



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise e melhoria dos processos de gestão de lamas de depuração de efluentes líquidos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologias e Gestão do Ambiente

Analysis and improvement of the management system of sewage sludge

Autor

Joana Vanessa Silva Lopes

Orientadores

Professor José Carlos Miranda Góis

Professora Margarida Maria João de Quina

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Doutor Rui Carlos Cardoso Martins
Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professora Doutora Margarida Maria João de Quina
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional

 **BioEnergias** S.S. Bioenergias S.A



Grupo Lena

Coimbra, Setembro, 2016

Agradecimentos

No decorrer da realização desta dissertação, várias foram as pessoas e entidades que colaboraram e me apoiaram, sendo incontornável o meu agradecimento:

À Professora Margarida Quina pela orientação e apoio, pelo incentivo a querer sempre fazer e dar o melhor de mim.

Ao Professor José Carlos Góis, pela orientação, disponibilidade e todos os esclarecimentos.

Aos Engenheiros Nuno Gabriel e Dulce Carlos, que me orientaram e acompanharam na SS Bioenergias S.A., pela disponibilidade e por tudo o que me ensinaram.

A todas as pessoas, em representação da instituição da ETAR do Choupal, pelo esclarecimento de dúvidas e pela disponibilização de espaços, equipamentos e materiais necessários ao desenvolvimento do meu trabalho.

Às minhas colegas Joana Cunha, Joana Gouveia, Rita, Susana, Mariana e Daniela, por toda a ajuda e apoio nesta etapa do meu percurso académico.

Aos meus amigos Teresa, Adriano, Sofia, Inês, Gil, Sara, Karolina, Tiago e Filipe, por permanecerem sempre presentes, pela amizade incondicional e motivação; e à Ângela, pelo exemplo de força que me inspira a superar-me e nunca desistir perante as dificuldades.

Ao Luis, que sempre ouviu os meus desabafos e progressos, pelas sugestões e críticas construtivas, e por me ajudar a crescer como pessoa e Engenheira.

À minha família, e de forma particular aos meus pais e irmão, pelos sacrifícios feitos, pela compreensão e por serem o meu apoio nos bons e maus momentos. Tudo o que tenho e sou, a eles devo.

Resumo

Este trabalho de dissertação foi integrado num estágio curricular efetuado na Bioenergias, uma empresa de gestão de lamas de depuração de efluentes líquidos. O principal objetivo deste estudo foi a análise do modelo de gestão de lamas implementado na Bioenergias, procurando encontrar pontos de melhoria.

É apresentado o enquadramento técnico-legal do processo de gestão de lamas e descrito o modelo de gestão adotado pela Bioenergias. Cerca de 81% (w/w) das lamas recebidas pela empresa são valorizadas diretamente na agricultura. Deste modo, é necessário que as características das lamas e dos solos de explorações agrícolas sejam conhecidas, bem como as culturas a desenvolver para calcular as quantidades a aplicar por unidade de área. As restantes lamas (cerca de 19%) são encaminhadas para compostagem numa empresa externa.

De modo a avaliar a influência dos processos de tratamento na ETAR nas características das lamas de depuração, procedeu-se à avaliação de diferentes amostras recolhidas em diversos pontos do processo (ETAR do Choupal). Os resultados mostraram um aumento de 18% de sólidos totais e uma redução 16% do teor de sólidos voláteis após a digestão anaeróbia e estabilização das lamas, bem como uma diminuição da fitotoxicidade, revelando a importância do processo de estabilização para a valorização agrícola. Quantificou-se ainda o potencial energético de lamas de uma indústria de reciclagem de plástico (LRP), determinando o poder calorífico superior (PCS). O valor obtido foi 8464 kJ/kg para a amostra tal qual. Quando fracionada, a fração fina apresentou 5551 kJ/kg e fração grosseira 12157 kJ/kg. Desta forma, pode ter interesse para a Bioenergias considerar a possibilidade de fracionamento das LRP, dado que a fração grosseira tem maior PCS.

Globalmente, foi possível concluir que o modelo de gestão da Bioenergias é adequado à sua atividade, mas que pode ser melhorado, designadamente com a instalação de um sistema de secagem de lamas, a instalação de uma unidade de compostagem e a implementação de um método expedito de cálculo da quantidade de lamas a aplicar num solo específico.

Palavras-chave: Lamas de depuração de efluentes, Gestão de lamas, Valorização agrícola.

Abstract

This study was carried out within an academic traineeship at Bioenergias, a company operating on the management of sewage sludge of wastewater treatment plants. The main objective of this work was the analysis and improvement of the sewage sludge management at Bioenergias.

The technical and legal framework of the sewage sludge management process and the management system implemented by Bioenergias are described. Nowadays around 81% (w/w) of the sewage sludge managed by the company are valorised in agriculture. This procedure requires the characterization of the sewage sludge as well as of the soils and cultures to develop in order to determine the amount of sludge per area. The leftovers are regularly sent to composting.

Random samples were collect at different points in Choupal wastewater treatment plant in order to evaluate the influence of the wastewater treatment on the sewage sludge characteristics. The results showed an increase of 18% (w/w) of total solids and a decrease of 16% (w/w) of volatile solids after the digestion and stabilization treatments of sludge, as well as a decrease of phytotoxicity, showing the importance of stabilization process for agricultural valorisation. In order to assess the potential for energy recovery from sewage sludge commonly sent for composting, it was evaluated the high heat value (HHV). For a sample from plastic recycling industry (LRP) it was obtained a value of 8464 kJ/kg. Indeed, after a sieving process of the LRP sample, the result for fine fraction was 5551 kJ/kg and for course fraction 12157 kJ/kg. These results show an important alternative to be considered by Bioenergias, in particular for the coarse fraction.

In general, the sewage sludge management system implemented in Bioenergias is appropriated. However, the possibility of construction of a drying unit and a composting plant should be considered. In addition, a faster method to calculate the amount of sewage sludge to be applied per soil area is advisable.

Keywords: Sewage sludge, sludge management, Agricultural value.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. ENQUADRAMENTO TÉCNICO-LEGAL.....	5
2.1. Tratamento de efluentes líquidos	5
2.2. Lamas de depuração de efluentes	7
2.3. Gestão de lamas	10
2.3.1. Transporte e armazenamento	10
2.3.2. Destinos finais	11
2.3.3. Licenciamento da aplicação agrícola de lamas.....	14
2.3.4. Fertilização de solos	16
2.3.5. Quantidade de lamas a aplicar nos solos	20
3. SS BIOENERGIAS SA	21
3.1. Modelo de gestão de lamas	23
4. ESTADO DA ARTE	27
4.1. Gestão de lamas	27
4.2. Valorização agrícola de lamas de depuração	30
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
5.1. Amostragem.....	33
5.1.1. Lamas urbanas da ETAR do Choupal	33
5.1.2. Lamas da reciclagem de plásticos	33
5.2. Caracterização das amostras de lamas	34
5.2.1. Humidade e sólidos totais.....	34
5.2.2. Sólidos voláteis e carbono orgânico total	34
5.2.3. pH	35
5.2.4. Carência Química de Oxigénio.....	35
5.2.5. Fitotoxicidade	35
5.2.6. Poder calorífico superior	36
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	39
6.1. Análise do sistema de gestão de lamas na Bioenergias	39
6.2. Caracterização de LDU do Choupal e LRP	44
6.2.1. Caracterização física e química	45
6.2.2. Fitotoxicidade	47
6.2.3. Caracterização térmica de LRP	48
6.3. Propostas de melhoria no modelo de gestão de lamas da Bioenergias	50

