

João Paulo Baptista Carneiro

Valorização agronómica de resíduos orgânicos

Gestão da sua aplicação ao solo e impactes agro-ambientais



Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Vila Real, 2010

Este trabalho foi apoiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia
(SFRH/BD/29808/2006)



Este trabalho foi expressamente elaborado como Tese original para o efeito de obtenção do Grau de Doutor em Ciências Agronómicas na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 216/1992 de 13 de Outubro.

Resumo

Para que a valorização agrícola de resíduos orgânicos se possa constituir como um destino privilegiado para os mesmos, deve existir uma adequada gestão da sua aplicação ao solo e, para isso, têm que conhecer-se a extensão e a taxa de conversão do azoto orgânico neles presente, e os impactes agro-ambientais decorrentes dessa incorporação no solo. Este trabalho teve como objectivo estudar o efeito, quanto àqueles aspectos, da utilização agrícola de alguns resíduos orgânicos, mais concretamente: compostado de resíduos sólidos urbanos, lamas de depuração urbanas, chorume de bovinos (Ch) e lamas celulósicas (Lcel). Para o efeito, foram realizados dois ensaios: um de incubação laboratorial de longa duração (443 dias) e outro de campo (durante dois anos e meio), ambos efectuados na Escola Superior Agrária de Castelo Branco, Portugal. No primeiro, estudou-se a transformação do N proveniente dos resíduos, quando incorporados ao solo e, ainda, a evolução do N mineral e de outros parâmetros de fertilidade (P_2O_5 , K_2O , MO, pH- H_2O e CE), resultante dessa aplicação. No ensaio em campo, para além da avaliação da transformação, *in situ*, do N presente nos resíduos e da evolução do N mineral nos primeiros 15 cm de profundidade do solo, verificou-se a influência que a composição destes produtos exerce sobre o teor de N nas plantas e na produção de culturas; mediu-se a emissão de gases com efeito de estufa (N_2O , CO_2 e CH_4) resultante da aplicação ao solo daqueles produtos bem como de adubos minerais azotados, utilizados de forma tradicional (Adtrad); e quantificaram-se perdas de N, por lixiviação, decorrentes destas incorporações. Em relação aos parâmetros referidos para o ensaio em campo, estudou-se, ainda, o efeito de práticas passíveis de minimizarem perdas de N e melhorarem a eficiência da sua utilização pelas culturas, tais como: o uso de um inibidor da nitrificação, a dicianodiamida (DCD), aplicado com fertilizante mineral (Ad+DCD) ou com chorume (Ch+DCD), a utilização de um resíduo de elevada razão C/N em simultâneo com adubos minerais azotados (Ad+Lcel) e, aproveitamento de lamas de depuração, ou de compostado de resíduos sólidos urbanos, através de uma só aplicação à cultura de Primavera (Ldep-P e RSU-P, respectivamente), ou de forma repartida pela sucessão de culturas forrageiras do milho e da aveia (Ldep e RSU, respectivamente). Foi ainda considerado um tratamento sem aplicação de qualquer fertilizante (Controlo), perfazendo um total de dez tratamentos de fertilização.

Os tratamentos foram avaliados com base nas unidades de N incorporadas. No ensaio de incubação laboratorial as quantidades aplicadas corresponderam a duas doses, 80 e 160 kg N ha⁻¹, em aplicação única no início do ensaio, e no ensaio de campo a 80 e 170 kg N ha⁻¹, respectivamente na cultura da aveia e do milho.

