrumes são provenientes de explorações que não usam palha na cama dos animais, obtendo-se assim um resíduo pastoso, constituído fundamentalmente por dejetos e restos de ração, misturados com alguma água proveniente da lavagem das instalações pecuárias. Os teores em MO dos estrumes analisados apresentam em média um valor de 73% referido à matéria seca (MS) mas apenas de 29%¹ se o valor for referido à matéria fresca (MF) do estrume. Também o teor em nutrientes diminui consideravelmente na MF, apresentando em média um teor de Nt de 0,92%, de K 1,1% e de P 170 mg/kg de MF. O estrume apresenta cerca de 74% do N em formas orgânicas, que para serem absorvidas pelas culturas terão que ser mineralizadas por ação dos microrganismos do solo, o que pode diminuir a biodisponibilidade imediata do N. Tomando como valores de referência de Cu e Zn em matérias fertilizantes os que são apresentados na Portaria 185/2022 de 21 de julho o teor médio de Cu é baixo (54 mg/kg) bem como o valor máximo observado (137 mg/kg). Quanto ao Zn apresenta um teor médio também baixo (336 mg/kg) mas o valor máximo observado é alto (893 mg/kg). Para os baixos teores em Cu encontrados terá contribuído a existência de algumas restrições no seu teor nas rações, não sendo de esperar que origemem contaminação do solo ou problemas de fitotoxicidade. Relativamente ao Zn o mesmo acontece na generalidade dos estrumes analisados, com exceção do estrume obtido em cuniculturas,

¹ Cálculo: MO reportada à MF (%) = MO na MS (%) x (MS (%) / 100)

em especial na maternidade e engorda que apresentam os valores mais elevados observados. Este facto poderá ser devido às necessidades nutricionais e metabolismo dos coelhos nesta fase do seu ciclo de vida. Os estrumes apresentam um valor de pH alcalino ($\text{pH} = 8,8$), com teores em bases bastante favoráveis para aplicação em solos ácidos ($\text{Ca} = 5,8\%$ e $\text{Mg} = 0,8\%$).

Tabela 1. Composição físico-química de estrumes frescos proveniente de explorações da região Interior Centro de Portugal. Valores reportados à matéria seca (MS), exceto a humidade, o pH e a condutividade elétrica ($n = 19$).

	Média	Mediana	dp	CV %	Max	Min
Humidade	60	74	28	47	96	11
MS (%)	40	26	28	71	89	4
MO (%)	73	81	21	29	86	11
pH (H_2O)	8,8	8,9	0,8	9	10,2	7,4
CE (dS/m)	4	5	2	55	10	1
N-total (%)	2,3	2,2	1,2	52	5,9	0,2
N-org (%)	1,7	1,8	0,8	49	3,7	0,4
P (mg/kg)	424	134	498	118	1751	23
K (%)	2,7	2,4	2,1	78	8,9	0,2
Ca (%)	5,8	4,3	4,3	74	18,1	0,4
Mg (%)	0,8	0,7	0,4	57	2,0	0,2
Cu (mg/kg)	54	32	41	76	137	11
Zn (mg/kg)	336	255	222	66	893	43

Nota: MS: matéria seca; MO: matéria orgânica; CE: condutividade elétrica; dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Projeto INTERREG 00340_SYMBIOSIS_3_E

Relativamente à composição de chorumes, na Tabela 2 apresenta-se a caracterização físico-química de chorumes também colhido em explorações da região Interior Centro de Portugal, mas apenas em suiniculturas. À semelhança dos estrumes, os chorumes analisados apresentam também uma elevada variabilidade, no entanto por serem muito diluídos, apresentam em geral valores baixos de matéria seca em média 18 g/L, teores também baixos de MO (10 g/L) e em geral de nutrientes. No entanto, apresentam em média cerca de 79% do N total (2,1 g/L) em formas minerais, de fácil absorção pelas culturas e, constituem também uma fonte de cálcio (1484 mg/L). O valor de pH (em média 7,6) dos chorumes situa-se na zona neutra a pouco alcalina, o que torna mais vantajosa a sua aplicação em solos ácidos.

Como se pode observar pela sua composição, o chorume atuará fundamentalmente para as culturas como fonte de água e de alguns nutrientes (mas em quantidades reduzidas). Dado o seu teor em MO ser baixo não será de esperar um efeito positivo no teor em MO do solo. Uma vez que tem um valor de condutividade elétrica elevado, em média 16 dS/m, aconselha-se a monitorização da salinidade do solo nas áreas em que é aplicado. Pelo código das boas práticas agrícolas (Despacho nº 1230/2018), deve ser incorporado no solo após a sua aplicação de forma a evitar perdas de azoto por volatilização e por escoamento superficial. Segundo o mesmo código de boas práticas agrícolas, o valor máximo de azoto total (Nt) a incorporar no solo por ano através de estrumes ou chorumes é de 170 kg/ha.

Tabela 2. Composição físico-química de chorumes de suíno proveniente de explorações da região Interior Centro de Portugal (n = 4).

	Média	Mediana	dp %	CV	Max	Min
MS (g/L)	18	17	9	48	29	9
MO (g/L)	10	10	5	50	16	4
pH	7,6	7,7	0,17	2	7,7	7,3
CE (dS/m)	16	16	4	22	21	12
N-total (g/L)	2,1	2,0	0,86	40	3,3	1,3
N-org (g/L)	0,45	0,49	0,32	71	0,73	0,09
P (mg/L)	2,6	2,8	1,8	69	4,1	0,5
K (mg/L)	1873	1959	548	29	2383	1192
Ca (mg/L)	1484	1152	917	62	2825	809
Mg (mg/L)	445	438	344	77	839	66
Cu (mg/L)	3	3	3	88	8	1
Zn (mg/L)	31	8	50	159	106	3

Nota: MS: matéria seca; MO: matéria orgânica; CE: condutividade elétrica; dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Projeto INTERREG 00340_SYMBIOSIS_3_E

Os efluentes produzidos nas instalações pecuárias podem, além da incorporação no solo, servir de substrato para a digestão anaeróbia (processo de degradação de materiais orgânicos na ausência de oxigénio) com vista à produção de biogás (mistura de gases, cuja maior parte é composta por CH₄), vulgarmente utilizado na produção de energia térmica e elétrica. No final da digestão anaeróbia, obtém-se um produto que pode ser considerado matéria fertilizante, uma vez que ainda possui matéria orgânica e nutrientes vegetais. Apresenta-se na Tabela 3 a composição da fração sólida do efluente final da digestão anaeróbia (digerido)

proveniente de explorações de suínos. As amostras foram colhidas em explorações localizadas na região de Salamanca, uma vez que em Portugal a produção de biogás em explorações pecuárias, que teve alguma representação nos anos 90 do século passado, tem atualmente pouca expressão. Como se pode observar, a fração sólida do digerido apresenta uma variabilidade muito menor na sua composição físico-química por comparação com o estrume ou chorume (Tabelas 1, 2 e 3). Esta menor variabilidade, também pode ser devida ao facto do digerido ser apenas proveniente de suiniculturas. A fração sólida do digerido apresenta, contudo, um baixo valor de MS em média de 27% o que origina um valor baixo de MO reportado à MF apenas de 18%. No entanto, esta MO será constituída por compostos orgânicos de maior estabilidade que permanecem no digestor após terminar o processo da digestão anaeróbia. O pH do digerido apresenta-se também na zona da alcalinidade (média de 8,1), sendo o valor da CE relativamente baixo (média 1,5 dS/m). O teor em Nt reportado à MF é de 0,78% estando a maior parte em formas orgânicas (83%). O digerido apresenta um teor em P considerável (0,16% na MF) e uma razão N:P baixa, podendo constituir uma boa fonte de P para as culturas.

Tabela 3. Composição físico-química da fração sólida resultante da digestão anaeróbia de chorume de suíno proveniente de explorações da região de Salamanca Espanha. Valores reportados à matéria seca (MS), exceto a humidade, o pH e a condutividade elétrica (n = 3).

	Média	dp	CV %	Max	Min
MS (%)	27	3	12	29	25
MO (%)	66	14	22	76	56
pH (H ₂ O)	8,1	0,4	5	8,3	7,8
CE (dS/m)	1,5	0,3	20	1,7	1,3
N-total (%)	2,9	0,2	6	3,0	2,7
N-org (%)	2,4	0,1	3	2,4	2,3
P (%)	0,6	0,5	37	0,71	0,48
K (%)	1,8	0,3	17	2,0	1,6
Ca (%)	10	1	8	11	10
Mg (%)	1,6	0,0	3	1,6	1,6
Cu (mg/kg)	30	3	9	32	28
Zn (mg/kg)	157	172	110	278	35

Nota: MS: matéria seca; MO: matéria orgânica; CE: condutividade elétrica; dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Projeto INTERREG 00340_SYMBIOSIS_3_E

Os compostos referidos na Tabela 4 dizem respeito a matérias fertilizantes obtidas através da compostagem de vários resíduos tais como: chorumes, fração sólida dos digeridos da digestão anaeróbia, resíduos orgânicos de restauração, lamas de tratamento de efluentes urbanos e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. A composição físico-química destes compostos também apresenta alguma variabilidade relacionada com a origem dos materiais compostados. No entanto, o Decreto Lei 30/2022 de 11 de abril e a Portaria 185/2022 de 21 de julho estabelecem os teores relativos à composição físico-química dos compostos para a sua colocação no mercado, e a respetiva categoria em função do seu teor em metais pesados. A utilização agrícola dos compostos como matéria fertilizante está condicionada à categoria segundo a classificação do referido Decreto-Lei e Portaria. O valor de humidade para estas matérias fertilizantes será no máximo de 40% e o teor de MO no mínimo de 30% reportada à MS. Podemos observar que, os compostos referidos na Tabela 4, apresentam um valor de humidade em média ligeiramente superior (42%) mas o teor de MO é francamente superior ao referido na Portaria (62% na MS). Têm também um valor de pH ligeiramente alcalino, em média 7,8. O teor de Nt na MF é de 1,5% e de P de 0,29% em média, que são valores relativamente elevados. Apresentam valores razoáveis de Ca (5,8%) e Mg (0,52%) na MF para a nutrição das culturas. Em geral, o valor médio da CE (2,5 dS/m) não parece originar efeito negativos a nível da salinização do solo, no entanto este parâmetro deverá ser monitorizado em solos com aplicação de compostos. O valor médio de Cu é baixo (77 mg/kg MS) mas o valor médio do Zn já é mais elevado (306 mg/kg MS). Deste modo, e segundo o Decreto Lei 30/2022 e Portaria 185/2022, o valor do Zn coloca estes compostos na Classe II (teor em Zn entre 200 e 500 mg/kg), com alguns deles na classe IIA (Cu entre 200 a 400 mg/kg e Zn entre 500 e 1000 mg/kg). Os compostos da Classe II podem ser utilizados em agricultura e os classificados na classe IIA apenas em culturas agrícolas arbóreas e arbustivas nomeadamente pomares, olivais e vinhas e, em espécies silvícolas. Os compostos da Classe II podem ser aplicados num quantitativo anual de matéria fresca <25 toneladas/ha e os da classe IIA <10 toneladas/ha. Além de possuírem nutrientes, os compostos apresentam a vantagem agronómica de possuírem a MO humificada contribuindo de uma forma rápida para o armazenamento de carbono no solo favorecendo o desenvolvimento do complexo argilo-húmico, com efeitos benéficos nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos.

Tabela 4. Composição físico-química de compostos obtidos a partir de resíduos das atividades agrícola, pecuária e humana. Valores reportados à matéria seca (MS), exceto a humidade, o pH e a condutividade elétrica (n = 15).

	Média	Mediana	dp	CV %	Max	Min
MS (%)	58	62	21	36	94	28
MO (%)	62	64	19	30	89	39
pH (H ₂ O)	7,8	7,6	1,4	18	9,2	5,2
CE (dS/m)	2,5	2,1	1,7	69	6,0	0,4
N-total (%)	2,5	2,0	2,0	79	8,1	0,4
N-org (%)	1,1	1,1	0,2	15	1,3	1,0
P (%)	0,5	0,2	0,7	153	2,4	0,04
K (%)	2,9	2,1	3,5	121	15,0	0,5
Ca (%)	10	7	9	86	38	2
Mg (%)	0,9	1,0	0,6	58	1,9	0,01
Cu (mg/kg)	77	56	92	119	369	5
Zn (mg/kg)	306	264	150	49	605	133

Fonte: Laboratório de Solos e Fertilidade da Escola Superior Agrária de Castelo Branco

Conclusões

A composição físico-química dos estrumes e chorumes provenientes da atividade pecuária apresenta uma elevada variabilidade. Deste modo, quando se pretendem utilizar como fertilizante agrícola é conveniente conhecer a sua caracterização físico-química de forma a proceder à aplicação ao solo de acordo com a legislação aplicável (ver capítulo 3) e com as necessidades da cultura.

O digerido, obtido após a digestão anaeróbia dos efluentes pecuários, é também um produto que pode ser valorizado como fertilizante agrícola. A sua composição físico-química apresenta uma menor variabilidade, mas a sua matéria orgânica será mais resistente à degradação química e microbiológica, uma vez que a fração mais degradável já foi utilizada durante a digestão anaeróbia.