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A.....	61
ANEXO B.....	63
ANEXO C	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Etapas e tecnologias de tratamento possíveis das águas residuais.....	5
Figura 2.2. Fontes principais de lamas em ETAR.....	7
Figura 2.3. Diagrama triangular da textura (adaptado de INIAP, 2006).	17
Figura 2.4. Relação entre a disponibilidade de elementos e microrganismos em função do pH do solo (adaptado de INIAP, 2006).	18
Figura 3.1. Representação do sistema de gestão de lamas implementado na Bioenergias..	23
Figura 3.2. Descarga de lamas de depuração na unidade da Bioenergias.	24
Figura 3.3. Percentagem de cada tipologia de lama recebida na Bioenergias.	25
Figura 5.1. Locais de recolha das amostras de lama urbana estudada.....	33
Figura 5.2. Equipamento utilizado na determinação do PCS. a) <i>termómetro digital Parr Model 67</i> ; b) <i>Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter</i> ; c) <i>Parr 2901 EE ignition Unit 230/50/60</i> ; d) suporte do cadinho.....	36
Figura 5.3. Evolução típica da temperatura em função da temperatura.	38
Figura 6.1. Fitotoxicidade das amostras estudadas.....	48
Figura 6.2. Fração fina (LRP _f) e grosseira (LRP _g) da amostra LRP.	49
Figura 6.3. Proposta de sistema de gestão de lamas a implementar na Bioenergias.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Características típicas das lamas primárias e secundárias (adaptado de Tchobanoglous <i>et al.</i> , 2014).	8
Tabela 2.2. Resumo das fases e métodos de tratamento de lamas.....	9
Tabela 2.3. Valores Limite de metais pesados, compostos orgânicos e microrganismos nas lamas destinadas à aplicação na agricultura (adaptado do Anexo I do Decreto-Lei nº 276/2009).	15
Tabela 2.4. Classificação do solo de acordo com o pH (adaptado de INIAP, 2006).	17
Tabela 2.5. Valores limite de concentração de metais pesados consoante o pH do solo (adaptado do Anexo I do Decreto-lei nº 276/2009).....	18
Tabela 3.1. Lamas de depuração objeto de gestão na Bioenergias e respetivas quantidades anuais estimadas.	22
Tabela 4.1. Estudos relativos ao destino final de lamas.	28
Tabela 4.2. Efeito da aplicação de lamas de depuração no solo.....	30
Tabela 6.1. Caracterização de terrenos de cultivo.....	40
Tabela 6.2. Caracterização de lamas recebidas na Bioenergias passíveis de sofrer valorização agrícola.....	41
Tabela 6.3. Quantidade de cada lama (em t) estudada a aplicar a cada exploração (E1 a E5).	42
Tabela 6.4. Caracterização de lamas recebidas na Bioenergias que não podem sofrer valorização agrícola.....	43
Tabela 6.5. Características físicas e químicas de LDU e LDI.....	45
Tabela 6.6. Relação entre o Índice de germinação (GI) calculado e a classificação dada à amostra (adaptado de Trautmann e Krasny, 1997).....	47
Tabela 6.7. Caracterização da amostra de LRP.....	49
Tabela 6.8. PCS da amostra de LRP e comparação com outras tipologias de lamas e materiais combustíveis.	50

SIGLAS

- ARH – Administração da região hidrográfica
- C/N – Relação Carbono/Azoto
- CBO₅ – Carência bioquímica de oxigénio
- CCDR – Comissão de coordenação e desenvolvimento regional
- CQO- Carência química de oxigénio
- CQO_L – Carência química de oxigénio na fase líquida
- CQO_S – Carência química de oxigénio na fase sólida
- DRAP – Direção regional de agricultura e pescas
- DPO – Declaração de planeamento de operações
- ETAR – Estação de tratamento de águas residuais
- GI – Índice de Germinação
- H – Humidade
- LC – Lamas celulósicas
- LCA – Avaliação de ciclo de vida
- LD1 – Lamas do digestor 1
- LD2 – Lamas do digestor 2
- LDI – Lamas de depuração de efluentes industriais
- LDU – Lamas de depuração de efluentes urbanos
- LE – Lamas estabilizadas
- LER- Lista europeia de resíduos
- LM – Lamas mistas
- LRP – Lamas da indústria recicladora do plástico
- LRP_f – Fração fina das lamas da indústria recicladora do plástico
- LRP_g – Fração grosseira das lamas da indústria recicladora do plástico
- MO – Matéria Orgânica
- PCS – Poder calorífico superior
- PGL – Plano de Gestão de Lamas
- ST – Sólidos Totais
- SV – Sólidos Voláteis

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento da população ligada à rede de drenagem de águas residuais. Segundo RASARP (2015), há 8,4 milhões de habitantes em Portugal servidos com sistemas de saneamento, sendo captados cerca de 619 milhões de m³ de águas residuais por ano. Da atividade industrial resultam também vários milhões de m³ de efluentes líquidos que precisam ser tratados. Algumas instalações industriais têm estruturas próprias de tratamento de efluentes, enquanto outras utilizam o sistema drenagem urbano para tratar os seus efluentes. Após a recolha, os efluentes líquidos são encaminhados para instalações onde são sujeitos a processos físico-químicos e biológicos, que têm como finalidade o seu tratamento, garantindo que estes possam ser devolvidos ao meio ambiente sem prejuízo da saúde pública, da qualidade do meio e da biosfera.

Do tratamento de efluentes líquidos resultam resíduos semi-sólidos a que se dá o nome de lamas de depuração. De acordo com a sua origem, as lamas serão designadas neste estudo de lamas de depuração urbanas (LDU) ou lamas de depuração industriais (LDI).

De acordo com APA (2013), em 2013 foram produzidas em Portugal um total de 589 kt de lamas de depuração, sendo que 388 kt dizem respeito a LDU. À medida que aumenta a exigência do tratamento dos efluentes líquidos, é exetável que aumente também a quantidade de lamas produzidas, sendo necessário estabelecer uma gestão adequada.

A valorização agrícola de lamas é o destino mais frequente em Portugal. Segundo Carvalho (2012), cerca de 83% dos solos portugueses apresentam um pH inferior a 5,5 e teores de matéria orgânica (MO) inferiores a 1%, o que revela solos de qualidade limitada para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Em geral, as lamas apresentam caraterísticas que permitem a sua utilização como corretivo de solos, nomeadamente em relação à MO, azoto (N), fósforo (P) e potássio (K). Assim, o espalhamento e incorporação no solo constituem alternativas bastante atrativas, tanto a nível ambiental como económico.

No entanto, há situações e períodos temporais em que este processo de valorização não se pode realizar, sendo necessário encontrar outras soluções. Uma das

possibilidades é o seu processamento por compostagem, que permite a reciclagem da matéria orgânica biodegradável presente nas lamas, na forma de um composto estabilizado, que pode ser usado como condicionador de solos. Outra alternativa é a valorização energética, que consiste na sua incineração ou co-incineração de modo a aproveitar o seu potencial calorífico para produção de energia térmica ou elétrica. Este processo é bastante utilizado em países como a Suécia e a Alemanha, onde as necessidades energéticas são muito elevadas.

Quando as lamas não reúnem as características necessárias à sua valorização agrícola ou energética, são encaminhadas para aterro sanitário. Este destino é normalmente evitado, e segundo a APA (2013), apenas 5,36% w/w das lamas declaradas pelos produtores são depositadas em aterro.

Muitas vezes, o encaminhamento das lamas para o seu destino final não é feito pelo produtor, mas por uma entidade responsável pela gestão das lamas. Os operadores de lamas responsabilizam-se pelo seu transporte desde o local de produção até ao local de valorização, sendo que na maioria das vezes as lamas passam por um período de armazenamento nas instalações da entidade gestora.

A presente dissertação foi realizada em contexto empresarial, durante o período de estágio curricular na SS Bioenergias S.A. A empresa recebe lamas de depuração de efluentes domésticos e industriais, responsabilizando-se pelo transporte, armazenamento e encaminhamento para destino final, tendo em vista, sempre que possível, a valorização agrícola das mesmas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a análise do sistema de gestão de lamas formadas na depuração de efluentes domésticos e industriais implementado na Bioenergias, procurando possíveis pontos de melhoria.

De modo a atingir este objetivo, irá proceder-se à:

- Análise do sistema de gestão de lamas adotado pela Bioenergias;
- Realização de um levantamento das tipologias, características e principais destinos das lamas recebidas na unidade da Bioenergias;
- Determinação de algumas características físicas, químicas, biológicas e térmicas de lamas de depuração recebidas na Bioenergias, de modo a inferir potenciais utilizações.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 7 capítulos. No capítulo inicial consta o enquadramento do tema, bem como os objetivos a atingir com esta dissertação.

O Capítulo 2 corresponde ao enquadramento técnico-legal, incluindo uma breve descrição do processo de depuração dos efluentes líquidos nas ETAR, das lamas originadas nestas estruturas e das etapas que constituem a gestão de lamas de depuração.

No Capítulo 3 é apresentada a SS Bioenergias e as principais atividades da empresa.

O Capítulo 4 corresponde ao estado da arte sobre a gestão de lamas.

No Capítulo 5 é apresentada a descrição das metodologias experimentais adotadas de forma a cumprir os objetivos propostos. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 6.

No Capítulo 7 serão resumidas as principais conclusões, bem como possíveis melhorias e sugestões para trabalhos futuros.

2. ENQUADRAMENTO TÉCNICO-LEGAL

Neste capítulo procede-se ao enquadramento técnico- legal do tratamento de efluentes líquidos e das lamas de depuração e respetiva gestão.

2.1. Tratamento de efluentes líquidos

Os efluentes líquidos urbanos ou industriais podem conter diversos poluentes orgânicos e inorgânicos, além de microrganismos patogénicos, pelo que exigem tratamentos específicos, de forma a puderem ser descarregados para os cursos de água naturais sem por em causa a sua qualidade.

Os tratamentos sofridos pelos efluentes líquidos são essencialmente de natureza química, física e biológica. Contudo cada instalação adota os métodos que considera mais adequados, tendo em conta as características dos afluentes a tratar. Na Figura 2.1 indica-se um esquema geral das fases de tratamento de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e alguns dos principais métodos adotados.