A disponibilidade de N mineral foi maior com a utilização de adubos minerais. O chorume foi o resíduo que maior quantidade de nutriente disponibilizou no momento da sua aplicação, numa quantidade próxima dos 40-50% do total veiculado, praticamente na sua totalidade na forma amoniacal. As lamas de depuração disponibilizaram menos N após a sua incorporação, mas depois cederam-no gradualmente, tendo ao final do ensaio laboratorial disponibilizado 76% do N veiculado, independentemente da dose aplicada (80 or 160 kg N ha⁻¹). No campo, as lamas de depuração, quando utilizadas em estreme (em Ldep-P durante a Primavera-Verão e em Ldep durante o Outono-Inverno), chegaram a disponibilizar 23 e 60% do N aplicado à cultura do milho e de aveia, respectivamente. Sobretudo com a aplicação de lamas celulósicas, mas também com a de compostado, ocorreu imobilização de N. Este último resíduo não cedeu mais de 18 e 4% do azoto veiculado, à cultura de aveia (no tratamento RSU) e do milho (no tratamento RSU-P), respectivamente. Como consequência, este foi o resíduo que menos beneficiou a formação de biomassa,

tendo-se registado uma quebra de produção anual da ordem dos 25%, independentemente de ter sido aplicado de forma repartida, ou não.

Nas duas culturas da sucessão, o efeito do uso da DCD, no adubo ou no chorume, perdurou durante cerca de 40 dias. Em resultado da presença do inibidor, a produção de forragem sofreu um ligeiro acréscimo na época de Outono-Inverno, mas não na de Primavera-Verão. Atendendo à quantidade de forragem produzida, quer o chorume quer as lamas de depuração, constituíram-se como boas alternativas à adubação azotada convencional, e a pertinência da sua aplicação ao solo na Primavera ficou evidenciada.

As maiores perdas anuais de N-NO_3^- por lixiviação, no Controlo ou em Adtrad, foram, respectivamente, de 49 e 144 kg N ha^{-1} , tendo estas perdas tido tendência a serem superiores com aplicação de adubos minerais (Adtrad e Ad+DCD). Com a utilização de compostado (em RSU ou em RSU-P) ou de lamas de depuração (no tratamento Ldep-P), houve uma redução das perdas anuais de N-NO_3^- da ordem dos 25 e 30%, respectivamente, comparativamente ao verificado em Adtrad. Quando se fertilizou unicamente com chorume, essa redução foi de 46%. A redução de perdas de N-NO_3^- , em resultado da incorporação de lamas celulósicas, tende a desaparecer num período de tempo relativamente curto, e o recurso à DCD na fertilização de culturas de Primavera-Verão, não se identificou como uma prática capaz de reduzir perdas de N por lixiviação.

As principais emissões de N_2O ocorreram nos primeiros 30-40 dias que se seguiram à incorporação dos fertilizantes. No conjunto das duas culturas da sucessão, as maiores perdas (até 5 kg $\text{N-N}_2\text{O ha}^{-1}$) aconteceram em Adtrad, Ad+DCD, Ldep-P e Ldep, e não se observaram alterações significativas resultantes da presença do inibidor, no adubo ou no chorume. Os melhores resultados foram conseguidos em Ad+Lcel, RSU e no Controlo. De um modo geral, a aplicação de resíduos orgânicos ao solo resultou num aumento das emissões de CO_2 para a atmosfera, mas melhorou o potencial de oxidação do CH_4 pelo solo.

Através de um ensaio laboratorial efectuado em North Wyke Research, Reino Unido, verificou-se que a aplicação antecipada da DCD em relação à do fertilizante aumenta a eficácia do inibidor na redução das emissões de $\text{N-N}_2\text{O}$, e que do uso do inibidor não resultam efeitos na diversidade da composição da comunidade microbiana do solo. Houve simplesmente uma redução na sua abundância.

Genericamente, comprovou-se a viabilidade da substituição parcial, ou mesmo total, da adubação azotada mineral tradicionalmente praticada em culturas de Outono-Inverno ou de Primavera-Verão, por resíduos orgânicos, sem que daí resultem efeitos agrónomicos e ambientais adversos, podendo mesmo haver uma melhoria nos mesmos. Da apreciação global aos resultados, surgiu um conjunto de recomendações para gestão da aplicação ao solo dos produtos estudados, entre elas a aplicação de DCD ao Outono mas não à Primavera, a incorporação preferencial de lamas de depuração ou de chorume à Primavera, e conveniência da utilização de compostado e de lamas celulósicas em simultâneo com adubos azotados.