A colocação no mercado de matérias fertilizantes não harmonizadas, como os compostos obedece a legislação específica (DL n.º 30/2022 de 11 de abril e Portaria 185/2022 de 21 de julho). Assim, estas matérias apresentam uma classificação por categoria de acordo com a sua composição físico-química. Esta classificação estabelece a sua utilização em culturas agrícolas (classes I e II), culturas agrícolas arbóreas e arbustivas e espécies silvícolas (Classe IIA)

ou apenas em solos que não se destinam a culturas para alimentação humana ou animal (Classe III). A utilização agrícola, em termos de culturas e quantitativos a aplicar também está definida por este normativo em vigor.

3. Fertilização com resíduos orgânicos de agro-pecuária e compostos: Efeitos agronômicos

Quando utilizamos como matérias fertilizantes os resíduos da atividade pecuária, os digeridos ou os compostos devemos atender não só à sua composição físico-química, às propriedades do solo onde vai ser aplicado e às necessidades da cultura, como também cumprir com a legislação em vigor. Neste último caso, devemos ter em especial atenção o código das boas práticas agrícolas (Despacho nº 1230/2018), o plano de gestão de efluentes pecuários (Portaria nº 79/2022 de 3 de fevereiro) no âmbito do regime geral de gestão de resíduos (DL 102-D2020, de 10 de dezembro), o DL nº 30/2022 e respetiva Portaria 185/2022 sobre a colocação no mercado de matérias fertilizantes e o Manual de Fertilização das Culturas (INIAP, 2006).

Neste capítulo apresentam-se os resultados sobre a valorização agrícola destas matérias fertilizantes, obtidos em ensaios realizados na Escola Superior Agrária de Castelo Branco (ESACB). Nalguns casos, os resultados encontram-se publicados indicando-se a sua referência bibliográfica, o que permitirá obter informação mais detalhada.

3.1. Avaliação de resíduos orgânicos de pecuária como fonte de fósforo para as culturas

É fundamental começar este capítulo referindo a importância do P para a existência de Vida no planeta. O P é um constituinte vital para a nutrição das plantas, sendo que até à presente data, ainda não foi encontrado nenhum outro elemento que possa substituir as funções vitais do P na agricultura. A princi-

pal fonte de P é a rocha fosfatada (proveniente de minas de origem sedimentar), um recurso não renovável, cujas reservas têm vindo a diminuir de forma bastante acentuada. Este fato é devido à exploração intensiva destas reservas que é provocada pela crescente necessidade de fabrico de fertilizantes para a agricultura. Ou seja, a produção de alimentos está intrinsecamente associada à disponibilidade do P, sendo a atividade agrícola, responsável pelo consumo de 90% de todo o P extraído.

Para além deste fato, a localização geográfica das reservas existentes constitui uma limitação de acesso a este recurso. São apenas cinco os países com maiores reservas de rocha fosfatada no mundo: China, Marrocos, EUA, Rússia e a Jordânia. Estes cinco países controlam em conjunto quase 80% da exploração mundial de rocha fosfatada (Jasinski, 2022). Este aspeto evidencia o quão dependente se encontra a Europa quanto à necessidade de importação de fertilizantes para assegurar a sua segurança alimentar. É assim imperativo a procura de novas fontes ricas em P e que possam constituir fontes secundárias de P, como por exemplo os resíduos orgânicos analisados neste documento. Na seção anterior ficou demonstrada a capacidade destes resíduos orgânicos constituírem uma fonte alternativa de P dado que o contêm em elevadas quantidades. A sua recuperação e reutilização são estratégias cada vez mais importantes, que contribuem para uma maior sustentabilidade na fertilização de solos para as gerações futuras bem como para a preservação do ambiente.

A utilização direta de resíduos orgânicos como fertilizante é uma das estratégias testadas no trabalho de Horta et al. (2018). Neste ensaio pretendeu-se avaliar a fitodisponibilidade do fósforo (P) contido em diversos resíduos orgânicos agropecuários por comparação com a fertilização fosfatada mineral tradicional. O ensaio decorreu durante dois anos consecutivos, i.e., dois ciclos culturais realizados em 2012-2013 e 2013-2014. O ensaio foi instalado no campo de erosão hídrica da Escola Superior Agrária de Castelo Branco (Figura 1). Este campo experimental está instalado num Regossolo derivado de granito e é constituído por 18 talhões com uma área de 42 m² cada um, e declive de 9%. No final de cada talhão existe um tanque de recolha da água de escoamento superficial e de sedimentos.

A cultura efetuada foi uma cultura forrageira de Outono - Inverno, o azevém anual (*Lolium* sp.) e os tratamentos instalados foram:

- estrume de bovino compostado (CM),
- fração sólida de chorume de suinicultura (SS),
- fração sólida de chorume de exploração de patos (DS) e
- superfosfato triplo (TSP, 42% de P₂O₅).

Em todos os tratamentos foi aplicado um quantitativo de 50 kg P/ha em cada ano antes da sementeira do azevém e foi realizada a fertilização azotada através de



Figura 1 – Campo experimental de erosão hídrica da Escola Superior Agrária de Castelo Branco.

fertilizantes minerais. Os resíduos orgânicos possuíam um teor em P relativamente elevado. A fração sólida do chorume de pato apresentava um teor 4,5 ou 1,5 g P/kg MF, a fração sólida do chorume de suíno de 4,2 e 1,4 g P/kg MF e o estrume compostado de 1,8 e 1,0 g P/kg MF nos ensaios de 2012-2013 e 2013-2014, respetivamente. Cerca de 80% de teor em P destes resíduos encontrava-se em formas inorgânicas facilmente disponíveis para a cultura.

Observou-se que o P fitodisponível do solo, quantificado pelo método de Olsen (P Olsen, mg P /kg), no final dos dois anos do ensaio, aumentou de um teor no solo de 19 no início do ensaio, para cerca de 30 nos tratamentos TSP e CM, 45 no tratamento SS e 62 mg P/kg no tratamento DS. Valores superiores ou iguais a 30 mg/kg de P Olsen são valores muito elevados em P fitodisponível indicando solos sobrefertilizados. Verificou-se também que a maior parte do P aplicado na fertilização permaneceu no solo, com valores entre 92% no tratamento SS e 96% no tratamento TSP. A proporção do P absorvido pelas plantas em relação ao total aplicado variou entre 5% no tratamento CM a 3,5% no tratamento TSP. A fertilização com estes resíduos orgânicos provenientes da atividade agro-pecuária (CM, SS e DS) originou uma produção de biomassa, absorção de P e eficiência do uso de P pela cultura do azevém superior ou semelhante à proporcionada pela adubação mineral (TSP; Figura 2). O ano de 2013-2014 foi menos pluvioso que o anterior, o que pode justificar alguma diminuição na produção e absorção do P para as mesmas modalidades.

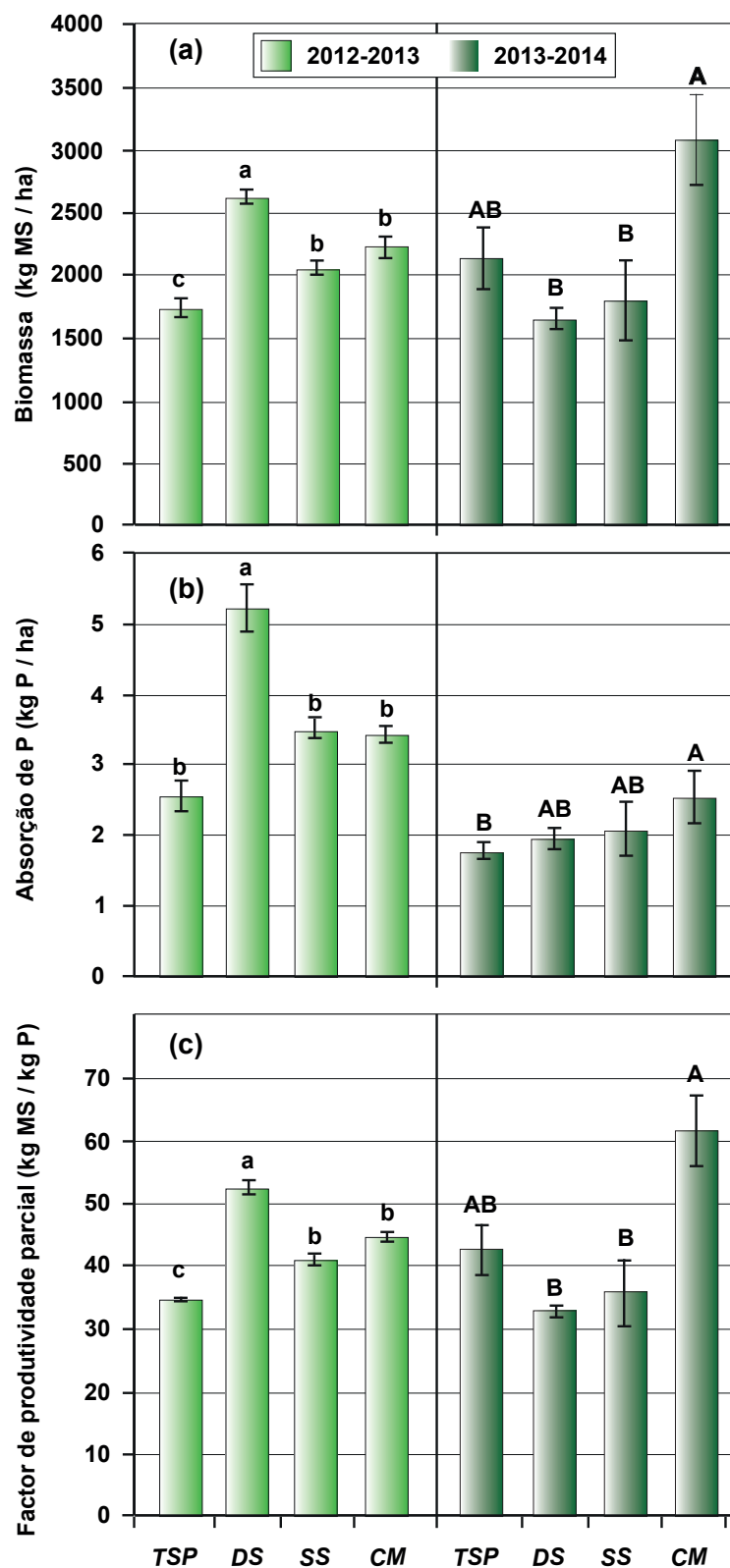


Figura 2 – a) Produção de biomassa (kg MS/ha); b) absorção de P (kg P/ha); c) fator de produtividade parcial (kg MS/kg P). Letras diferentes em cima de cada coluna indicam diferenças estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) entre as modalidades de acordo com o teste de *Tukey* (letras minúsculas no ano 2012-2013 e letras maiúsculas no ano 2013-2014). (Adaptado de Horta et al., 2018)

O estrume de bovino compostado (CM) mostrou proporcionar uma relação Ca/Mg no solo mais equilibrada à nutrição das plantas comparativamente à dos outros tratamentos, a qual se deverá situar ente 2,6 e 4,0 (Figura 3).

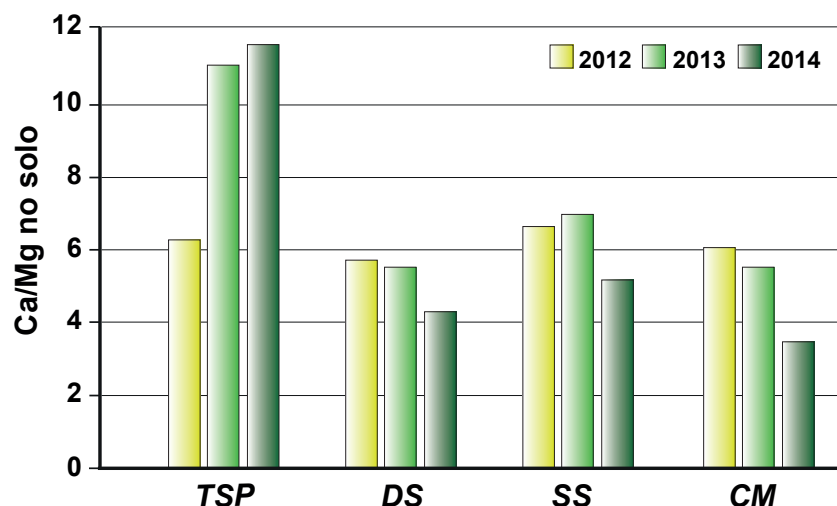


Figura 3 – Relação Ca/Mg no solo antes da instalação do ensaio em 2012 e no final de cada ano de ensaio (2013 e 2014) nas várias modalidades de fertilização com resíduos orgânicos de pecuária e fertilizante fosfatado.

Conclusão

Os fertilizantes orgânicos avaliados neste ensaio, fração sólida de chorume de suínos ou de patos e estrume de bovino compostado, demonstraram disponibilizar quantidades adequadas de vários nutrientes à cultura do azevém, em particular de P, K, Ca e Mg.