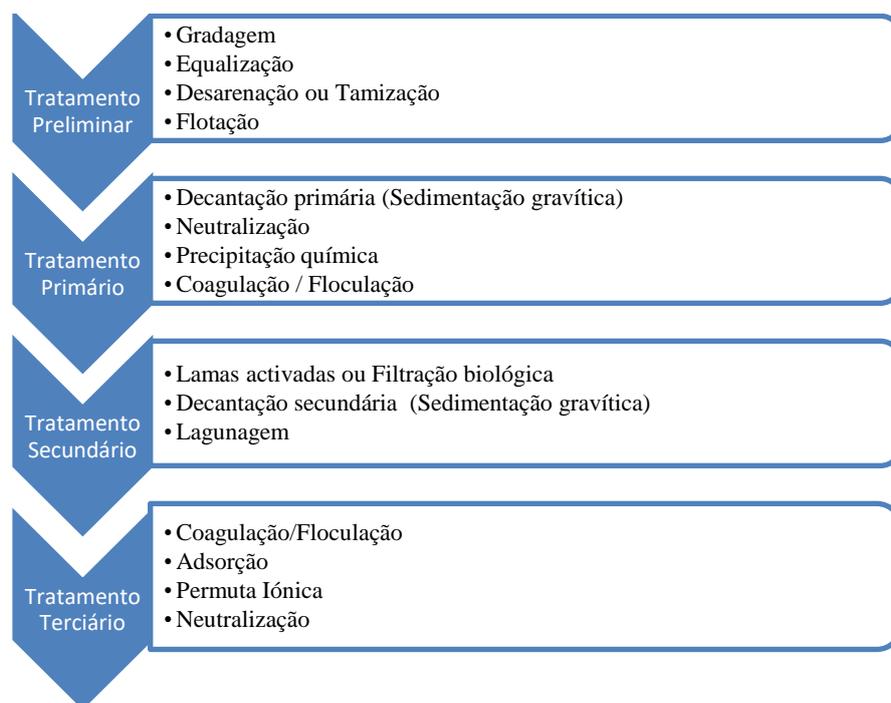


Figura 2.1. Etapas e tecnologias de tratamento possíveis das águas residuais.

Em geral, a primeira fase do tratamento consiste na remoção de sólidos mais grosseiros e outros tipos de matérias que surgem na ETAR juntamente com as águas residuais e designa-se por tratamento preliminar. Nesta fase ocorre normalmente a retenção de sólidos de maiores dimensões e a remoção de areia e gorduras, de modo a evitar o entupimento e desgaste do sistema. De seguida, as águas residuais são submetidas ao tratamento primário, que envolve geralmente um decantador primário.

O tratamento primário das águas residuais encontra-se definindo no Decreto-Lei nº 152/1997 de 29 de junho, como “qualquer processo físico e ou químico que envolva a decantação das partículas sólidas em suspensão, ou por outro processo em que a Carência Biológica de Oxigénio (CBO₅) das águas recebidas seja reduzida de, pelo menos, 20% antes da descarga e o total das partículas sólidas em suspensão das águas recebidas seja reduzido de, pelo menos, 50%”. Um dos principais processos é a sedimentação gravítica dos sólidos suspensos, que ocorre nos decantadores primários. Estes acumulam-se no fundo do decantador, sendo posteriormente removidos por uma limpeza de fundo, constituindo as lamas primárias. O tratamento primário pode ainda ser realizado com recurso a químicos, de forma a promover a remoção de material poluente das águas residuais, como acontece na precipitação química, na coagulação e na floculação. Já a neutralização do efluente tem como objetivo alterar o pH da água a tratar, recorrendo à introdução de soluções ácidas ou alcalinas dependendo do objetivo a atingir.

No tratamento secundário ocorrem processos biológicos aeróbios ou anaeróbios que têm como objetivo a remoção da fração biodegradável da matéria orgânica, recorrendo à ação de microrganismos aeróbios ou anaeróbios, permitindo ainda a redução de compostos como nitratos e fosfatos. Estes processos podem ocorrer em sistemas de lamas ativadas ou filtração biológica. O sistema de lamas ativadas ocorre em tanques de arejamento com agitação, pelo que não permite a sedimentação de partículas, as quais passam juntamente com a fração líquida para o decantador secundário. É no fundo do decantador secundário que, novamente por ação gravítica, se acumulam os sedimentos que vão constituir as lamas secundárias.

O tratamento terciário é mais utilizado no tratamento de águas residuais industriais, e quando a descarga das águas tratadas se dá numa zona classificada como sensível ou num curso de água com baixo caudal, que não permite a diluição adequada do efluente tratado com a água recetora. Esta fase tem como objetivo principal a remoção dos

sólidos, nutrientes, componentes orgânicos e inorgânicos e microrganismos que ainda permanecem na fração líquida, purificando a água até níveis mais exigentes.

2.2. Lamas de depuração de efluentes

Do processo de tratamento de efluentes resultam lamas que apresentam características diversas, consoante o tipo de efluentes a tratar, a tecnologia aplicada e a fase da ETAR em que foram originadas as lamas. Na Figura 2.2 representa-se as principais fases do tratamento geradoras de lamas em ETAR convencionais, bem como a designação das lamas obtidas nos diferentes processos.

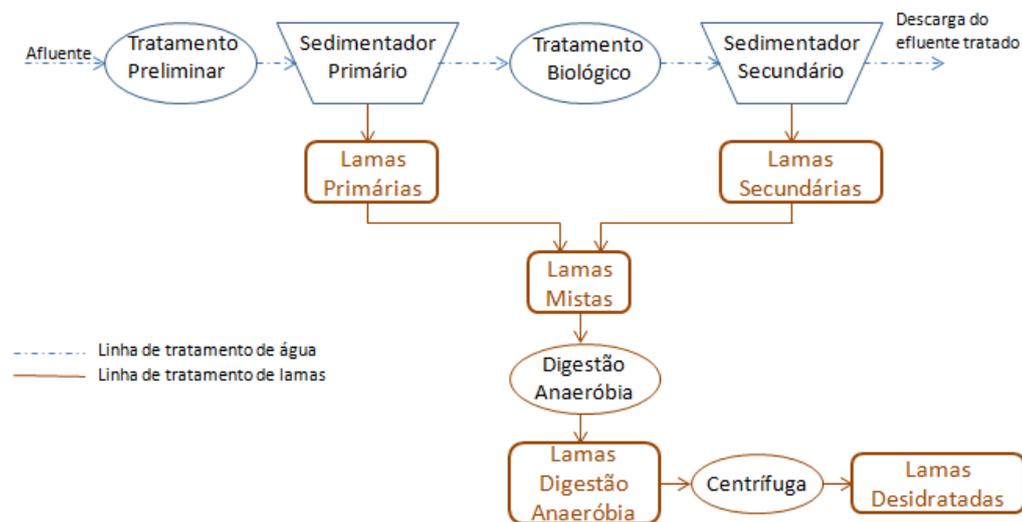


Figura 2.2. Fontes principais de lamas em ETAR.

Em muitas instalações, mistura-se as lamas resultantes do tratamento primário com as do tratamento secundário, formando as lamas mistas, que são tratadas de forma conjunta.

As lamas provenientes do tratamento primário têm geralmente cor escura, odor muito desagradável e elevada viscosidade.

Existem dois tipos de lamas secundárias, de acordo com o tratamento biológico efetuado antes da decantação secundária: as lamas ativadas e as lamas de sistemas de filtração biológica, como os leitos percoladores. As lamas de filtração biológica possuem um teor de sólidos ligeiramente superior às lamas ativadas, sendo mais facilmente digeridas anaerobiamente, ao contrário das lamas ativadas, que são melhor digeridas por

processos aeróbios (Tchobanoglous *et al.*, 2014). A Tabela 2.1 mostra as características típicas das lamas primárias e secundárias, mais precisamente lamas ativadas.

Tabela 2.1. Características típicas das lamas primárias e secundárias (adaptado de Tchobanoglous *et al.*, 2014).

Parâmetro	Lamas Primárias		Lamas Secundárias	
	Gama	Típico	Gama	Típico
pH	5 - 8	6	6,5 - 8	7,1
Sólidos Totais [%]	1 - 6	3	0,4 - 1,2	0,8
Sólidos Voláteis [% ST]	60 - 85	75	60 - 85	70
N [% ST]	1,5 - 4	2,5	2,4 - 5	3,8
P (P ₂ O ₅) [% ST]	0,8 - 2,8	1,6	2,8 - 11	5,5
K (K ₂ O) [% ST]	0 - 1	0,4	0,5 - 0,7	0,6

Das características apresentadas, o parâmetro que apresenta maiores diferenças nos dois tipos de lamas é o teor de Sólidos Totais, em que se verifica uma diminuição das lamas primárias para as secundárias. É ainda relevante destacar os elevados teores de sólidos voláteis, que indicam a quantidade de matéria orgânica existentes nas lamas.