Palavras-chave: fertilização, azoto, chorume, lamas de depuração, compostado de resíduos sólidos urbanos, mineralização, produção de culturas, lixiviação, emissões de GEE, mitigação, dicianodiamida

Abstract

In order to establish the use of organic residues in agriculture as a privileged destination to these products, a proper management of its application to the soil must be found. Therefore, the extension and the conversion rate of organic nitrogen in those products, as well as the agro-environmental impacts resulting from its incorporation in the soil, must be known.

The aim of this work was study of these aspects when some organic residues, namely urban solid waste compost (UWC), sewage sludge (SS), cattle slurry (CS) and pulp mill sludge (PMS), were used as agricultural fertilizers. For this purpose, two experiments were carried out: a long-term (443 days) laboratory incubation and a field experiment (for two and a half years), both performed at the School of Agriculture of the Polytechnic Institute (Escola Superior Agrária), Castelo Branco, Portugal. In the first experiment, the progress of the N conversion from the residues was evaluated, as well as the evolution of mineral N and of other soil fertility parameters (P_2O_5 , K_2O , OM, pH- H_2O and EC), resulting from the application to the soil of the different amendments. In the field experiment, in addition to the assessment of the *in situ* conversion of the N in the residues, and the evolution of mineral N in the top 15 cm of soil, the influence of the composition of those organic residues on the N content of plants and on crop yield was studied. The greenhouse gases (N_2O , CH_4 and CO_2) emissions resulting from soil application of those products or of mineral N fertilizers (Min) were also measured. Nitrogen losses by leaching as a result of these incorporations in the soil were quantified too. The effect of practices that might minimize N losses from soil and improve plant N use efficiency was also studied in relation to all mentioned parameters. These practices were: the use of a nitrification inhibitor (DCD), applied with mineral N fertilizer (Min+DCD) or cattle slurry (CS+DCD); the use a residue with high C/N ratio (PMS) simultaneously with mineral N fertilizers (Min+PMS); and the use of sewage sludge or urban waste compost through a split application to both crops (SSs and USWs, respectively) of a double-cropping system of oats and maize forage, or through a single application to maize (SSm and USWm). A treatment without applying any fertilizer (Control) was also considered, which totalized ten fertilization treatments.

Treatments were evaluated based on N incorporated units. In the laboratory experiment, the applied amounts corresponded to two doses, 80 and 160 kg N ha⁻¹, incorporated in the soil in a single application at the beginning of the experiment. In the field experiment, total N input was equal in all fertilization treatments, 80 and 170 kg N ha⁻¹ to oats and maize, respectively.

The availability of mineral N was higher with the use of mineral fertilizers. Cattle slurry was the residue that released this nutrient in a faster way, approximately 40-50% of the total applied N, almost entirely as ammonium. Sewage sludge provided less N after its incorporation, but then released it gradually, providing 76% of the applied N at the end of laboratory incubation, regardless of the dose used (80 or 160 kg N ha⁻¹). In the field, when using sewage sludge only (in SSm during spring-summer and in SSs during autumn-winter), the residue released 23% and 60% of applied N to maize and oats, respectively. Nitrogen immobilization of N occurred mainly with the application of PMS, but it also occurred with incorporation of USW. The latter residue did not provide more than 18% and 4% of the N applied to oats (in USWs treatment) and maize (in USWm treatment), respectively. As a result, USW was the residue which contributed the least to the formation of biomass, and its application resulted in a loss of annual forage production of about 25%, regardless the system of application.

In both crops, the effect of the use of DCD on nitrification, in mineral fertilizer or in CS, lasted for about 40-50 days. As a result of the presence of the inhibitor, forage production slightly increased in autumn-winter season, but not in the spring-summer period. Considering the amount of forage produced, sewage sludge or cattle slurry can be considered as good alternatives to conventional nitrogen fertilization, and the results suggested that SS and CS should be applied preferentially in spring.