O estrume de bovino compostado (CM) foi o que apresentou melhor comportamento agronômico aumentando a produção de biomassa e a eficiência do uso de P, e proporcionando às solo condições mais favoráveis à nutrição das culturas nomeadamente mantendo uma relação Ca/Mg mais equilibrada.

Todos os resíduos orgânicos mostraram apresentar uma fitodisponibilidade em P semelhante ou superior à do adubo mineral utilizado, o superfosfato de cálcio, podendo ser utilizados como fontes de P para as culturas.

3.2. Propriedades fertilizantes da fração sólida de um digerido em comparação com o chorume não digerido, aplicados a um solo ácido numa cultura forrageira

A digestão anaeróbia de chorumes produzidos em explorações pecuárias intensivas para produção de biogás (CH_4), tem merecido cada vez maior atenção, dado possibilitar a utilização de um resíduo orgânico da exploração para a produção de energia que também será aí utilizada, e ainda obter no final da fermentação anaeróbia um produto – o “digerido” – com interesse fertilizante. A digestão anaeróbia (transformação do carbono de resíduos orgânicos em metano CH_4) para a obtenção de biogás, pode ter como substrato apenas o chorume como fonte de carbono, ou ser uma co-digestão do chorume com outros resíduos orgânicos, provenientes principalmente da atividade agrícola, como palhas de cereais, restos de culturas hortícolas entre outros. A utilização do digerido como fertilizante, passa normalmente por uma separação da fração sólida do material orgânico existente após a fermentação anaeróbia, conseguida através de um processo de prensagem para redução do seu teor em água. Neste processo, os nutrientes em solução, como por exemplo as formas minerais de N ficam maioritariamente na fração líquida, que pode por sua vez ser também utilizada como fertilizante.

No ensaio que a seguir apresentamos realizado por Horta e Carneiro (2020), foi utilizada a fração sólida do digerido. Como já referido, a valorização agrícola de chorumes ou de digeridos como fertilizantes, pode contribuir para a reciclagem de nutrientes e de matéria orgânica, integrando-se assim nos objetivos da economia circular aplicada à agricultura. Este ensaio, teve como objetivo central avaliar as propriedades fertilizantes da fração sólida de um digerido resultante da co-digestão de chorume proveniente de uma exploração de vacas leiteiras com centeio (DG) em comparação com o chorume não digerido (CS) e com a adubação mineral tradicional (FM). Utilizou-se uma cultura forrageira, o azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) como planta teste, que foi cultivado em vasos num solo ácido, pobre em P fitodisponível e de textura ligeira, durante 163 dias. Os tratamentos efetuados foram:

- CT – Controlo, sem fertilização;
- FM – Fertilização mineral (Ni e Pi);
- DGPi – Fertilização com digerido + fertilização mineral com Pi;
- DG – Fertilização com digerido;
- DGNiPi – Fertilização com digerido + fertilização mineral com Ni e Pi;
- DGNi – Fertilização com digerido + fertilização mineral com Ni;
- CSPi – Fertilização com chorume + fertilização mineral com Pi;
- CS – Fertilização com chorume;
- CSNiPi – Fertilização com chorume + fertilização mineral com Ni e Pi;
- CSNi – Fertilização com chorume + fertilização mineral com Ni.

Relativamente ao efeito sobre a fertilidade do solo, os resultados mostraram que no final do ensaio nem o DG nem o CS aumentaram significativamente o teor em MO do solo. A possível ação da fração sólida do digerido como corretivo orgânico do solo, foi limitada neste ensaio, não só pelo seu teor ainda muito elevado de humidade (710 g/kg) como também pela quantidade de DG aplicado ao solo, que cumpriu com o disposto no Código das Boas Práticas Agrícolas (no máximo aplicação de 170 kg N/ha), o que levou a uma baixa incorporação de MO no solo. Em relação ao chorume de bovino não digerido por ser um efluente líquido com uma quantidade muito baixa de MO (55,8 g/L) não teve, como esperado, nenhum efeito como corretivo orgânico do solo.

No entanto, o DG aumentou significativamente ($p < 0,001$) o pH que aumentou de 5,1 em CT para 5,6 em DG, a soma das bases de troca do solo e também a fitodisponibilidade em P do solo em comparação com o CS ou a FM (Figura 4).

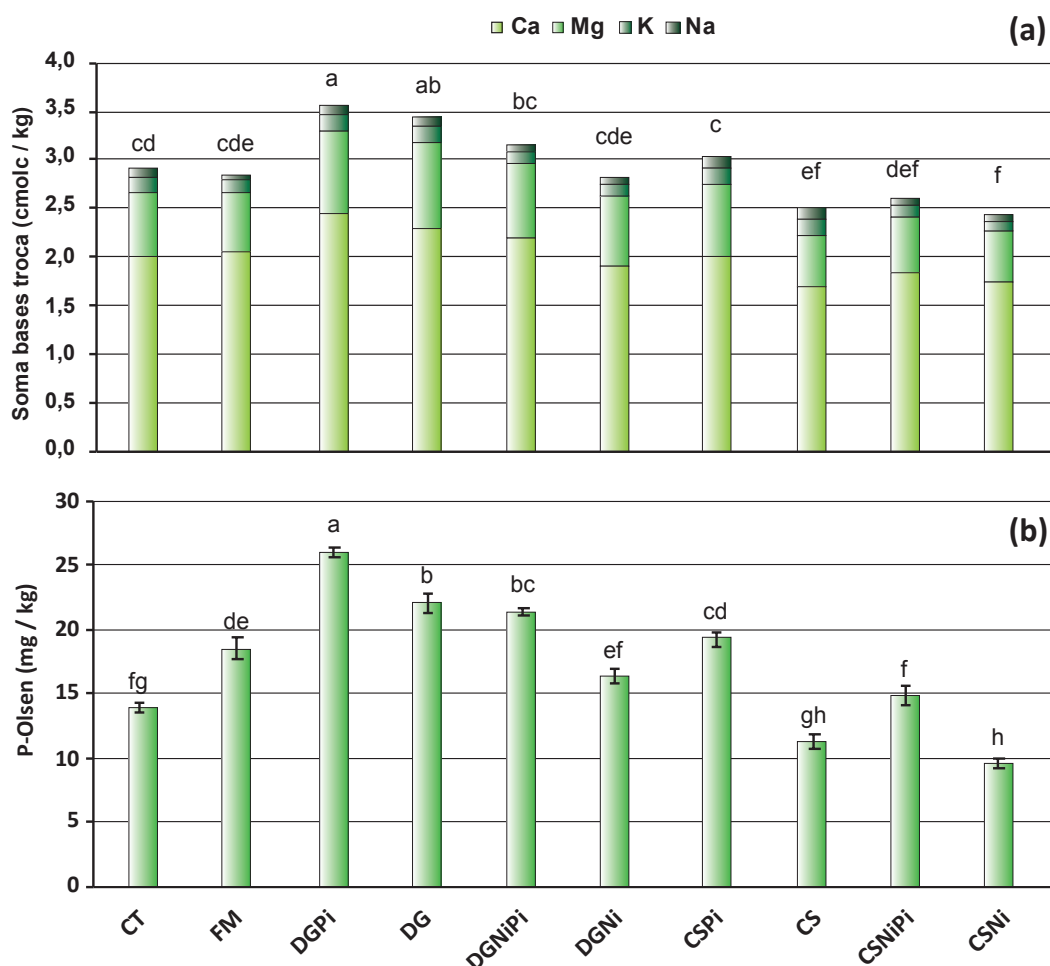


Figura 4 – a) Soma das bases de troca (Ca, Mg, K, Na expressas em cmolc/kg) nos diversos tratamentos no final do ensaio; b) Teor de P Olsen no solo nos vários tratamentos no final do ensaio. Letras diferentes em cima de cada coluna indicam diferenças estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) entre as modalidades de acordo com o teste de *Tukey*. (Adaptado de Horta e Carneiro, 2020)

Relativamente ao efeito dos tratamentos na produção do azevém, observou-se que no primeiro corte, a produtividade do azevém foi significativamente superior ($p < 0,001$) em DG (7,77 g/vaso) do que em FM (5,57 g/vaso), diminuindo no segundo e terceiro cortes em consequência da diminuição da disponibilidade de N. De facto, a proporção do N orgânico (No) relativamente ao N total (Nt) No:Nt do DG foi de 85% e a sua C:N de 12, o que leva a concluir que a baixa disponibilização de N para as culturas do DG pode ter sido devida por um lado a uma mineralização mais lenta da MO do DG, por ser constituída por compostos orgânicos de mais difícil degradação (uma vez que a fração orgânica mais facilmente degradável foi utilizada na digestão anaeróbia) e, por outro lado, também poderá ter ocorrido alguma imobilização do N mineral no solo devido à atividade microbiana na degradação da MO ao longo do ciclo vegetativo. O CS, com uma razão No:Nt de 44% e razão C:N de 9, apresentou uma maior disponibilidade imediata em N, que será utilizada mais precocemente pela cultura, podendo no entanto, sofrer também alguma imobilização no solo. Observou-se ainda que, a produção do azevém na modalidade CS só foi estatisticamente semelhante à do DG (9,63 g/vaso) quando também foi adicionado P mineral, o que indica que o CS não apresenta potencial para ultrapassar a deficiência de P no solo. No entanto, tanto o DG como o CS (com aplicação de P mineral) aplicados num quantitativo que veicule 170 kg de Nt/ha podem substituir metade da adubação mineral aconselhada para o azevém, ou seja economizar 42,5 kg N mineral/ha, sem diminuição significativa na produção de forragem de azevém. Verificou-se ainda que, a aplicação de DG aumentou a eficiência na absorção do P pelo azevém (recuperação aparente do P de 43%) quando comparada com a fertilização mineral (27%). Este aumento pode ser devido não só à fitodisponibilidade do P contido no DG, como também a algum efeito de dessorção de fosfato do solo. De facto, os ácidos orgânicos produzidos pela mineralização da MO do DG facilitarão a dessorção de P de alguns constituintes do solo, melhorando a sua disponibilidade para a cultura. Deste modo, o DG permitiu uma maior eficiência no uso de P do que o CS ou o FM.

Conclusão

O efeito da fração sólida do digerido como corretivo orgânico do solo foi limitado pelo seu elevado teor de humidade. No entanto, o digerido teve um efeito benéfico sobre o pH do solo, no aumento da soma das bases de troca do solo e na disponibilidade em P, comparativamente à aplicação de chorume ou à fertilização mineral. Apesar do digerido conter N com uma taxa de mineralização mais lenta do que o chorume, ambos providenciaram semelhante disponibilidade imediata de N, substituindo a aplicação de N à sementeira. A fertilização com a fração sólida do digerido apresentou a vantagem de disponibilizar P para a cultura originando, sem haver quebra na produção, uma poupança de adubo mineral fosfatado.

3.3. Propriedades fertilizantes da fração sólida de um digerido como corretivo orgânico e fonte de azoto para culturas hortícolas

Como referido anteriormente, a digestão anaeróbia é um processo valioso para produzir energia verde a partir de efluentes de pecuária, obtendo-se no final do processo um subproduto chamado digerido, com valor fertilizante. O objetivo deste ensaio desenvolvido por Horta e Carneiro (2022), foi o de avaliar o valor fertilizante da fração sólida de um digerido (DG) como corretivo orgânico e como fonte de azoto para culturas em substituição ao N mineral (Ni) em condições de campo e em duas culturas hortícolas consecutivas (alface e couve kale). O solo do ensaio tinha textura ligeira, era pouco ácido ($\text{pH} = 6,4$), apresentava um teor alto em MO (5,4%), alto em P Olsen (149 mg/kg) e alto em potássio de troca (1,4 cmolc/kg). Os tratamentos efetuados foram:

- CT – testemunha sem fertilização;
- Ni85 – fertilização mineral Ni85 com 85 kg/ha de N mineral;
- DG – digerido a uma taxa crescente de aplicação de azoto (kg N/ha): DGN85, DGN170, DGN255, DGN340;
- DG+Ni – fertilização com digerido juntamente com Ni: DGN85+Ni60, DGN170+Ni60, DGN170+Ni25.

Os resultados, no final dos dois ciclos vegetativos mostraram um efeito benéfico do DG como corretivo orgânico do solo. A MO do solo aumentou significativamente ($p < 0,001$) nas modalidades com DG (7,7%) por comparação com o tratamento controlo (6,1%) ou com a adubação mineral (5,6%). Observou-se também um efeito benéfico sobre o pH com um valor de 6,5 na modalidade DGN170 comparando com 5,8 na Ni85, e também sobre as bases de troca (BT) do solo. A soma das BT na modalidade DGN170 foi de 9,11 e na Ni85 foi de 7,87 cmolc/kg, resultado do elevado teor em bases do DG. O digerido mostrou também poder substituir parte da adubação azotada mineral. A baixa mineralização da MO estável do DG juntamente com alguma imobilização de N mineral proveniente do DG causaram uma diminuição na disponibilidade em N para as culturas relativamente à adubação mineral. No entanto, o DG não se comportou de igual forma nas duas culturas relativamente à disponibilidade de N. Verificou-se que, uma menor razão entre o N proveniente de fontes orgânicas e o N total (No:Nt), por exemplo de $\approx 0,65$ observada no DG aplicado à alface, necessita de menor adição de azoto mineral (Ni) na fertilização para manter a produção de biomassa da cultura semelhante à da adubação mineral (Figura 5). Nesta cultura, a aplicação do digerido num quantitativo que forneceu 170 kg de N/ha substituiu 70% da fertilização mineral azotada. Por seu lado, o DG utilizado na couve apresentava uma razão $\text{No:Nt} \approx 0,81$ substituindo apenas 40% da fertilização (Figura 5).