Muitos dos poluentes removidos das águas residuais são transferidos para as lamas, pelo que na sua composição irão constar diversos compostos que necessitam de ser considerados, tais como os metais pesados, compostos orgânicos e dioxinas e microrganismos patogénicos. Para diminuir os teores de alguns destes contaminantes, as lamas são sujeitas a diversos tratamentos que têm também como objetivo a redução do teor de água e consequente do volume das lamas.

Estes tratamentos podem ser divididos em três fases essenciais: o espessamento, a estabilização e a desidratação. Em geral, é o tipo de utilização final que se pretenda dar às lamas, que determina os métodos adotados (Tavares, 2007). Na Tabela 2.2 encontram-se referidas e caracterizadas algumas formas de tratamento mais utilizadas.

O processo de espessamento ocorre normalmente em espessadores gravíticos ou de flotação, e tem como principais objetivos a redução da fração líquida das lamas de depuração e a concentração dos sólidos. Esta consequente redução do volume das lamas torna o processo mais económico, uma vez que o volume do tanque de armazenamento pode ser menor, tal como os equipamentos de tratamento a jusante deste processo. Além disso, havendo menor volume de lamas a tratar, diminui a quantidade de químicos a aplicar nos tratamentos posteriores e a energia de bombagem necessária.

A estabilização das lamas tem como intenção a eliminação ou redução dos organismos patogênicos e de odores, e controlar o potencial de putrefação da matéria orgânica. O método mais utilizado para a estabilização das lamas de depuração é a digestão anaeróbia, em que microrganismos anaeróbios degradam matéria orgânica. Desta digestão resulta biogás, que pode ser captado e utilizado para produção de energia, ajudando a diminuir os custos do processo que são, geralmente, muito elevados. Se o objetivo for a posterior incorporação das lamas nos solos, deve proceder-se a este passo do tratamento. No entanto, se o objetivo for a valorização energética, este passo pode ser dispensável.

A desidratação das lamas tem como objetivo a remoção da humidade, de modo a diminuir o volume ocupado pelas mesmas.

Tabela 2.2. Resumo das fases e métodos de tratamento de lamas.

Fase	Métodos	Caraterísticas
Espessamento	Gravidade	Sedimentação de partículas pela ação da gravidade. Método eficiente para lamas primárias.
	Flotação	Injeção de ar no material. Partículas sólidas juntam-se às partículas de ar, ficando com uma densidade inferior à da água, sendo arrastadas para a superfície.
Estabilização	Compostagem	Degradação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios, produzindo um composto humificado.
	Digestão anaeróbia	Degradação da matéria orgânica na ausência de O ₂ . Tem a vantagem de produzir biogás para recuperar energia. No entanto, é um processo caro e com muitas vulnerabilidades.
	Estabilização química	Adição de compostos, como a cal. Garante a higienização da lama, aumentando a sua temperatura e pH. Reduz os maus cheiros e pode precipitar metais pesados.
Desidratação	Leitos de secagem	Evaporação natural da água.
	Centrifugação	Separação da fase líquida da fase sólida por ação centrífuga. Promove também o espessamento da lama.
	Filtros de prensa	Extração da fase líquida, através de telas filtrantes que retêm a fase sólida.

Após tratamento, as lamas podem ser transportadas de modo mais seguro, e dar-lhe um destino final mais adequado de acordo com as caraterísticas apresentadas.

2.3. Gestão de lamas

2.3.1. Transporte e armazenamento

O transporte representa uma fração significativa no custo total inerente à gestão de lamas e constitui uma fase de extrema importância, dado que é incontornável a sua mobilização das lamas desde o local de produção e tratamento até ao local de destino final ou, em alguns casos, de armazenamento prévio. Há diferentes modos de se efetuar o transporte das lamas, e a escolha é feita tendo em consideração diversos fatores, nomeadamente as características e quantidades, a distância a percorrer entre a origem e destino final ou armazenamento e a flexibilidade de transporte pretendida.

Uma das opções é o transporte através de condutas, normalmente colocadas em profundidade, onde as lamas circulam por bombagem, sendo mais adequada para transportes de curtas distâncias. No entanto, este tipo de instalação apenas permite o transporte de lamas com baixas concentrações de sólidos, com valores máximos de Sólidos Totais (ST) entre 6% e 10% w/w (Sousa, 2005; Tavares, 2007). O transporte de lamas por condutas tem alguns custos de instalação, manutenção e energéticos, devido à necessidade de bombagem.

O transporte ferroviário é uma alternativa que permite o transporte de quantidades elevadas de lamas, sem nenhuma restrição relativa a quantidade de ST, podendo ser transportadas a elevadas distâncias. Todavia, é uma opção pouco utilizada, uma vez que implica uma rede ferroviária adequada e a criação de locais fixos e apropriados de recolha e entrega, obrigando assim a um elevado custo inicial.

O método normalmente mais utilizado é o transporte por camião. Esta alternativa também permite o transporte de todo o tipo de lamas a elevadas distâncias, apresentando maior flexibilidade no trajeto efetuado relativamente às opções apresentadas anteriormente, o que significa que se podem alterar os pontos de recolha e de entrega sem que o transporte das lamas seja comprometido. Para a entidade gestora das lamas, o custo associado a este tipo de transporte é apenas relativo ao pagamento da empresa transportadora e normalmente depende das distâncias percorridas. O grande inconveniente associado ao transporte de lamas por camião prende-se com a perceção negativa que a população tem desta prática, principalmente devido aos odores agressivos de alguns tipos de lamas, ao ruído provocado pelo tráfego e alguma sujidade provocada pela passagem dos camiões nas vias de comunicação quando o transporte não é bem efetuado. Tavares (2007) refere algumas medidas para contornar estes inconvenientes, como por exemplo, um

planeamento mais rigoroso do trajeto efetuado pelas viaturas. A seleção da viatura para o transporte deve também considerar as características das lamas, garantindo a proteção da carga de modo a evitar derrames que poluam as vias de comunicação.

O transporte das lamas é acompanhado por uma guia de transporte Modelo A, conforme o estabelecido na Portaria nº 335/1997 de 16 de maio, que refere ainda que este documento deve ser preenchido em triplicado para o produtor, operador e transportador das lamas. Este documento consiste numa declaração que discrimina o resíduo transportado, a sua quantidade e destino, bem como as características do veículo de transporte. Como já foi referido anteriormente, nem sempre o transporte é feito diretamente das instalações do produtor para o destino final, havendo por vezes necessidade de se proceder ao armazenamento das lamas nas instalações da entidade operadora. Esta necessidade surge do facto da produção de lamas ser contínua ao longo do ano, ao contrário da procura, especialmente no caso da aplicação destes resíduos em terrenos de cultivo.

2.3.2. Destinos finais

O aumento da produção de lamas de depuração requer um plano de gestão eficiente. O Decreto-Lei nº 73/2011 de 17 de junho, que procede a alterações ao Regime Geral da Gestão de Resíduos, estabelece uma hierarquia de gestão de resíduos, dando prioridade à prevenção, redução e reciclagem dos resíduos produzidos. Assim, deve optar-se por destinos de reciclagem/ valorização das lamas, evitando a sua deposição em aterro.

O Decreto-Lei nº 73/2011 agrupa as operações de gestão de resíduos em duas categorias: operações de eliminação (código D) ou de valorização (código R). Procede-se de seguida a uma descrição mais pormenorizada das opções de eliminação e valorização de lamas de depuração aplicadas frequentemente:

- **Deposição em aterro**

A deposição de resíduos em aterro é uma operação de eliminação e encontra-se regulamentada pelo Decreto-Lei nº 183/2009 de 10 de agosto. No Artigo 8 do referido Decreto-Lei encontram-se definidas algumas metas relativamente aos resíduos biodegradáveis, como é o caso das lamas de ETAR urbanas. Em particular, pretende-se a redução para 50% w/w da quantidade total dos resíduos urbanos biodegradáveis

produzidos no ano de 1995 até julho de 2013 e redução para 35% até julho de 2020. Partindo desta necessidade de redução de matéria biodegradável nos aterros, e considerando a formação de lixiviados e contaminação dos solos com metais pesados, devem procurar-se outras opções de destino final para as lamas. No caso de não haver outra alternativa senão a deposição em aterro, deve tentar-se a recuperação do biogás resultante da degradação da matéria orgânica em condições anaeróbias. Este gás é constituído por metano e dióxido de carbono e, segundo o Decreto-lei nº 183/2009, deve ser captado, tratado e utilizado, sempre que possível, para produção de energia.