The biggest annual leaching losses of $\text{NO}_3\text{-N}$, when no fertilizer was applied or when using conventional mineral N fertilizers, were 49 and 144 kg N ha^{-1} , respectively, and these losses tended to be greater with the application of mineral N fertilizers (Min and Min+DCD). With the use of urban waste compost (in UWCs or UWCm) or sewage sludge (in SSm treatment), there was a reduction in annual losses of $\text{NO}_3\text{-N}$, around 25% and 30%, respectively, when compared with traditional mineral N fertilization (Min). With cattle slurry (CS) only, the reduction was 46%. The diminish of $\text{NO}_3\text{-N}$ losses, due to the incorporation of paper mill sludge, tend to disappear in a relatively short period of time, and the use of DCD in the fertilization of spring-summer crops did not reduce N losses by leaching.

The main N_2O emissions occurred in the first 30-40 days following the incorporation of fertilizers. Considering the sum of the emissions of both crops of the double-cropping system, the greatest losses (up to 5 $\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$) occurred with the use of mineral fertilizers and sewage sludge, and there was no significant increase or decrease in N_2O emissions as a result of the presence of the inhibitor, in mineral N fertilizer or in cattle slurry. The best results were achieved in Min+PMS, UWCs and in Control. In general, the application of organic residues to the soil increased CO_2 emissions, but improved the oxidation of CH_4 by the soil.

We conducted a laboratory experiment at North Wyke Research, UK, which showed that early application of DCD in relation to fertilizer incorporation, increases the effectiveness of the inhibitor in reducing $\text{N}_2\text{O-N}$ emissions, and also that the use of DCD does not affect the diversity of the microbial community of the soil. There was just a reduction in their abundance.

It was generally observed that organic residues can replace, partially or totally, the traditionally practiced of fertilizing with mineral nitrogen autumn-winter or spring-summer crops, with no adverse environmental or agronomic effects. On the contrary, both aspects may be even improved.

The global assessment of the results produced a set of recommendations about the management of land application of the studied products, which include the application of DCD in autumn but not in spring, the greater benefit of soil incorporation of sewage sludge or cattle slurry in spring, and the advantage of using urban waste compost and paper mill sludge simultaneously with nitrogenous fertilizers.

Keywords: fertilization, slurry, sewage sludge, urban solid waste compost, nitrogen, mineralization, crop production, leaching, greenhouse gases emissions, mitigation, dicyandiamide

Índice

Agradecimentos

Financiamento e outros apoios

Utilização prévia de resultados apresentados na tese

Resumo

Abstract

Introdução 1

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Produção e valorização agrícola de resíduos orgânicos	7
1.1 Resíduos sólidos urbanos	7
1.2 Lamas de depuração urbanas	9
1.3 Chorume de bovinicultura	10
1.4 Lamas celulósicas	11
1.5 Utilização agrícola de resíduos orgânicos	12
1.5.1 Legislação	13
2 Transformação de resíduos orgânicos no solo	15
2.1 Factores que controlam a mineralização do azoto orgânico	19
2.1.1 Composição dos resíduos orgânicos	19
2.1.2 Temperatura e humidade do solo	21
2.1.3 Ciclos de humedecimento e secagem	22
2.1.4 Características do solo	23
3 Perdas de N do solo com origem na nitrificação, desnitrificação e na lixiviação	25
3.1 Perdas de azoto na forma de óxido nitroso	25
3.1.1 Importância e origem das perdas de óxido nitroso para a atmosfera	25
3.1.2 Origem do óxido nitroso nos solos	29
3.1.3 Aplicação de resíduos orgânicos ao solo e emissões de óxido nitroso	34
3.2 Perdas de azoto pelo processo de lixiviação	38
3.2.1 Importância e origem das perdas de azoto nas águas de percolação	38
3.2.2 Aplicação de resíduos orgânicos ao solo e lixiviação de nitratos	43