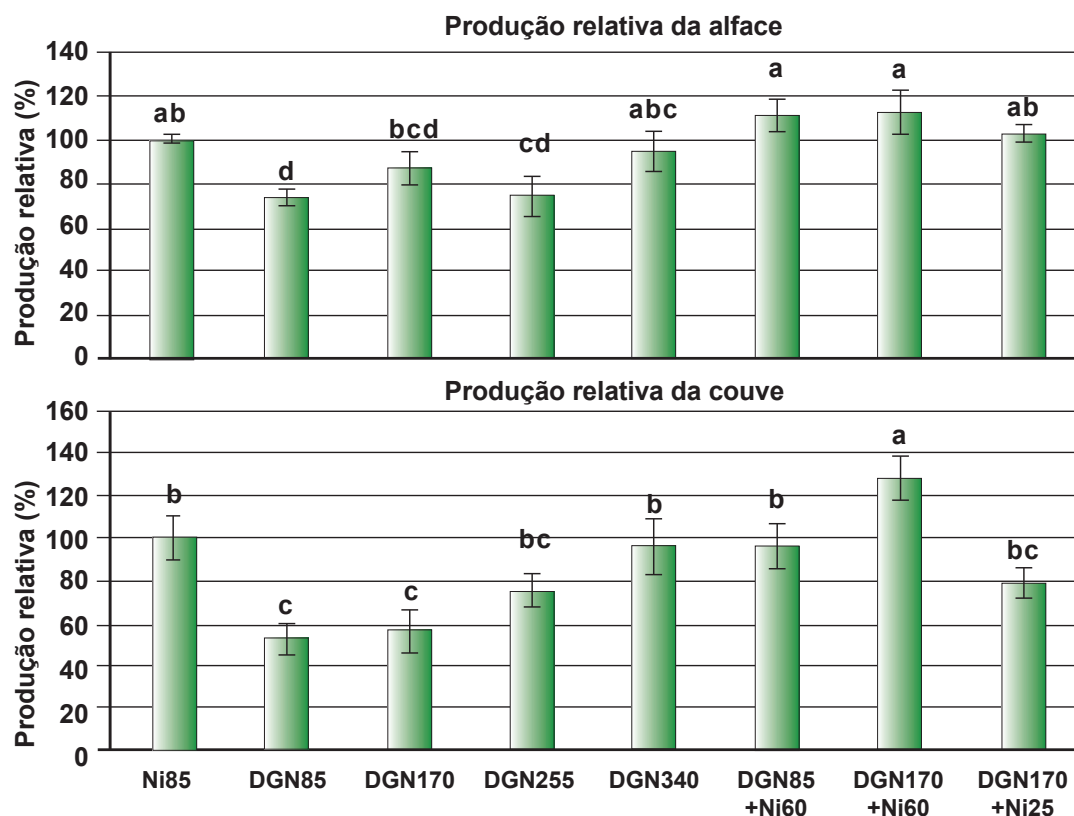


Figura 5 – Produção relativa² obtida nos vários tratamentos a) na cultura da alface e b) na cultura da couve. Letras diferentes em cima de cada coluna indicam diferenças estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) entre as modalidades de acordo com o teste de *Duncan's*. (Adaptado de Horta e Carneiro, 2022)

Conclusão

A aplicação da fração sólida do digerido ao solo na fertilização de duas culturas hortícolas contribuiu para o aumento da MO do solo, para o aumento do pH e da soma das bases de troca do solo, originando melhores condições para o crescimento das culturas. O digerido não conseguiu substituir a totalidade da fertilização mineral azotada. A proporção do N em formas orgânicas relativamente ao N total do digerido (No:Nt), é um parâmetro relevante na avaliação da disponibilidade de N para as culturas. Assim, no caso em estudo e para uma produção de biomassa semelhante, a fertilização com digerido com uma razão No:Nt de 0,65 necessitará da aplicação de 170 kg N /ha através do digerido mais 25 kg/ha de N mineral, enquanto que para uma razão No:Nt de 0,80 a fertilização azotada necessitará da aplicação de 85 kg N/ha através do digerido mais 60 kg/ha de N mineral. Em ambos os casos, há uma poupança de N relativamente à adubação tradicional na qual se aplicou 85 kg N/ha neste ensaio em campo. O digerido mostrou poder substituir parte da

² Produção relativa (%) = (Biomassa modalidade / Biomassa Ni85) x 100

fertilização mineral azotada, conduzindo a uma poupança de recursos naturais, e simultaneamente à produção de energia verde (CH_4).

3.4. Fertilização com Composto: Efeitos na sorção de fósforo e na disponibilidade de fósforo em solos ácidos

Os fertilizantes minerais fosfatados são fabricados a partir de recursos não renováveis como referido anteriormente. A fertilização do solo com compostos conduz não só à incorporação no solo de MO humificada, como também é uma boa fonte de nutrientes para as culturas, nomeadamente de P. O objetivo deste trabalho realizado por Horta (2019), foi avaliar o efeito da fertilização com um composto na sorção de fosfato pela fração sólida do solo e, consequentemente, na sua disponibilidade para as culturas. Foi realizado um ensaio de incubação seguido de um ensaio de sorção de fosfato num solo ácido, com baixo teor de P. As modalidades avaliadas compreenderam a fertilização do solo com composto (CP) ou com superfosfato simples (SSP).

O composto utilizado neste ensaio foi obtido após a compostagem de lamas provenientes do tratamento de águas residuais urbanas com serradura. Como se pode observar pela tabela 5 as características físico-químicas do composto utilizado permitem classificá-lo num composto Classe II (Portaria 185/2022 de 21 de julho), podendo ser utilizado como fertilizante em agricultura.

Tabela 5. Caracterização físico-química do composto utilizado no ensaio

MS	MO	pH	CE	Nk	P	K	Ca	Mg	Na
g / kg			dS / m				g / kg		
610	862	5,7	0,68	22,1	1,7	150	121	9,5	2,6
Cd	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	No:Nt	C:N	C:P	N:P
			mg / kg						
<0,04	12	22	14	105	490	0,57	16	29	13

No ensaio de incubação, a quantidade de P aplicada ao solo foi a correspondente à aplicação de: 0; 6,5; 13; 26 e 52 kg P/ha. Nos tratamentos com composto, as taxas de 26 e 52 kg/P ha foram alcançadas pela adição de SSP ao CP (CP+SSP), uma vez que por legislação não é permitido incorporar por ano mais do que 170 kg N/ha através de fertilizantes orgânicos, o que limitou o quantitativo de P aplicado através do composto. Embora o SSP tenha uma proporção

maior de P facilmente disponível do que o CP (86% e 50% respectivamente), os resultados mostraram que após 140 dias de incubação, o P disponível no solo (avaliado como o teor de P Olsen, (Figura 6a) foi maior nos tratamentos com CP em comparação com SSP, para a mesma taxa de aplicação de P.

O ensaio de sorção mostrou que, após a incubação dos solos fertilizados, a quantidade máxima de P sorvida pelo solo apresentou valores menores nos tratamentos com CP+SSP em comparação com a adubação apenas com SSP. Observou-se também que, a energia de ligação do fosfato à fase sólida teve uma diminuição mais acentuada nos mesmos tratamentos. Como consequência, a quantidade de fosfato sorvido necessário para manter em solução uma concentração de 0,2 mg / L de P (considerada adequada para a nutrição das culturas) diminuiu nas modalidades com adição CP+SSP (Figura 6b).

Esta diminuição na capacidade do solo em sorver o fosfato após a adição de composto, destaca a necessidade de reduzir a taxa de fertilização fosfatada para atingir níveis semelhantes de P biodisponível aos obtidos apenas com a fertilização mineral.

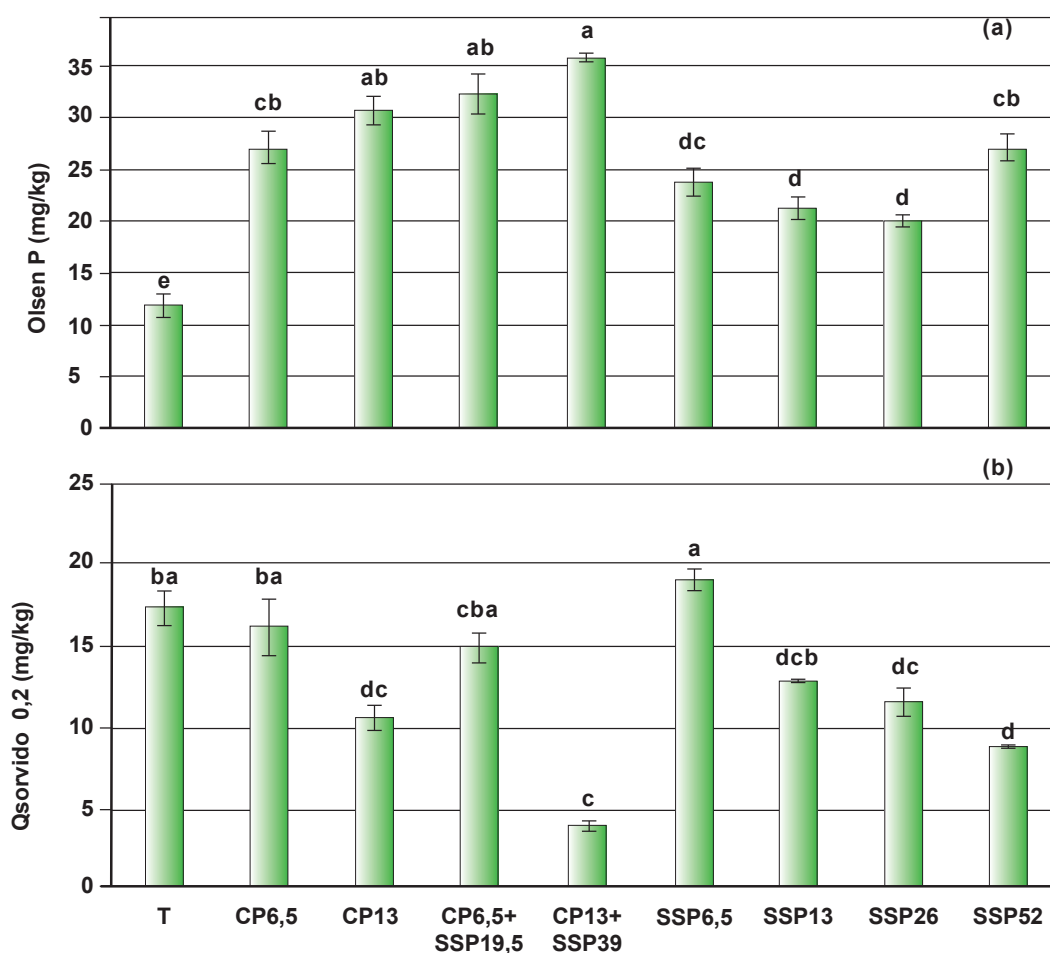


Figura 6 – Fósforo no solo nos diferentes tratamentos, a) P disponível - OlsenP (mg / kg), P sorvido em equilíbrio com uma concentração de P em solução de 0,2 mg / L. Letras diferentes em cima de cada coluna indicam diferenças estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) entre as modalidades de acordo com o teste de *Tukey*. (Adaptado de Horta, 2019).

Conclusão

A fertilização com o composto originou um aumento do P disponível no solo. Este aumento foi devido por um lado ao P existente no composto e, por outro lado, ao efeito do composto na diminuição do P sorvido na fase sólida do solo. Observou-se que, a adição de composto diminuiu não só a quantidade máxima de P sorvido como também diminuiu a sua energia de ligação à fase sólida do solo. Deste modo, a fertilização com composto conduz a uma diminuição na quantidade de P a aplicar ao solo necessária para manter em solução um nível adequado para a nutrição das culturas (0,2 mg P/L). Em resumo, sob o ponto de vista agronómico, a fertilização com composto permite reduzir a quantidade de P a aplicar mantendo no solo um teor adequado para as culturas.

3.5. Fertilização com composto peletizado e sem peletizar na cultura da alfaca: Efeito na disponibilidade de N

A peletização dos compostos tem vindo a assumir-se como uma prática generalizada para a sua comercialização. De facto, a peletização facilita as operações de ensacamento, transporte e distribuição no solo do composto. A peletização é realizada através da operação unitária da extrusão, que consiste na compressão e modelagem sob a forma de cilindros de diâmetro uniforme, da massa do composto a peletizar. Assim, o composto é obrigado a passar por uma rede ou placa com orifícios com um raio e comprimento definidos. O composto utilizado neste ensaio foi peletizado com uma matriz com orifícios de 6 mm de diâmetro e 26 mm de compressão ou uma matriz com orifícios de igual diâmetro e 22 mm de compressão. No primeiro caso, os pellets obtidos foram denominados como P42 e no segundo caso como P43.