- **Valorização energética**

Quando se procede à incineração ou co-incineração das lamas recuperando e aproveitando a energia libertada, considera-se o processo como uma operação de valorização. Este tipo de valorização é adequado para lamas com elevado teor de poluentes, cujo tratamento seria demasiado dispendioso. Neste processo, a fração orgânica presente nas lamas é transformada em dióxido de carbono, água e energia, que pode ser recuperada no processo. A combustão das lamas permite ainda uma redução substancial do volume para cerca de 90% do volume inicial e também a eliminação de microrganismos patogénicos, devido às temperaturas elevadas que se atingem no processo. No entanto, a incineração ou a co-incineração acarretam alguns riscos ambientais devido à emissão de substâncias poluentes. Nesse sentido, esta atividade é regulamentada pelo Decreto-lei nº 85/2005 de dia 28 de abril, que tem como objetivo definir as condições de funcionamento, requisitos técnicos e valores limite de emissão, monitorizando a emissão de gases atmosféricos, resíduos resultantes do processo e a descarga de águas residuais.

- **Compostagem**

A compostagem é aplicada a resíduos com elevado teor de matéria orgânica, como é o caso da maioria das lamas de depuração de efluentes. No processo é produzido composto, constituído pela fração da matéria orgânica não biodegradável, microrganismos envolvidos e inertes. Este método é também muito vantajoso, uma vez que se forem atingidas temperaturas suficientemente elevadas, obter-se-á a higienização do material, isto é, haverá eliminação ou redução significativa dos microrganismos patogénicos existentes nas lamas. Para garantir a eficiência do processo, para além da temperatura, devem monitorizar-se também outros parâmetros, nomeadamente a quantidade de oxigénio,

granulometria e porosidade do material (de forma a garantir o arejamento da mistura), a humidade (considerada ótima na gama de 50 a 60%), e o teor carbono/azoto (C/N), que deve ser aproximadamente 30.

À grande escala, este processo pode tornar-se dispendioso, devido aos custos energéticos e de manutenção associados: para manter os níveis de oxigénio adequados, o processo poderá necessitar de arejamento mecânico; além disso, se não se conseguir atingir a temperatura desejada poderá ser necessário o fornecimento de mais energia térmica para o sistema.

A compostagem potencia a valorização agrícola de lamas, se o composto resultante for aplicado como corretivo. Não há ainda normas que regulem a constituição do composto resultante, de forma que se recorre aos limites definidos para a aplicação das lamas nos solos (Pinto, 2014). Caso se recorra à compostagem para estabilizar o material antes do encaminhamento para aterro, esta é considerada uma operação de eliminação.

- **Valorização agrícola**

Os solos portugueses são muito pobres em matéria orgânica, e a sua presença é vital para um bom desenvolvimento das culturas, uma vez que permite o desenvolvimento de bactérias que tornam o N, P e K biodisponíveis, ou seja, prontos a serem utilizados pelas plantas.

Como já foi anteriormente referido, os tratamentos efetuados nas ETAR com o objetivo de diminuir a carga de matéria orgânica, N, P e K nas águas residuais fazem com que parte destes elementos sejam transferidos para as lamas. Assim, a correta aplicação de lamas nos solos agrícolas pode ser bastante vantajosa e pode levar à diminuição da quantidade de fertilizantes inorgânicos aplicada para garantir um desenvolvimento saudável das culturas. Para além disso, ajuda também na correção do pH de solos ácidos e melhora a capacidade de retenção de água no solo.

No entanto, se as lamas não forem sujeitas a tratamentos que reduzam o seu potencial poluente, a sua utilização agrícola pode implicar a contaminação dos solos, lençóis freáticos e cursos de água com metais pesados, contaminantes orgânicos ou organismos patogénicos. Desta forma, nem todas as tipologias de lamas podem ser sujeitas a este tipo de valorização, estando dependentes de constrangimentos legais exigentes, com base no código atribuído pela Lista Europeia de Resíduos (LER) às lamas.

Segundo o Artigo nº 2 do Decreto-lei nº 276/2009 de 2 de outubro, a valorização agrícola apenas se pode aplicar a:

- Lamas de depuração – lamas do tratamento de ETAR domésticas e urbanas, de atividades agro-pecuárias e de fossas sépticas - LER 190805;
- Lamas de composição similar, tais como:
 - a) Lamas do tratamento de efluentes de preparação e processamento de frutos, legumes, cereais, óleos alimentares, cacau, café, chá e tabaco, da produção de conservas, levedura e extrato de melaços - LER 020305;
 - b) Lamas do tratamento de efluentes do processamento do açúcar - LER 020403;
 - c) Lamas do tratamento de efluentes da indústria de laticínios - LER 020502;
 - d) Lamas do tratamento de efluentes da indústria da panificação, pastelaria e confeitaria - LER 020603;
 - e) Lamas do tratamento de efluentes da produção de bebidas alcoólicas e não alcoólicas, excluindo café, chá e cacau – LER 020705;
 - f) Lamas do tratamento de efluentes da produção e transformação da pasta para papel, papel e cartão- LER 030311.

No Decreto-lei nº 276/2009, encontram-se também definidos os requisitos, condições e restrições na aplicação de lamas nos solos agrícolas, permitindo enquadrar e agilizar o processo do licenciamento para a sua aplicação em solos.

2.3.3. Licenciamento da aplicação agrícola de lamas

A atividade de aplicação de lamas em solos agrícolas está sujeita à aprovação de um Plano de Gestão de Lamas (PGL) por parte da Direção Regional de Agricultura e Pescas (DRAP) responsável na zona onde é pretendido proceder-se à incorporação no solo, devendo incluir os elementos constantes no Anexo A do presente documento.

Após receber o PGL, a DRAP deve remeter o documento para a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) e à Administração da Região Hidrográfica (ARH), de modo a que estas entidades emitam pareceres relativos às suas áreas de atuação. Após a receção dos pareceres destas instituições, a DRAP comunica a sua decisão final, sendo que o PGL apenas pode ser aprovado pela DRAP no caso de a CCDR e a ARH terem emitido pareceres favoráveis.

Para se proceder à aplicação de lamas nos terrenos de cultivo, o requerente do PGL necessita também de uma Declaração de Planeamento de Operações (DPO), um documento anual referente a cada terreno onde se pretenda proceder à aplicação de lamas. Esta declaração também é alvo de apreciação por parte da DRAP, que verifica se este se encontra em conformidade com a legislação vigente. Na DPO devem constar as informações descritas no Apêndice A.

Para o licenciamento da aplicação de lamas a incorporar, devem ser determinados parâmetros como o teor de metais pesados, compostos orgânicos e os microrganismos patogénicos. Os limites máximos destes parâmetros encontram-se na Tabela 2.3 e fazem parte do Anexo I do Decreto-lei nº 276/2009.

Tabela 2.3. Valores Limite de metais pesados, compostos orgânicos e microrganismos nas lamas destinadas à aplicação na agricultura (adaptado do Anexo I do Decreto-Lei nº 276/2009).

Parâmetros		Valores-limite	Unidades
Metais Pesados	Cd	20	[mg/kg ST]
	Cu	1000	
	Ni	300	
	Pb	750	
	Zn	2500	
	Hg	16	
	Cr	1000	
Compostos Orgânicos	LAS	5000	[mg/kg ST]
	NPE	450	
	PAH	6	
	PCB	0,8	
	PCDD	100	[ng TEQ/kg ST]
	PCDF	100	
Microrganismos Patogénicos	<i>Escherichia coli</i>	< 1000	células/g de matéria fresca
	<i>Salmonella spp.</i>	Ausente	em 50 g de material original

LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares); NPE (nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados); PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos); PCB (compostos bifenilos policlorados); PCDD (policlorodibenzodioxinas); PCDF (policlorodibenzofuranos)

No referido Decreto-lei consta ainda a frequência de análises anuais requeridas, que depende da produção anual da instalação. Assim, para instalações com produção inferior a 250 t lamas/ano são requeridas análises 2 vezes ao ano; para produções de lamas entre 250 a 5000 t/ano, a frequência anual de análises é 4; e para produção superior a 5000 t/ano são necessárias 6 análises anuais. A frequência de análise para certo parâmetro agronómico pode ser reduzida se em 2 anos consecutivos se obtiver um desvio inferior a

20% relativamente à média dos valores determinados e a frequência de determinação de metais pesados e microrganismos patogénicos poderá ser reduzida se em 2 anos consecutivos se obtenham valores sistematicamente inferiores a 75% do valor limite. Nestes casos, a frequência de amostragem para análise será de 1 para produções de lamas iguais ou inferiores a 2500 t/ano e de 2 para produções acima de 2500 t/ano.

Além da determinação das características das lamas, é necessário também proceder à amostragem do solo onde se pretende efetuar a aplicação, de modo a determinar parâmetros agronómicos, como o pH, teor de MO e nutrientes, a sua textura e a concentração em metais pesados. As condições de amostragem de solos encontram-se definidas no Decreto-lei nº 276/2009, referindo-se que as amostras de solo devem representar uma área homogénea no máximo de 5 ha, e ser recolhidas à profundidade de 25 ou a 10 cm, conforme o tipo de exploração.

A aplicação das lamas no solo está dependente dos resultados destas análises e do cumprimento dos valores limite definidos para cada parâmetro.