3.3 Redução de perdas de azoto do solo	48
3.3.1 Repartição da aplicação de fertilizantes azotados	48
3.3.2 Utilização de resíduos de elevada razão C/N	50
3.3.3 Uso de inibidores da nitrificação	51
4 Aplicação de resíduos orgânicos ao solo e efeito sobre a produção e teor de azoto nas plantas	53

PARTE EXPERIMENTAL

Ensaio laboratoriais de aplicação de resíduos orgânicos

5 Mineralização e disponibilidade de azoto mineral no solo em incubação laboratorial.....	61
5.1 Materiais e métodos	62
5.1.1 Caracterização do solo e dos fertilizantes utilizados no ensaio	62
5.1.2 Instalação e condução do ensaio	64
5.1.3 Metodologia implementada	65
5.1.4 Análises laboratoriais	65
5.1.5 Cálculos e análise estatística	65
5.2 Resultados	67
5.2.1 Azoto mineral no solo	67
5.2.2 Mineralização do azoto orgânico	73
5.2.3 Outros parâmetros de fertilidade	77
5.3 Discussão	83
5.3.1 Azoto mineral no solo	83
5.3.2 Mineralização do azoto orgânico	87
5.3.3 Outros parâmetros de fertilidade	89
5.4 Conclusões	92
6 Efeito da dicianodiamida em microrganismos do solo e emissões de óxido nitroso	95
6.1 Materiais e métodos	96
6.1.1 Amostragem do solo e pré-condicionamento	96
6.1.2 Caracterização microbiológica das terras pré-condicionadas	97
6.1.2.1 Número Mais Provável de bactérias oxidantes de amónia e nitrito nos solos	97
6.1.2.2 Perfis de ácidos gordos fosfolipídeos (PLFA)	97
6.1.2.3 Actividade potencial dos nitrificantes em suspensões de solo tamponizadas	98
6.1.2.4 Perfil molecular das comunidades oxidantes de amoníaco e de nitrito	98
6.1.3 Incubação do solo	100
6.1.4 Amostras de atmosfera e de terra	102
6.1.5 Tratamento dos resultados e análise estatística	103

6.2 Resultados	103
6.2.1 Efeito do pré-condicionamento do solo na actividade e composição microbiana	103
6.2.2 Emissões de N ₂ O e N mineral no solo	105
6.3 Discussão	108
6.3.1 Efeito do pré-condicionamento do solo na actividade e composição microbiana	108
6.3.2 Emissões de N ₂ O e N mineral no solo	110
6.4 Conclusões	112

Ensaio em campo de aplicação de resíduos orgânicos

7 Mineralização e disponibilidade de azoto mineral no solo na sucessão aveia x milho	117
7.1 Materiais e métodos	117
7.1.1 Localização e caracterização geral da parcela do ensaio	117
7.1.2 Caracterização climática	119
7.1.3 Culturas	120
7.1.4 Fertilizantes	120
7.1.5 Inibidor da nitrificação	122
7.1.6 Tratamentos de ensaio e delineamento experimental	122
7.1.7 Instalação e condução do ensaio	123
7.1.8 Medição da mineralização do N orgânico e da concentração de N mineral no solo ...	126
7.1.8.1 Análises laboratoriais	127
7.1.8.2 Cálculos e análise estatística	127
7.2 Resultados	129
7.2.1 Concentração de azoto mineral no solo	129
7.2.2 Mineralização do azoto orgânico	138
7.3 Discussão	149
7.3.1 Concentração de azoto mineral no solo	149
7.3.2 Mineralização do azoto orgânico	155
7.4 Conclusões	161
8 Produção e qualidade da forragem de aveia e de milho	165
8.1 Materiais e métodos	167
8.1.1 Avaliação da produção	167
8.1.2 Teor em N na parte aérea das plantas e remoção do nutriente pelas culturas	168
8.1.3 Eficiência de uso do azoto	168
8.1.4 Análise estatística	169
8.2 Resultados	170
8.2.1 Avaliação da produção	171
8.2.1.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	171
8.2.1.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	175
8.2.1.3 Sucessão milho x aveia	176