Os valores da densidade dos pellets produzidos na matriz de maior compressão (P42) foi de 771 kg/m³ e a sua durabilidade (resistência à desagregação) foi de 98,7%. Por seu lado, os pellets produzidos na matriz de menor compressão (P43) apresentaram valores de densidade e durabilidade inferiores, 705 kg/m³ e 90,2%, respetivamente. As diferenças observadas podem ser relevantes para o seu comportamento agronómico, uma vez que os pellets sendo menos duros (menor durabilidade) podem desagregar-se com maior facilidade e disponibilizar os nutrientes mais rapidamente para as culturas. O composto utilizado neste ensaio foi obtido a partir da compostagem da fração sólida de chorume de suínos e de lenha de poda. Foi objetivo deste trabalho avaliar se a peletização afeta a disponibilidade de nutrientes, em particular o N, ao longo do ciclo de uma cultura hortícola.

Tabela 6. Caracterização físico-química do composto e dos pellets utilizados no ensaio de campo

	MS	MO	pH	EC	Nk	P	K	Ca	Mg
	g / kg			dS / m	g / kg MS				
CP	803	540	7,2	0,79	18,1	6,53	16,9	111	16,5
P42	797	542	7,3	1,0	17,6	6,11	17,6	99	15,0
P43	766	544	7,4	0,92	18,5	6,23	17,8	118	16,7

Fonte: Projeto INTERREG 0745 SYMBIOSIS_II_3_E

Como se pode observar pelas tabelas 6 e 7 as características físico-químicas do composto utilizado permitem classificá-lo num composto Classe II, podendo ser utilizado como fertilizante em agricultura num quantitativo máximo anual de 25 toneladas de matéria fresca por hectare.

Tabela 7. Avaliação como fertilizante do composto segundo o quadro normativo em vigor (Portaria 185/2022 de 21 de julho)

	MS	MO	pH	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn	Class.
	g / kg			g / kg MS						
Portaria	600	300	5,5 - 9,0	0,7	100	100	100	50	200	Classe I
185/2022	(min)	(min)		1,5	150	200	150	100	500	Classe II
Composto	766	540	7,4	<LDM (0.02)	4	79	39	18	332- 385	Classe II

O delineamento experimental do ensaio foi completamente casualizado com nove modalidades e com quatro repetições de cada modalidade. Realizou-se um ensaio em campo, instalado num Cambisolo distríco, pouco ácido (pH = 6,0), com um teor elevado em MO (5,1%), muito elevado em P disponível (P Olsen = 72 mg/kg) e em K disponível (272 mg/kg). A cultura utilizada foi a alface (*Lactuca sativa* L., variedade Funfix, frisada verde). A plantação da alface ocorreu a 10 de abril de 2021 e a colheita realizou-se no dia 1 de julho. Uma vez que o solo possuía níveis elevados de P e K disponíveis, apenas se realizou a adubação azotada. Assim, os tratamentos efetuados foram:

CT - Controlo, sem fertilização;

FMNi85 - fertilização azotada mineral (Ni) com 85 kg de Ni/ha, aplicando o N da seguinte forma: 35 kg Ni/ha em fundo, 25 kg Ni/ha na primeira cobertura e 25 kg Ni/ha na segunda cobertura;

P42N170 - fertilização com pellets 42 num quantitativo de 170 kg de N/ha em fundo;

- P43N170 - fertilização com pellets 43 num quantitativo de 170 kg de N/ha em fundo;
- CPN85+Ni42,5 - aplicação de composto sem peletizar num quantitativo de 85 kg de No/ha e Ni num quantitativo de 42,5 kg Ni/ha, aplicando 22,5 kg Ni/ha em fundo e 20 kg Ni/ha na primeira cobertura;
- P42N85+Ni42,5 - fertilização com pellets 42 num quantitativo de 85 kg de No/ha e Ni num quantitativo de 42,5 kg Ni/ha, aplicando 22,5 kg Ni/ha em fundo e 20 kg Ni/ha na primeira cobertura;
- P43N85+Ni42,5 - fertilização com pellets 43 num quantitativo de 85 kg de No/ha e Ni num quantitativo de 42,5 kg Ni/ha, aplicando 22,5 kg Ni/ha em fundo e 20 kg Ni/ha na primeira cobertura;
- P42N85+Ni85 - fertilização com pellets 42 num quantitativo de 85 kg de No/ha e Ni num quantitativo de 85 kg Ni/ha, aplicando 35 kg Ni/ha em fundo, 25 kg Ni/ha na primeira cobertura e 25 kg Ni/ha na segunda cobertura;
- P43N85+Ni85 - fertilização com pellets 43 num quantitativo de 85 kg de No/ha e Ni num quantitativo de 85 kg Ni/ha, aplicando 35 kg Ni/ha em fundo, 25 kg Ni/ha na primeira cobertura e 25 kg Ni/ha na segunda cobertura.

Aplicaram-se cerca de 12 toneladas/ha de matéria fresca dos pellets para veicular a aplicação de 170 kg N/ha, e aplicou-se cerca de 6 toneladas/ha de matéria fresca de composto e pellets para veicular 85 kg N/ha.



Figura 7 – a) composto, b) composto peletizado P42 e c) Composto peletizado P43

Fonte: Fotografias cedidas pelo Projeto INTERREG 0745 SYMBIOSIS_II_3_E

Os resultados obtidos no ensaio relativamente ao efeito dos vários tratamentos na produção de biomassa e na produção relativa (Figura 7) indicam o seguinte:

A fertilização azotada originou aumento significativo da biomassa, e a fertilização com composto (peletizado ou sem peletizar) originou uma produção de biomassa similar à modalidade com fertilização mineral. A peletização originou uma produção relativa superior (98 – 123%) à do composto (83%). A aplicação de pellets numa quantidade equivalente a 170 kg N / ha dispensou a adubação mineral azotada. Os

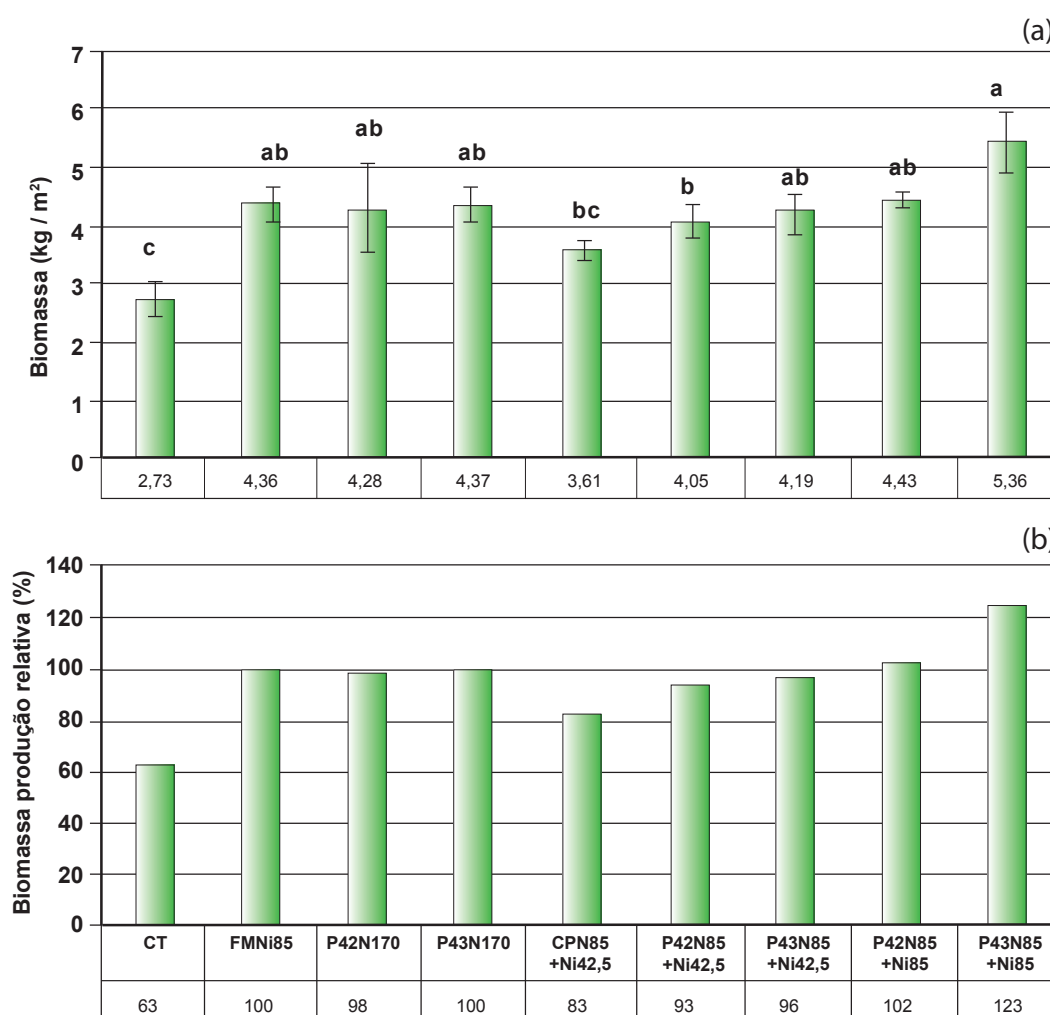


Figura 8 – Produção de biomassa da alface nos vários tratamentos, a) biomassa (matéria verde) e b) produção relativa. Letras diferentes por cima das colunas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$).

Fonte: Projeto INTERREG 0745 SYMBIOSIS_II_3_E

pellets P43 mostraram uma tendência para originar produções superiores aos P42.

Relativamente ao efeito no solo, apontam-se como efeitos mais relevantes o aumento significativo no teor em P e K disponíveis no solo observado nos tratamentos P42N170 e P43N170 (Figura 9).

O teor em MO do solo aumentou em todos os tratamentos relativamente ao tratamento controlo (MO = 5,3), observando-se os aumentos mais expressivos nas modalidades com aplicação de composto peletizado (MO = 5,8).

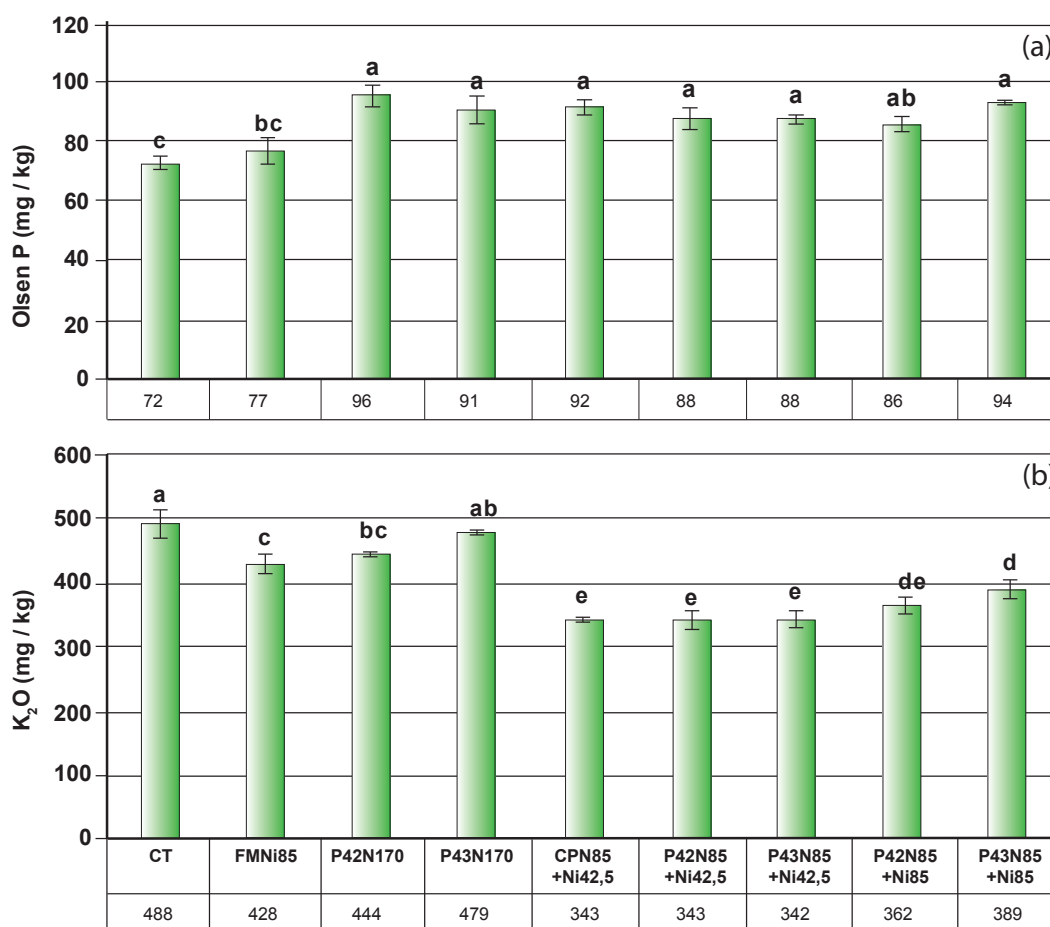


Figura 9 – Teores no solo, a) fósforo disponível (P, mg / kg) e b) potássio disponível (K₂O, mg / kg). Letras diferentes por cima das colunas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$).