2.3.4. Fertilização de solos

Para que se possa criar culturas de qualidade e em quantidade, é fundamental que o solo reúna as condições necessárias para que as plantas se desenvolvam de forma saudável. Assim, o solo deve garantir os nutrientes necessários nas quantidades apropriadas, possuindo disponibilidade de matéria orgânica e pH adequado a cada cultura, boa permeabilidade e ausência de substâncias inibidoras do desenvolvimento das plantas. A reunião de todos estes fatores constitui a fertilidade de um solo, que é descrita em INIAP (2006) como a “maior ou menor aptidão deste para fornecer às plantas as condições físicas, químicas e biológicas adequadas ao seu crescimento e desenvolvimento”. Os fatores que mais influenciam a fertilidade de um solo são:

- **Textura**

Um solo é constituído por diferentes partículas, cujas características influenciam propriedades como a sua permeabilidade. Por isso é importante determinar a distribuição granulométrica do solo.

A classificação da textura dos solos é feita considerando a percentagem de areia, argila e limo que compõem a amostra estudada, sendo a denominação atribuída considerando o diagrama triangular de textura representado na Figura 2.3.

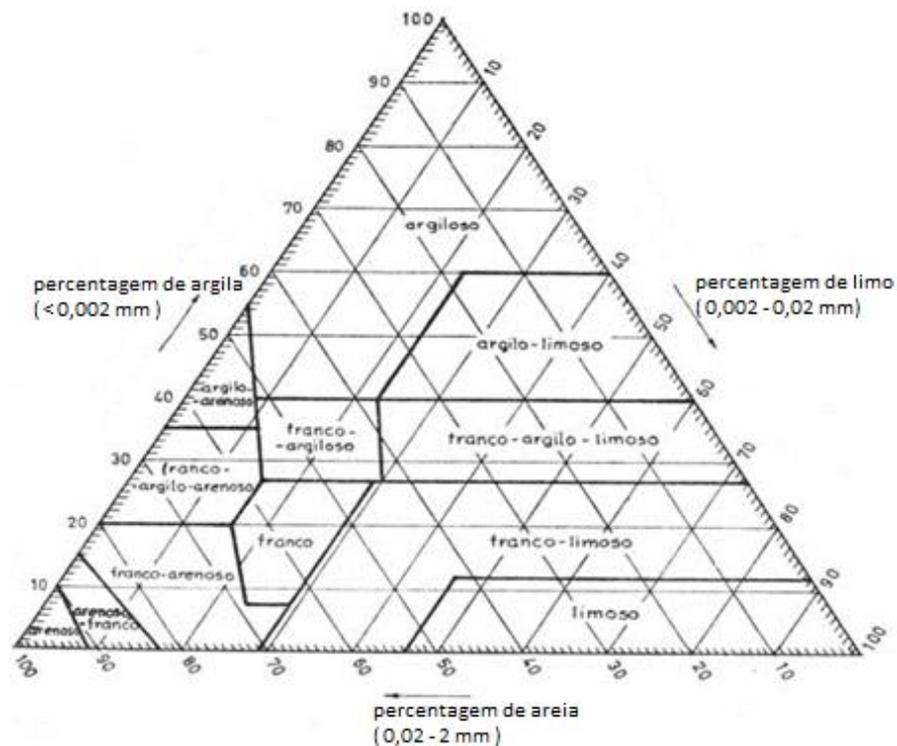


Figura 2.3. Diagrama triangular da textura (adaptado de INIAP, 2006).

- **pH**

O pH do solo é classificado de acordo com as gamas indicadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Classificação do solo de acordo com o pH (adaptado de INIAP, 2006).

Classificação		pH
Ácido	Muito ácido	$\leq 4,5$
	Ácido	4,6 - 5,5
	Pouco ácido	5,6 - 6,5
Neutro	Neutro	6,6 - 7,5
Alcalino	Pouco alcalino	7,6 - 8,5
	Alcalino	8,6 - 9,5
	Muito alcalino	$> 9,5$

A importância do conhecimento do pH do solo deve-se principalmente à sua influência determinante no comportamento dos microrganismos e na disponibilidade dos nutrientes, como se pode observar na Figura 2.4.

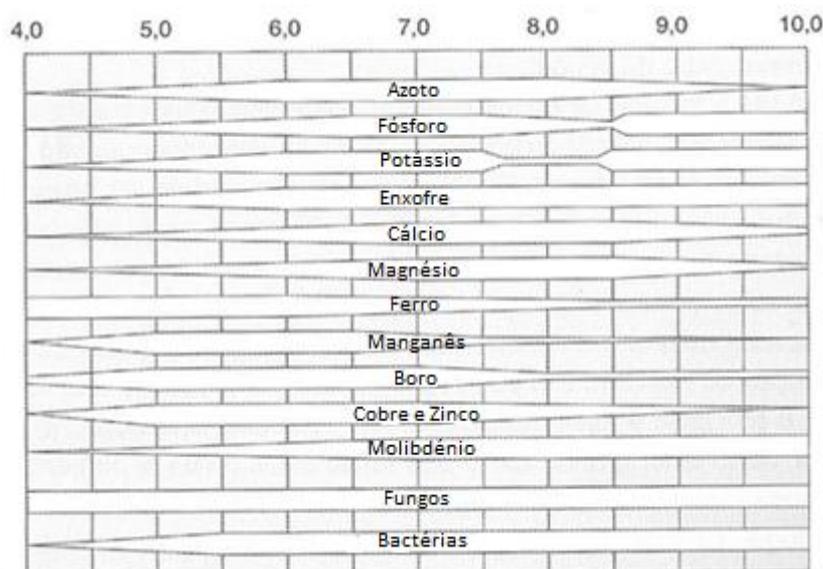


Figura 2.4. Relação entre a disponibilidade de elementos e microrganismos em função do pH do solo (adaptado de INIAP, 2006).

Considerando esta relação entre a disponibilidade dos metais em função do pH do meio, no Decreto-lei nº 276/2009 são estabelecidos valores-limite da concentração de metais pesados no solo. Estes valores encontram-se indicados na Tabela 2.5 e condicionam dessa forma a aplicação de lamas nos solos agrícolas.

Tabela 2.5. Valores limite de concentração de metais pesados consoante o pH do solo (adaptado do Anexo I do Decreto-lei nº 276/2009).

Metais pesados [mg/kg ST]	pH≤5,5	5,5<pH≤7	pH>7
Cd	1	3	4
Cu	50	100	200
Ni	30	75	110
Pb	50	300	450
Zn	150	300	450
Hg	1	1,5	2
Cr	50	200	300

- **Matéria orgânica**

De acordo com INIAP (2006), a matéria orgânica do solo resulta de “restos de plantas e de outros seres vivos, parcial ou completamente decompostos”, designando-se a fração mais estabilizada e escura por húmus.

Os microrganismos presentes no solo usam a MO como fonte de energia, promovendo a mineralização dos nutrientes para que eles possam ser aproveitados pelas

plantas. Além disso, a presença de MO contribui o equilíbrio entre a água e o ar em proporções ideais ao desenvolvimento das raízes das plantas e à promoção da absorção de água e nutrientes (Sousa, 2005). Em INIAP (2006) considera-se quantidade significativa de MO a partir de 5 a 10% em solos ligeiros, e 7 a 15% para solos com textura fina.

- **Nutrientes**

O solo possui vários nutrientes, mas apenas uma parte pouco significativa se encontra biodisponível, ou seja, numa forma em que possam ser assimilados pelas plantas (INIAP, 2006). Os nutrientes mais importantes para o desenvolvimento das culturas são o N, P e K.

O azoto desempenha um papel crucial para o metabolismo das plantas, promovendo o crescimento de folhas e caules (Pinto, 2014). No entanto, há muita escassez deste nutriente nos solos portugueses e apenas uma pequena fração está prontamente disponível para as plantas, encontrando-se principalmente na forma orgânica (INIAP, 2006).

O fósforo é crucial no desenvolvimento de culturas, dado que potencia o crescimento das raízes e aumenta a resistência a doenças (Pinto, 2014). Este elemento encontra-se muito frequentemente ligado a outras espécies, podendo estar na forma orgânica ou mineral, encontrando-se mais frequentemente como pentóxido de fósforo (P_2O_5).

O potássio desempenha um importante papel importante ao nível dos tecidos, fortalecendo o caule e aumentando também a resistência das plantas a pragas. No entanto, em quantidades acima das recomendadas atrasa a maturação das plantas (Pinto, 2014). Segundo INIAP (2006), os solos possuem elevados teores de K oriundos de minerais existentes, com exceção dos solos ricos constituídos por areias e arenitos. Porém apenas uma pequena parte se encontra numa forma biodisponível para as culturas.

De acordo com a quantidade de nutrientes existentes no solo, são atribuídos índices de 1 a 7 que classificam o nível de fertilidade do solo. No Apêndice B apresenta-se a correspondência entre os níveis de fertilidade e os teores de P (expresso em P_2O_5) e K (em K_2O).