8.2.2 Teor em N na parte aérea das plantas e remoção do nutriente pelas culturas	178
8.2.2.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	178
8.2.2.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	184
8.2.2.3 Sucessão milho x aveia	187
8.2.3 Eficiência de uso do azoto pelas culturas	191
8.2.3.1 Eficiência agronómica	191
8.2.3.1.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	191
8.2.3.1.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	193
8.2.3.1.3 Sucessão milho x aveia	195
8.2.3.2 Recuperação aparente do azoto dos fertilizantes	196
8.2.3.2.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	196
8.2.3.2.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	199
8.2.3.2.3 Sucessão milho x aveia	200
8.3 Discussão	202
8.3.1 Avaliação da produção	202
8.3.1.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	202
8.3.1.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	206
8.3.1.3 Sucessão milho x aveia	211
8.3.2 Teor em azoto na parte aérea das plantas e remoção do nutriente pelas culturas	213
8.3.2.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	213
8.3.2.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	215
8.3.2.3 Sucessão milho x aveia	219
8.3.3 Eficiência de uso do azoto pelas culturas	221
8.3.3.1 Eficiência agronómica	222
8.3.3.1.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	222
8.3.3.1.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	224
8.3.3.1.3 Sucessão milho x aveia	225
8.3.3.2 Recuperação do azoto dos fertilizantes	227
8.3.3.2.1 Cultura de Outono-Inverno (aveia)	227
8.3.3.2.2 Cultura de Primavera-Verão (milho)	232
8.3.3.2.3 Sucessão milho x aveia	236
8.4 Conclusões	238
9 Lixiviação de nitratos	241
9.1 Materiais e métodos	243
9.1.1 Concentração do ião nitrato na solução do solo	243
9.1.2 Avaliação das quantidades de água percolada no solo	244
9.1.3 Cálculos e análise estatística	250
9.2 Resultados	252
9.2.1 Quantidades de água percolada e concentração de nitratos na solução do solo	252
9.2.2 Perdas de azoto por lixiviação de nitratos	256

9.3 Discussão	263
9.3.1 Quantidades de água percolada e concentração de nitratos na solução do solo	263
9.3.2 Perdas de azoto por lixiviação de nitratos	266
9.4 Conclusões	272
10 Emissões de óxido nitroso	275
10.1 Materiais e métodos	277
10.1.1 Procedimento experimental	278
10.1.2 Caracterização climática às medições	278
10.1.3 Cálculos e análise estatística	280
10.2 Resultados	283
10.2.1 Taxas de emissão e perdas totais	283
10.2.2 Factores de emissão	294
10.3 Discussão	298
10.3.1 Taxas de emissão e perdas totais	298
10.3.2 Factores de emissão	304
10.4 Conclusões	307
11 Emissões de dióxido de carbono e de metano	311
11.1 Materiais e métodos	313
11.1.1 Cálculos e análise estatística	314
11.2 Resultados	316
11.2.1 Emissões de dióxido de carbono	316
11.2.2 Emissões de metano	321
11.2.3 Emissões de carbono por kg de matéria seca produzida	324
11.3 Discussão	328
11.3.1 Emissões de dióxido de carbono	328
11.3.2 Emissões de metano	332
11.3.3 Emissões de carbono por kg de matéria seca produzida	337
11.4 Conclusões	338
12 Resíduos orgânicos e interacções agro-ambientais	341
12.1 Fluxos de saídas de azoto	341
12.2 Emissões de gases com efeito de estufa	343
12.3 Eficiência agro-ambiental	346
12.4 Recomendações para gestão da aplicação ao solo	348
Referências Bibliográficas	355

ANEXO