Fonte: Projeto INTERREG 0745 SYMBIOSIS_II_3_E

Conclusões

A fertilização de alface com composto peletizado num quantitativo que forneça 170 kg de N/ha, pode substituir a fertilização mineral azotada sem quebra de produção. Esta fertilização também originou no solo condições de fertilidade mais favoráveis à cultura da alface, melhorando a biodisponibilidade em P e em K, o pH e a soma das bases de troca relativamente à fertilização mineral azotada.

O composto comportou-se como um corretivo orgânico, melhorando o teor em MO do solo, em especial as modalidades com aplicação de composto peletizado.

O composto peletizado com uma matriz de compressão de 22 mm (P43) e num quantitativo que forneça 170 kg N/ha mostrou ser melhor opção agronómica quando comparada com o composto peletizado com uma matriz de compressão de 26 mm ou com o composto sem peletizar.

4 - Fertilizantes de base biológica

Atualmente estão a ser desenvolvidos processos de recuperação de nutrientes, a partir dos resíduos orgânicos produzidos pelas atividades pecuária, agro-industrial ou humana. Neste capítulo, apresentam-se dois processos distintos, utilizados na recuperação do N e do P em efluentes, que permitem obter fertilizantes de base biológica, com uma concentração conhecida do nutriente recuperado, estando este na forma mineral. Assim, a comercialização destes fertilizantes e a sua utilização em agricultura conduzem a uma poupança efetiva de recursos naturais, contribuindo para a circularidade dos nutrientes em agricultura.

4.1 - Tecnologias de recuperação de nutrientes

Recuperação de Azoto

Um dos processos utilizados na recuperação do azoto a partir de efluentes é o processo conhecido como “Gas Permeable Membrane technology”, (GPM), aqui denominada como tecnologia de membranas permeáveis aos gases. Este processo de recuperação de azoto, assenta na volatilização do N contido no efluente na forma de NH_3 e na sua captura através de uma membrana permeável aos gases colocada no interior do recipiente que contém o efluente (Figura 10 apresenta um diagrama da tecnologia de GPM, com descrição das reações químicas envolvidas). A volatilização do N do efluente é conseguida pela subida de pH através da sua oxigenação. O NH_3 após atravessar a membrana é transformado em sulfato de amónio por reação com uma solução de ácido sulfúrico 1N que circula dentro da membrana. Esta solução de sulfato de amónio é recebida num frasco de Erlenmeyer (Horta et al., 2022).

Em suma, o processo GPM permite a obtenção de um sal, o sulfato de amónio, que pode ser utilizado como bio fertilizante líquido em agricultura.

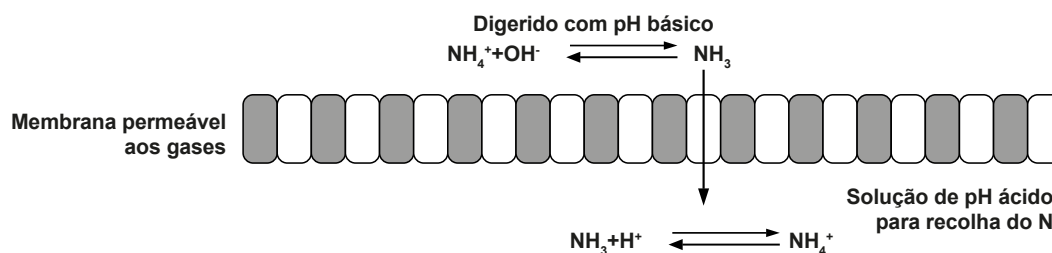
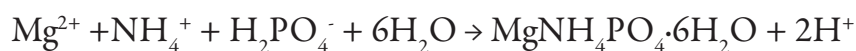


Figura 10 – Diagrama de seção transversal da membrana permeável aos gases (adaptado de Riaño et al. 2021)

Recuperação de azoto e fósforo

Outro processo de recuperação de azoto e de fósforo é através da sua precipitação química sob a forma de fosfato de amónio e magnésio ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), originando um precipitado denominado estruvite (Figura 11). A estruvite é uma substância cristalina constituída por 13% de P, 6% de N e 10% de Mg e que se forma sob condições alcalinas de acordo com a seguinte reação química:



Na reação de precipitação da estruvite estão envolvidas duas fases distintas: na primeira fase ocorre a nucleação e aparecimento do cristal; na segunda fase dá-se o crescimento dos cristais de estruvite. Estes mecanismos de formação da estruvite podem ser afetados pelo pH da solução, nível de saturação da solução, agitação, temperatura e pela presença de outros iões e impurezas orgânicas.

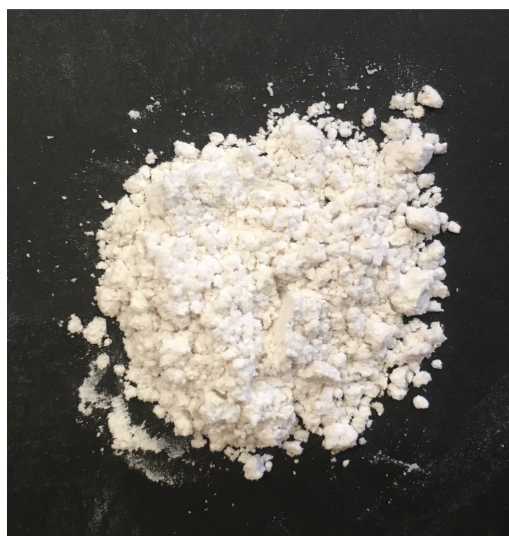


Figura 11 – Estruvite após secagem a temperatura inferior a 50°C

A precipitação de estruvite como método para a recuperação de P e N a partir de resíduos orgânicos deve ser promovida após a extração prévia do P e do N contido nesse resíduo. Um dos processos que pode ser utilizado para promover a extração do fósforo é o processo electrodialítico. Este processo permite a separação dos iões presentes em matrizes ambientais, como por exemplo, os resíduos, através da utilização de corrente elétrica de baixa intensidade e membranas de troca iónica. Ou seja, os aniões (e.g. PO_4^{3-}) presentes na matriz mover-se-ão em direção ao pólo com carga positiva, atravessando uma membrana seletiva de troca aniónica; e os catiões irão mover-se em direção ao pólo com carga negativa, passando através de uma membrana seletiva de troca catiónica. Na figura 12 mostra-se o esquema de um reator eletrodialítico utilizado na extração de P de digerido de resíduos urbanos (Oliveira et al., 2020).

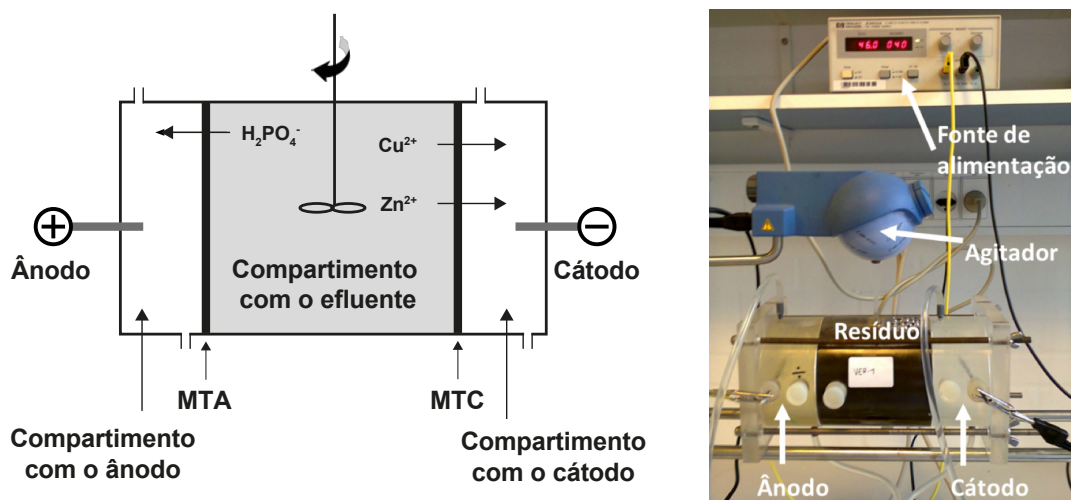


Figura 12 – Reator eletrodialítico utilizado para a extração de fósforo. Membrana de Troca Aniônica (MTA) e Membrana de Troca Catiônica (MTC). (adaptado de Oliveira et al., 2020)

No trabalho realizado por Oliveira et al. (2021) pretendeu-se investigar uma nova abordagem para recuperar simultaneamente o P e o N a partir de um digerido de resíduos urbanos baseada na combinação de dois processos de extração à base de membranas: o processo electrodialítico para a extração de P (apresentado acima) e a tecnologia de membranas permeáveis aos gases para extração de N (apresentada na seção anterior), seguida da precipitação de estruvite. Os resultados obtidos mostraram que foi possível extrair 81% do P e 74% do N do digerido de resíduos urbanos. O processo de síntese da estruvite foi um sucesso, atingindo 99,5% de eficiência de precipitação. Foram conduzidas três experiências de precipitação para recuperação de P e N: a) Estruvite-S, com fontes sintéticas de N e Mg; b) Estruvite-SA, com fonte alternativa de N e fonte sintética de Mg e c) Estruvite-A, com fontes alternativas de N e de Mg. Em todas estas experiências foi confirmado, pela técnica de difração de raio-x, que os precipitados obtidos eram constituídos por 100% de cristais de estruvite (Figura 13).

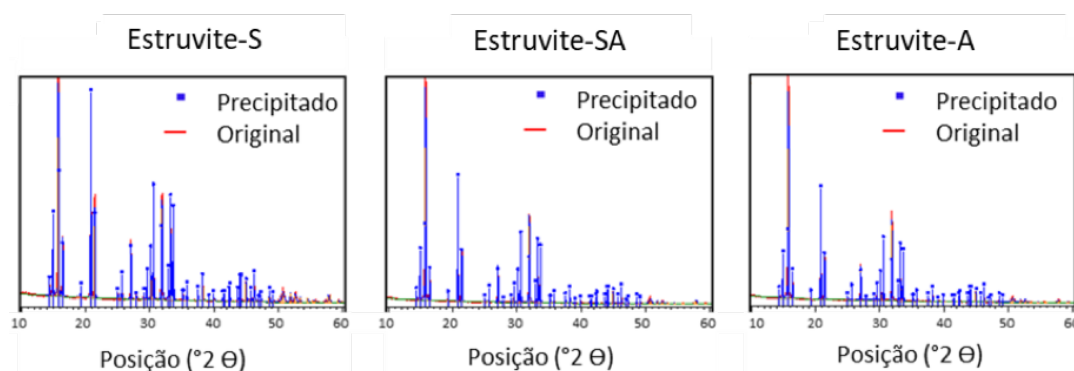


Figura 13 – Diagrama de difração raio-x dos precipitados obtidos com fontes sintéticas de N e Mg (Estruvite-S), com fonte alternativa de N e fonte sintética de Mg (Estruvite-SA), e com fontes alternativas de N e de Mg (Estruvite-A)

Quando um fertilizante é sintetizado a partir de resíduos orgânicos contendo metais pesados na sua composição, como é o caso dos digeridos de resíduos urbanos, deve também ser realizada uma análise química da matéria fertilizante. Isto porque, se o objetivo é aplicar o fertilizante ao solo, deve-se avaliar se cumpre os limites impostos na legislação quanto ao teor de metais pesados. No estudo realizado por Oliveira et al. (2020), verificou-se que, nas três condições testadas (A1 a A3), a estruvite sintetizada para recuperar o P do digerido de resíduos urbanos respeita os limites impostos pela legislação portuguesa (Tabela 8). Os elementos Cd, Cu e Ni apresentam-se em concentração vestigiais, não sendo mesmo detetados em alguns dos precipitados obtidos. Quanto às concentrações de Cr, Pb e Zn apresentam valores muito abaixo dos limites exigidos pela legislação.

Tabela 8. Teor de metais pesados nos precipitados sintetizados utilizando diferentes condições experimentais de extração eletrodialítica de P (LQ: limite de quantificação; ND: não detetado)

Metais pesados	A1	A2	A3	Limites em Portugal para aplicação de fertilizantes * mg / kg
Cd	<LQ	<LQ	<LQ	1,5
Cr	4,5±0,2	3,3±0,3	6,9±0,2	150
Cu	<LQ	2,3±0,5	<LQ	200
Ni	ND	ND	<LQ	100
Pb	7,6±0,3	13,0±0,6	13,6±0,1	150
Zn	13,2±1,6	22,9±1,0	15,7±0,6	500

* Portaria 185/2022 de 21 de julho.

Conclusões

As elevadas taxas de recuperação de P e N alcançadas são animadoras e o fertilizante sintetizado a partir de resíduos da atividade agro-pecuária ou humana, nomeadamente a estruvite, apresenta boa qualidade para aplicação em solos agrícolas. Isto evidencia a possibilidade de substituição de fertilizantes minerais, fabricados a partir de fontes finitas, por fertilizantes de base biológica produzidos a partir de nutrientes extraídos de resíduos da actividade pecuária e humana.