A aplicação de lamas pode ajudar a melhorar estes parâmetros, de modo a adequar as características dos solos às necessidades das culturas a desenvolver, podendo atuar ao nível da correção do pH, teor de MO e disponibilidade de nutrientes, por exemplo.

2.3.5. Quantidade de lamas a aplicar nos solos

O cálculo da quantidade de lamas a aplicar numa determinada área de cultivo, para incluir na declaração de planeamento de operação a ser aprovada pelas autoridades competentes, requer que se verifique a quantidade de N, P e K existentes nas lamas. Adicionalmente, é necessário considerar o tipo de cultura que se pretende desenvolver na área de aplicação e a produção esperada. Atualmente encontram-se definidas as recomendações de fertilização para vários tipos de culturas, considerando as necessidades nutricionais em termos de N, P e K (INIAP, 2006). O cálculo da quantidade de lamas a incorporar é feito separadamente para cada nutriente, e a quantidade a aplicar resulta do menor valor obtido, que corresponde ao nutriente limitante do processo, de modo a evitar que os solos fiquem saturados com os restantes nutrientes. Além do teor de cada nutriente requerido por uma específica ($X_{nec.}$) e existente na lama (X_L), é necessário ainda conhecer-se o teor de sólidos totais (ST) da lama para proceder à determinação da quantidade de lamas a incorporar (Q_{LA}), conforme indicado na Eq. (3.1).

$$Q_{LA}[t/ha] = \frac{X_{nec.}}{X_L \times \frac{ST}{100}} \quad (3.1)$$

O cálculo da quantidade de nutrientes que se introduz no solo, Q_{XS} , ao aplicar a quantidade de lamas calculada é determinada de acordo com a Eq. (3.2).

$$Q_{XS}[t/ha] = X_L \times \frac{ST}{100} \times Q_{LA} \quad (3.2)$$

Após esta determinação, compara-se os valores obtidos com os recomendados e verifica-se se as necessidades nutricionais são completamente satisfeitas ou se é necessário proceder à aplicação de fertilizantes minerais para colmatar falhas de nutrientes.

Como se pode perceber, estes cálculos implicam a necessidade de se proceder à caracterização das lamas a incorporar e dos solos onde se pretende proceder à aplicação.

3. SS BIOENERGIAS SA

Fundada em 2009 e pertencente ao Grupo Lena desde 2012, a SS Bioenergias SA é uma empresa que gere lamas de depuração de efluentes, promovendo o escoamento de lamas produzidas em ETAR urbanas ou industriais. A sua unidade de armazenamento de resíduos encontra-se localizada em Carvalhais, Figueira da Foz, e tem possibilidade de receber até 15000 t de lamas de depuração por ano, segundo o alvará da empresa.

A Bioenergias é contratada por entidades produtoras de lamas, mediante um custo que depende de fatores como a distância de transporte, responsabilizando-se pelas diferentes fases do processo de gestão: o transporte, armazenamento e encaminhamento para destino final que, sempre que possível, é a valorização das lamas em explorações agrícolas.

A empresa pode receber lamas de diferentes proveniências, encontrando-se representadas na Tabela 3.1 as tipologias de lamas que podem ser objeto de gestão por parte da Bioenergias e os respetivos valores anuais estimados, segundo o estabelecido no alvará da empresa.

Tabela 3.1. Lamas de depuração objeto de gestão na Bioenergias e respetivas quantidades anuais estimadas.

Fonte geradora do resíduo	Código LER	Designação	Quantidade [t/ano]
Agricultura, horticultura, aquacultura, silvicultura, caça e pesca	020101	Lamas provenientes da lavagem e limpeza	250
Preparação e processamento da carne, peixe e outros produtos alimentares de origem animal	020201	Lamas provenientes da lavagem e limpeza	150
	020204	Lamas do tratamento local de efluentes	150
Preparação e processamento de frutos, legumes, cereais, óleos alimentares, cacau, café, chá e tabaco; produção de conservas; produção de levedura e extrato de levedura e da preparação e fermentação de melaços	020301	Lamas de lavagem, limpeza, descasque, centrifugação e separação	500
	020305	Lamas do tratamento local de efluentes	500
Indústria de laticínios	020502	Lamas do tratamento local de efluentes	250
Indústria de panificação, pastelaria e confeitaria	020603	Lamas do tratamento local de efluentes	100
Produção de bebidas alcoólicas e não alcoólicas (excluindo café, chá e cacau)	020705	Lamas do tratamento local de efluentes	250
Produção e transformação de pasta para papel, papel e cartão	030309	Resíduos de lamas de cal	250
	030311	Lamas do tratamento local de efluentes não abrangidas em 03 03 10	3000
Tratamento anaeróbio de resíduos	190604	Lamas e lodos de digestores de tratamento anaeróbio de resíduos urbanos e equiparados	250
	190606	Lamas e lodos de digestores de tratamento anaeróbio de resíduos animais e vegetais	250
Estações de tratamento de águas residuais não anteriormente especificados	190805	Lamas do tratamento de águas residuais urbanas	7000
	190812	Lamas do tratamento biológico de águas residuais industriais não abrangidas em 19 08 11	250
	190814	Lamas de outros tratamentos de águas residuais industriais não abrangidas em 19 08 13	250
Tratamento de água para consumo humano ou de água para consumo industrial	190902	Lamas de clarificação da água	500
	190903	Lamas de decarbonatação	100
Resíduos urbanos e equiparados	200304	Lamas de fossas sépticas	500

3.1. Modelo de gestão de lamas

Na Figura 3.1 encontra-se um esquema que resume o modelo de gestão de lamas implementado pela Bioenergias.

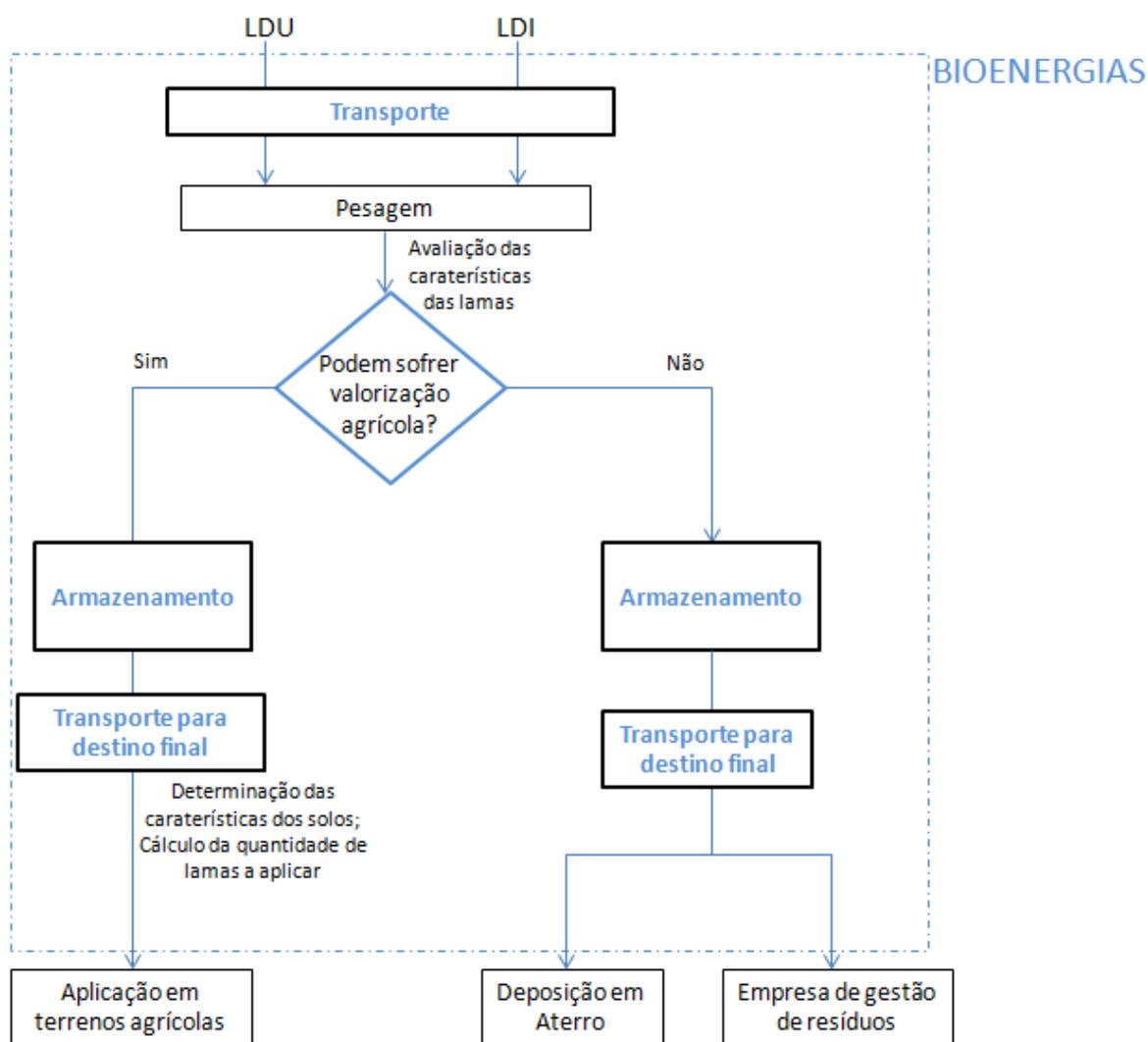


Figura 3.1. Representação do sistema de gestão de lamas implementado na Bioenergias.