4.2 Avaliação agronómica de fertilizantes de base biológica

4.2.1 Avaliação do valor fertilizante de uma solução com azoto recuperado

Realizou-se um ensaio em vasos de pequena capacidade (150 g de terra fina), usando como planta teste o tritcale. O ensaio decorreu numa câmara de crescimento (fitoclima) com temperatura, humidade, radiação e fotoperíodo controlados. A duração do ensaio foi de 34 dias após a emergência do tritcale. O solo utilizado foi um Cambissolo dístico derivado de xisto. A classe de textura do solo era franco-arenosa, apresentava um pH ácido ($\text{pH} = 5,0$) um teor elevado em MO (3,9%), um teor médio em P (Olsen P = 13 mg/kg) e um teor elevado em potássio (Al-K = 162 mg/kg). Efetuaram-se 3 tratamentos, cada um com 4 repetições. Os tratamentos efetuados foram:

CT – Controlo sem fertilização;

Hoag – Fertilização com uma solução nutritiva, usando-se a solução de Hoagland;

N-rec + Hoag – Tratamento com a solução de N recuperado juntamente com a solução de Hoagland produzida sem azoto.

Nos tratamentos com fertilização, a nutrição do tritcale foi assegurada por todos os nutrientes contidos na solução de Hoagland, variando apenas a fonte de N utilizada. No tratamento Hoag utilizou-se N mineral e no tratamento N-rec a solução amoniacal com o N recuperado. Nas modalidades fertilizadas o total de N aplicado no final do ensaio foi de 100 mg N em cada vaso. A figura 14 mostra a biomassa produzida e a absorção de N dos vários tratamentos.

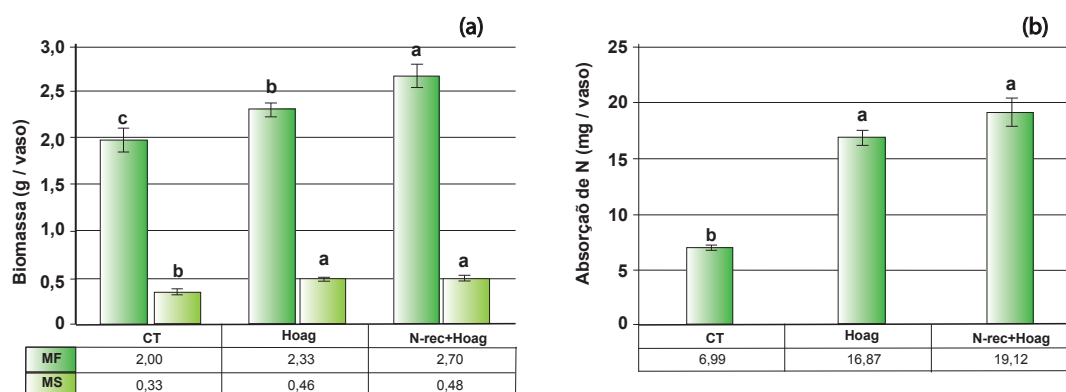


Figura 14 – a) Produção de biomassa (matéria fresca - MF e matéria seca - MS) do tritcale nos diferentes tratamentos (g / vaso), b) absorção de N pelo tritcale nos diversos tratamentos (mg / vaso). Letras diferentes por cima das colunas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$).

Como se pode observar, a fertilização azotada aumentou significativamente a produção e a absorção de N pelo tritcale. Relativamente ao efeito dos dois fertilizantes azotados observa-se um efeito similar entre eles, ainda que o tratamento fertilizado com a solução de N recuperada apresente uma tendência para uma produção de biomassa e de absorção de N superior à fertilização mineral. Resultados semelhantes foram obtidos num ensaio realizado no Regosolo dístico com fertilização do tritcale utilizando as mesmas modalidades (Horta et al., 2022).

Conclusões

A tecnologia da membrana permeável aos gases mostrou ser uma tecnologia promissora para a recuperação de N de efluentes agroindustriais e de pecuária. O N recuperado numa solução de sulfato de amónio mostrou apresentar um efeito agronómico semelhante ao da adubação mineral azotada. Deste modo, o fertilizante com o N recuperado, pode ser considerado um fertilizante líquido de acordo com o quadro normativo Europeu em vigor Fertilizer Regulation EU 2019/1009 como um EC fertilizer – category CI b i).

4.2.2 Avaliação de valor fertilizante da estruvite

Após a etapa de recuperação de P do digerido de resíduos urbanos sob a forma de estruvite, referida na seção 4.1 deste livro, Oliveira et al. (2019) realizaram um ensaio em vasos de pequena capacidade (150 g de terra fina), para avaliar o valor

agronômico da estruvite produzida relativamente aos fertilizantes minerais tradicionais (N e P). Neste ensaio foram realizados três tratamentos, cada um com quatro repetições, totalizando 12 vasos (como pode ser visualizado na Figura 15):

CT - Controlo sem fertilização;

SSP - Fertilização com superfosfato simples;

Estruvite - Fertilização com estruvite sintetizada a partir de digerido de resíduos urbanos.

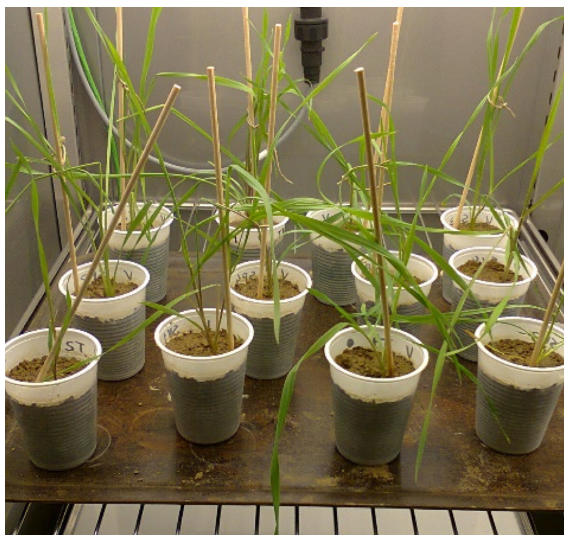


Figura 15 – Ensaio em vasos para avaliação do efeito fertilizante da estruvite

Em cada vaso foi colocado 150 g de terra fina misturado com o fertilizante, no caso dos tratamentos com SSP e estruvite (taxa de aplicação de 13,1 mg por kg de solo, o que corresponde a 30 kg P/ha), ou sem o fertilizante no caso do controlo (após incubação durante 30 dias, a 25 °C), e 50 g de areia purificada. A planta utilizada neste ensaio foi o centeio (*Secale cereale* L.). O ensaio decorreu numa câmara de crescimento (fitoclima) com temperatura, humidade, radiação e fotoperíodo controlados. O solo utilizado neste ensaio foi um Regosolo Dístico, derivado de rocha granítica, com uma textura argilo arenosa e que apresentava um pH ácido (pH=5,1), um teor baixo em bases de troca (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} and Na^{+}), um teor baixo em P (P Olsen = 11,7 mg/kg) e um teor médio em MO (11,3 g/kg). A duração do ensaio foi de 45 dias, e durante este período foi adicionado, aos vasos, uma solução de Hoagland, sem o nutriente P, de forma a fornecer todos os outros nutrientes necessários ao bom desenvolvimento da planta e assim evitar outras deficiências nutricionais a não ser aquelas provocadas pelos fertilizantes em estudo.

Na figura 16 apresentam-se os resultados obtidos neste ensaio quanto à biomassa produzida e à absorção de P, para cada um dos tratamentos efetuados. Como se pode verificar, o solo fertilizado com a estruvite produziu uma biomassa de centeio semelhante à obtida no solo fertilizado com SSP (1,7 g/kg de solo).

Quanto à absorção de P pela planta observou-se que é significativamente mais elevada no solo fertilizado com a estruvite (5,9 mg P/kg de solo) do que no solo fertilizado com o SSP (4,7 mg/kg). Este resultado evidencia que a estruvite aplicada em solo ácido, tem a capacidade de fornecer uma quantidade maior de P ao solo para absorção pela planta do que o fertilizante de síntese mineral.

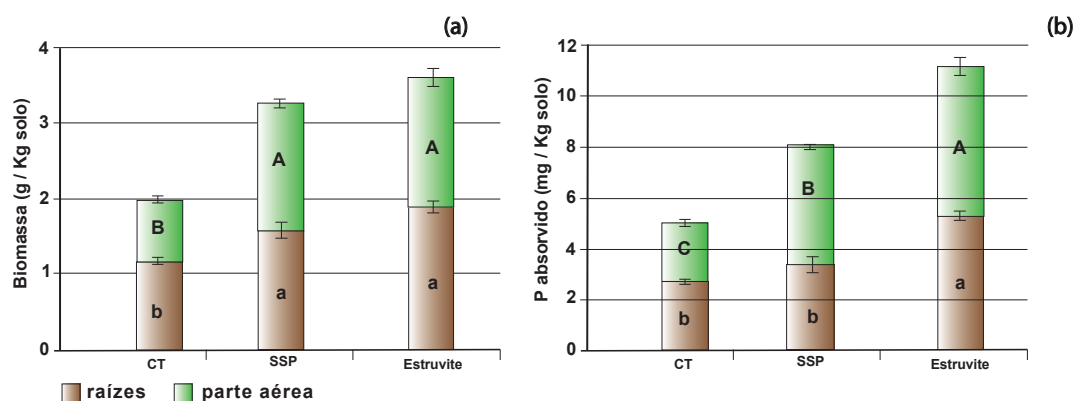


Figura 16 – a) Produção de biomassa (raízes e parte aérea) do azevém nos diferentes tratamentos (g/kg de solo), b) absorção de P pelo azevém nos diversos tratamentos (mg/kg de solo). As diferentes letras maiúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$) entre os tratamentos ao nível da parte aérea da planta. As diferentes letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$) entre os tratamentos ao nível da raiz da planta (Adaptado de Oliveira et al., 2019)

Para além dos parâmetros apresentados acima, foi também realizada a avaliação da eficiência dos fertilizantes através do cálculo dos seguintes parâmetros:

Em que:

$$\text{Recuperação aparente de P pela planta (\%)} = \left[\frac{P \text{ absorvido na parte aérea (mg kg}^{-1} \text{ solo)}}{P \text{ adicionado ao solo (mg kg}^{-1} \text{ solo)}} \right] \times 100$$

$$\text{Eficiência agronómica (g de MS mg}^{-1} \text{ de P adicionado ao solo)} =$$

$$\left[\frac{(Y_n - Y_c)}{P \text{ adicionado ao solo (mg kg}^{-1} \text{ solo)}} \right]$$

- P absorvido na parte aérea é calculado como a concentração de P na parte aérea (mg/kg) multiplicado pela biomassa obtida por kg de solo e dividida pela quantidade de P inicialmente adicionada ao solo (mg por kg de solo)
- Y é quantidade de biomassa (parte aérea, g) por kg de solo, obtida nos vasos fertilizados com estruvite ou SSP (Y_n) ou nos vasos sem fertilização (Y_c)

- P adicionado ao solo é a taxa de aplicação de P nos vasos fertilizados com a estruvite e o SSP (13,1 mg/kg).

Os resultados obtidos (Figura 17) mostraram que, a recuperação aparente de P pela planta é significativamente mais elevada nos solos fertilizados com estruvite (45%) do que nos solos fertilizados com SSP (36%). Este resultado está de acordo com o observado quanto ao valor de P absorvido pela planta que foi também significativamente mais elevado nos solos fertilizados com a estruvite (figura 13b). Quanto à eficiência agronômica, esta foi similar nos solos fertilizados com estruvite (69 g/g) e com SSP (66 g/g).

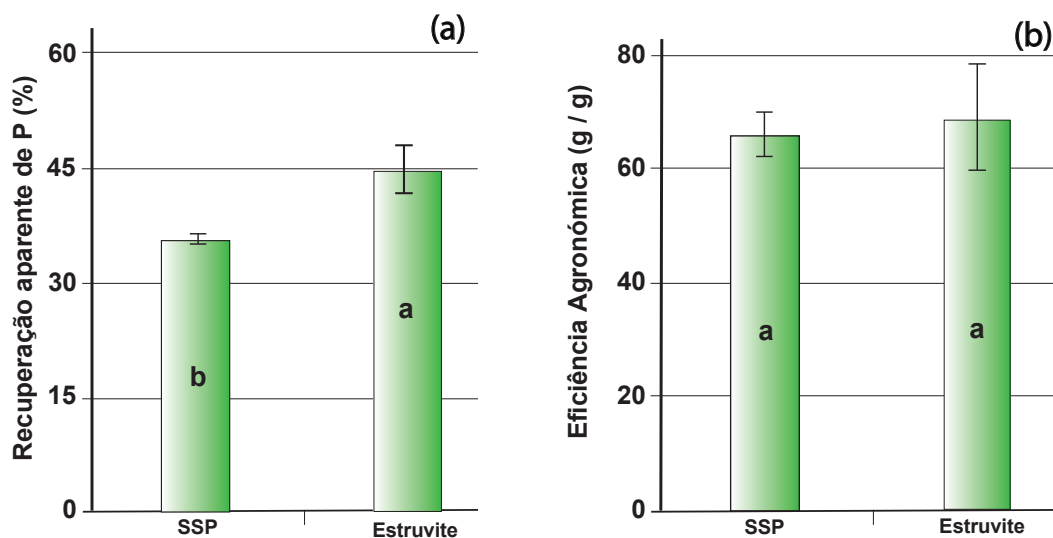


Figura 17 – a) Recuperação aparente de P na parte aérea do azevém nos diferentes tratamentos (%), b) eficiência agronômica nos diversos tratamentos (g/g). As diferentes letras minúsculas indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de *Tukey* ($p < 0,05$) entre os tratamentos (adaptado de Oliveira et al., 2019)

Os resultados deste trabalho sugerem que a estruvite pode ser utilizada como fertilizante fosfatado e que são necessárias menores doses de estruvite para atingir a mesma eficiência agronômica do superfosfato simples.

Conclusões

O processo de precipitação química de estruvite para recuperação de P de digerido de resíduos urbanos origina um material fertilizante com boa qualidade para aplicações em agricultura. A estruvite sintetizada demonstrou possuir um valor fertilizante similar ao de um fertilizante fosfatado de síntese mineral.

Em julho de 2021, foi realizado um aditamento ao anexo II do Regulamento EU 2019/1009 para incluir uma nova categoria de materiais componentes (CMC) dos produtos fertilizantes da União Europeia designada CMC 12: sais de fosfato precipitados e derivados, onde se incluiu a estruvite.

5. Considerações finais

Todas as matérias fertilizantes avaliadas nos ensaios referidos neste livro demonstraram possuir efeito fertilizante. Os digeridos e compostos atuando como corretivos orgânicos contribuirão para melhorar a saúde do solo, disponibilizando simultaneamente nutrientes às culturas. Os chorumes comportaram-se essencialmente como adubos fornecendo nutrientes às culturas. A utilização agrícola destas matérias fertilizantes (estrumes, chorumes, digeridos e compostos) deve ter sempre em consideração a sua composição físico-química. A utilização agrícola de fertilizantes minerais de base biológica (i.e. obtidos através de nutrientes extraídos dos resíduos acima mencionados) é uma nova abordagem à recuperação e reciclagem dos nutrientes (nomeadamente N e P) contidos nos efluentes agro-pecuários, agro-industriais e urbanos, com resultados agronômicos muito promissores.

Final remarks

All the fertilizing materials evaluated in the experiments reported in this book have shown to have a fertilizing effect. Digestates and composts acting as organic improvers will contribute to improving soil health while providing also nutrients available to crops. The slurries behaved essentially as fertilizers providing nutrients to the crops. The agricultural use of these fertilizing materials (manure, slurry, digestates and composts) must always consider their physical-chemical composition. The agricultural use of bio-based mineral fertilizers (i.e. obtained through nutrients extracted from the above-mentioned residues) is a new approach to the recovery and recycling of nutrients (namely N and P) contained in agricultural, agro-industrial and urban effluents, with very promising agronomic results.

6. Referências

- Decreto-lei 30/2022, de 11 de Abril. Colocação no mercado de Matérias fertilizantes não harmonizadas. Diário da República, 1.^a Série, n.º 71.
- Decreto-Lei 102-D 2020 de 10 de dezembro. Diário da República, 1.^a Série, n.º 239.
- Despacho n.º 1230/2018, Diário da República, 2.^a série – N.º 25 de 5 de fevereiro de 2018. pp4132 – Código de Boas Práticas Agrícolas.
<https://files.dre.pt/2s/2018/02/025000000/0413204170.pdf> (Código das boas práticas Agrícolas, acedido em 11 de julho de 2022).
- EU 2019/1009. Official Journal of the European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council, 5 June 2019.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009&from=EN>. (acedido em 11 de julho de 2022).
- Horta C., Roboredo M., Carneiro J.P., Duarte A.C., Torrent J. and Sharpley A. (2018). Organic amendments as a source of phosphorus: agronomic and environmental impact of different animal manures applied to an acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(2):257-271. DOI: 10.1080/03650340.2017.1346372.
- Horta C. (2019). Fertilisation with compost: effects on soil phosphorus sorption and on phosphorus availability in acid soils. *Open Journal of Soil Science*, 9:255-268. <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.912016>.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03650340.2017.1346372>
- Horta, C. e Carneiro, J. (2020). Assessment of Fertilising Properties of a Solid Digestate in Comparison with Undigested Cattle Slurry Applied to an Acidic Soil. *Open Journal of Soil Science*, 10:307-325. Doi: 10.4236/ojss.2020.108017.

- Horta C. e Carneiro JP. (2022). Use of Digestate as Organic Amendment and Source of Nitrogen to Vegetable Crops. *Applied Sciences*. 12(1):248. <https://doi.org/10.3390/app12010248>.
- Horta C, Riaño B, Anjos O, García-González MC. (2022). Fertiliser Effect of Ammonia Recovered from Anaerobically Digested Orange Peel Using Gas-Permeable Membranes. *Sustainability*. 14(13):7832. <https://doi.org/10.3390/su14137832>.
- Lei 52/2021, de 10 de agosto. Aprova o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos. <https://files.dre.pt/1s/2021/08/15400/0000500106.pdf> (acedido em 8 de junho de 2022).
- INIAP – Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva (2006). *Manual de Fertilização das Culturas*. Lisboa, Portugal, 282pp. ISBN-13-:978-989-95131-0-5.
- Oliveira V., Dias-Ferreira C., González-García I., Labrincha J., Horta C., García-González MC. (2021). A novel approach for nutrients recovery from municipal waste as biofertilizers by combining electrodialytic and gas permeable membrane technologies. *Waste Management*, 125:293-302. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.055>.
- Oliveira V., Dias-Ferreira C., Labrincha J., Rocha J.L., Kirkelund G.M. (2020). Testing new strategies to improve the recovery of phosphorus from anaerobically digested organic fraction of municipal solid waste. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95: 439-449. DOI: 10.1002/jctb.6037.
- Oliveira V., Horta C., Dias-Ferreira C. (2019). Evaluation of a phosphorus fertilizer produced from anaerobically digested organic fraction of municipal solid waste. *Journal of Cleaner Production*. 238:117911. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117911>.
- Portaria nº 185/2022 de 21 de julho. Diário da República, 1ª Série. Nº 140.
- Portaria nº 79/2022 de 3 de fevereiro. Define o regime aplicável à gestão de efluentes pecuários. Diário da República, 1ª Série, Nº 24.
- Portaria nº 259/2012 de 28 de agosto. Diário da República, 1ª Série. Nº 166.
- Riaño B, Horta C., e García-González MC. (2022). Development of a liquid N fertilizer from an agro-industrial effluent. Livro de Atas do IX Congresso Ibérico das Ciência do Solo. 22-24 junho 2022, Oeiras – Lisboa, Portugal. *Revista das Ciências Agrárias* (aguarda publicação).
- Riaño B., Molinuevo-Salces B., Vanotti M.B. e García-González MC. (2021). Ammonia Recovery from Digestate Using Gas-Permeable Membranes: a Pilot-Scale Study. *Environments*, 8, 133. <https://doi.org/10.3390/environments8120133>.

Anexo

ANEXO I – QUANTIDADE E COMPOSIÇÃO MÉDIA DE ESTRUMES E DE CHORUMES NÃO DILUÍDOS, PRODUZIDOS ANUALMENTE POR DIFERENTES ESPÉCIES PECUÁRIAS E SUA CONVERSÃO EM CABEÇA NORMAL (CN)

Espécie pecuária / tipo de animal	Efluente pecuário ⁽¹⁾	m ³ ou t/animal ou logar/ano ⁽²⁾	Kg/t de estrume ou kg/m ³ de estrume					CN ⁽³⁾	m ³ ou t/CN/ano	Kg/CN e ano			
			MS	MO	N _t ⁽⁴⁾	N _{org} ⁽⁶⁾	P ₂ O ₅			MO	N _t ⁽⁵⁾	N _{org} ⁽⁶⁾	P ₂ O ₅
Bovinos	Vaca leiteira ⁽⁸⁾	21,0	210	175	5,3	1,3	2,5	2,2	10,8	17,5	3063	93	22,8
	Chorume	23,0	90	70	4,3	2,2	3,0	1,8	8,0	19,2	1342	82	42,2
	Estrume	14,0	210	175	5,3	1,3	2,5	2,2	10,8	14,0	2450	74	18,2
	Chorume	15,5	90	70	4,3	2,2	3,0	1,8	8,0	15,5	1085	67	34,1
	Estrume	7,0	210	175	5,3	1,3	2,5	2,2	10,8	11,5	2013	61	15,0
	Chorume	8,0	90	70	4,3	2,2	3,0	1,8	8,0	13,5	945	58	29,7
	Estrume	6,8	210	155	5,4	1,3	2,5	2,3	8,9	11,3	1757	61	14,7
	Chorume	7,5	90	65	4,3	2,2	3,0	1,7	5,2	12,5	813	54	27,5
	Estrume	2,2	210	150	5,3	1,3	2,5	2,3	5,5	5,5	825	29	7,2
	Estrume	1,4	90	150	5,3	1,3	2,5	2,3	5,5	3,5	525	19	4,6
Suínos	Estrume	3,4	270	40	7,8	3,1	4,7	7,0	8,3	9,7	389	76	30,1
	Chorume	6,0	50	33	4,7	2,4	3,3	3,2	3,2	17,1	566	81	41,1
	Estrume	1,2	270	40	7,8	3,1	4,7	7,0	8,3	8,0	320	62	24,8
	Chorume	1,6	50	36	6,0	3,0	4,2	3,8	4,4	10,7	384	64	32,0
	Estrume	0,5	270	40	7,8	3,1	4,7	7,0	8,3	10,0	400	78	31,0
	Chorume	0,8	50	36	6,0	3,0	4,2	3,8	4,4	16,0	576	96	48,0
	Estrume	5,1	270	40	7,8	3,1	4,7	7,0	8,3	9,8	390	76	30,2
	Chorume	8,7	50	33	4,7	2,4	3,3	3,2	3,2	16,7	552	79	40,2
	Estrume	12,9	270	40	7,8	3,1	4,7	7,0	8,3	8,6	346	67	26,8
	Chorume	19,1	50	36	6,0	3,0	4,2	3,8	4,4	12,8	461	77	38,5

DRAPLVT

Zona Vulnerável

Fonte: Anexo 1 do Código das boas práticas agrícolas - Quantidade e composição média de estrumes e de chorumes não diluídos, produzidos anualmente por diferentes espécies pecuárias e sua conversão em cabeça normal (CN).

<http://www.draplvt.mamaot.pt/Ordenamento/Ambiente/Zona-Vulneravel-Nitratos/Documents/Quantidade%20de%20estrumes%20e%20nutrientes.pdf> (acedido em 14 de junho de 2022)



Maria do Carmo Simões Mendonça Horta Monteiro

Licenciada em Engenharia Agrónómica, tem o Mestrado em Nutrição Vegetal, Fertilidade do Solo e Fertilização ambos pelo Instituto Superior de Agronomia de Lisboa. Possui o Doutoramento “Europeu” em Engenharia Agrónómica pela Universidade de Córdoba, Espanha, onde realizou a tese “La Disponibilidad de Fósforo Evaluado por el Método de Olsen em Suelos Ácidos de Portugal: Significado Agronómico y Ambiental”, que mereceu o prémio Fertibéria atribuído à melhor tese de doutoramento realizada em Espanha na área das ciências agrárias (2005).

É Professora na Escola Superior Agrária de Castelo Branco (ESACB) desde 1983 nas áreas científicas da Ciência do Solo, Nutrição das Plantas e Ambiente. Foi coordenadora do curso de Mestrado em “Gestão Agro-Ambiental de Solos e Resíduos”, do curso de Licenciatura em “Nutrição Humana e Qualidade Alimentar”, presidente da Unidade Departamental de Biociências e do Conselho Técnico-Científico, e é responsável do Laboratório de Solos e Fertilidade da ESACB. É vogal da Comissão Executiva da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo, É membro do painel técnico-científico da parceria Portuguesa para o solo e da rede internacional de laboratórios GLOSOLAN coordenada pela FAO. Tem participado em vários projetos de investigação científica e desenvolvimento tecnológico e autora de diversas publicações na área científica da ciência do solo, fertilização sustentável e desenvolvimento de fertilizantes de base biológica.



Verónica da Costa Oliveira

Licenciada em Engenharia do Ambiente e Mestre em Gestão Ambiental, ambos pela Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Coimbra. Possui o Doutoramento “Europeu” em Ciências e Engenharia do Ambiente pela Universidade de Aveiro, Portugal, onde realizou a tese “Phosphorus recovery from municipal solid waste digestate aiming at its valorization as a fertilizer”, que foi distinguida com o prémio accésit pela empresa Fertibéria (2022). É investigadora no Instituto de Investigação Aplicada do Instituto Politécnico de Coimbra e desde 2015 é membro do

Centro de Estudos de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade. Foi coordenadora científica do programa de I&D “Biodeveloper” na empresa New Organic Planet. Tem participado em vários projetos de investigação científica e desenvolvimento tecnológico na área científica da valorização de resíduos, numa perspetiva da economia circular e gestão mais sustentável de recursos.