Antes de as lamas serem encaminhadas para a unidade de armazenamento, uma entidade externa contratada pela Bioenergias procede à determinação das características físicas, químicas e biológicas, de forma a enquadrar as suas propriedades nos possíveis destinos finais e a verificar se cumprem as condições necessárias para serem aplicadas em solos agrícolas.

A Bioenergias procede à contratação de empresas transportadoras que, através de camiões, realizam o transporte das lamas desde a instalação produtora até à unidade de armazenamento das lamas. Os camiões são pesados à entrada e à saída da unidade, de modo a registar a quantidade de lamas recebidas. Na Figura 3.2 encontra-se o momento de descarga de lamas de depuração nas estruturas de armazenagem da empresa.



Figura 3.2. Descarga de lamas de depuração na unidade da Bioenergias.

A estrutura de armazenagem consiste em baias onde as lamas são depositadas, permitindo a separação das que têm possibilidade de ser agronomicamente valorizadas das restantes. As estruturas de armazenagem estão protegidas com plástico, formando estufas que, com a ação da energia solar, promovem a evaporação de alguma água retida nas lamas, promovendo a redução do teor de humidade.

Após período de armazenagem, as lamas são encaminhadas para destino final. De acordo com o alvará da empresa, a Bioenergias encontra-se habilitada a proceder às seguintes operações:

- Troca de resíduos para valorização (R12);
- Armazenagem para valorização (R13);
- Armazenagem para eliminação (D15).

Podendo sujeitar as lamas recebidas a qualquer uma destas operações, a Bioenergias opera as lamas que não podem ser sujeitas a valorização agrícola por R12, seguindo para uma empresa com capacidade para realizar compostagem. Quando por qualquer motivo não se pode proceder a este encaminhamento para valorização, as lamas são depositadas em aterro sanitário.

Consultando as guias de acompanhamento de resíduos Modelo A em arquivo na empresa, procedeu-se a um levantamento das quantidades e tipologias das lamas recebidas na unidade da Bioenergias, desde 1 de janeiro de 2016 até 16 de agosto. Esta análise permite perceber que tipos de lamas recebe a empresa, de forma a avaliar o processo de gestão a que são submetidas, uma vez que o destino final depende muito da sua origem e características. Na Figura 3.3 mostra-se a distribuição percentual em termos mássicos, das lamas recebidas na unidade da Bioenergias, relativamente ao código LER.

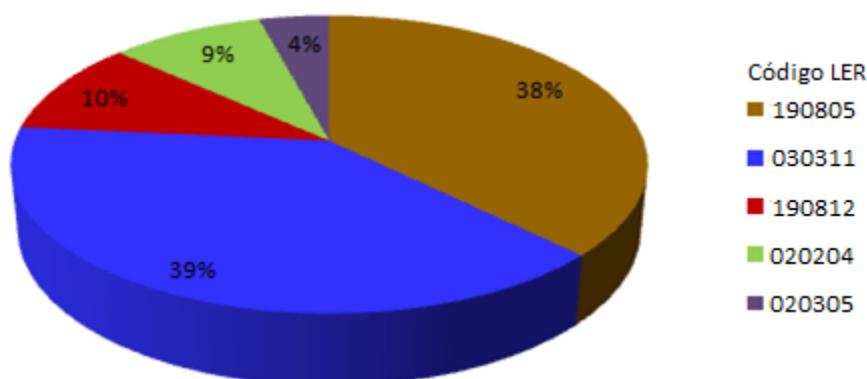


Figura 3.3. Percentagem de cada tipologia de lama recebida na Bioenergias.

Verificou-se 19% w/w das lamas recebidas não podem ser diretamente aplicadas em solos agrícolas, sendo por isso necessário dar-lhes outro destino. A fração mais significativa destas lamas, cerca de 46% w/w, são produzidas numa indústria de lavagem e reciclagem de plásticos e classificadas com o código LER 190812.

A maioria das lamas recebidas corresponde a LDI (62% w/w), sendo que mais de metade deste tipo de lamas corresponde a lamas de processos de produção de papel (39% w/w). Como referido anteriormente, segundo a legislação vigente as lamas de produção de papel podem ser aplicadas em terrenos agrícolas, tal como as LDU, que correspondem a 38% w/w das lamas recebidas na Bioenergias e as lamas classificadas com código LER 020305 (4% w/w).

Estas lamas que podem ser aplicadas diretamente em solos agrícolas, saem da unidade de armazenamento com código R10, para terrenos angariados pela empresa. Para proceder à aplicação, é necessário determinar as características dos solos e das lamas a incorporar, de forma a se poder calcular a quantidade de lamas a aplicar, conforme referido na secção 2.3.5.

No âmbito da atividade da empresa e do modelo de gestão atualmente implementado, procedeu-se à compilação de análises das características dos solos de algumas explorações agrícolas e de lamas de depuração, de origem urbana e industrial, recebidas na unidade de gestão da Bioenergias. Esta compilação de dados teve como intuito encontrar possíveis pontos de melhoria no processo de gestão adotado na empresa, nomeadamente quanto ao destino final das lamas que não podem ser valorizadas na agricultura.

4. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo resume-se a literatura consultada relativamente à gestão de lamas, de forma a compreender a realidade atual e as principais preocupações e avanços nesta área específica de tratamento de resíduos.

4.1. Gestão de lamas

De forma a abordar a problemática da gestão de lamas, é fundamental ter uma perspetiva geral da quantidade produzida e os principais destinos finais, bem como as formas de valorização mais aplicadas.

Em 2005, na União Europeia cerca de 79% da população encontrava-se ligada a sistemas de saneamento e tratamento de águas residuais (Ott e Rechberger, 2012). Com base em dados estatísticos relativos à União Europeia, Kelessidis e Stasinakis (2012), concluíram que os principais destinos finais das lamas (ano 2005) eram:

- valorização agrícola com aplicação direta no solo (44%);
- valorização agrícola após a sua estabilização por compostagem (10%);
- incineração (21%);
- deposição em aterro (15%);
- outros destinos (10%).

Com o aumento do número de estados-membros e com o desenvolvimento das condições sanitárias das populações, é de prever que a produção atual de lamas na Europa tenha aumentado, sendo necessário averiguar o melhor modo de gerir quantidades tão elevadas. Vários autores centram os seus estudos nas diferentes opções de destino final das lamas, tendo em conta aspectos económicos e ambientais (Lundin *et al.*, 2003; Lederer e Rechberger, 2010; Barberio *et al.*, 2013). Para a análise das diferentes opções, têm sido utilizadas ferramentas como a avaliação de ciclo de vida (LCA), balanços energéticos e de massa e avaliações económicas. As principais conclusões destes estudos encontram-se resumidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Estudos relativos ao destino final de lamas.

Ref.	Metodologia	Alternativas estudadas	Principais conclusões
Lundin <i>et al.</i> , 2003	LCA Avaliação económica	-Aplicação em solos agrícolas; -Co-incineração com resíduos domésticos; -Incineração com recuperação de P.	Co-incineração apresenta uma melhor <i>performance</i> ambiental mas é pior em termos económicos, observando-se o oposto quanto à aplicação das lamas em solos agrícolas. A recuperação de P pode ser bastante vantajosa.
Lederer and Rechberguer, 2010	LCA Balanços energéticos Balanços de massa	-Aplicação em solos agrícolas; -Mono-incineração e envio de cinzas resultantes para solos agrícolas; -Mono-incineração e envio de cinzas resultantes para aterro; -Mono-incineração e recuperação de P das cinzas resultantes; -Co-incineração numa fábrica de carvão; -Co-incineração num forno de cimento.	A tecnologia de recuperação de P é considerada a melhor opção, seguida da mono-incineração das lamas com aplicação das cinzas resultantes em solos agrícolas. As opções de destino final consideradas piores foram a co-incineração em fornos de cimento e a aplicação direta de lama em solos agrícolas.
Barberio <i>et al.</i> , 2013	LCA	- Deposição em aterro; - Estabilização com cal seguida de deposição em aterro; - Aplicação em solos agrícolas sem estabilização; -Estabilização com cal seguida de aplicação em solos agrícolas; -Compostagem	Compostagem e estabilização de lamas para aplicação nos solos apresentam menores impactes ambientais do que as restantes alternativas estudadas.

Lundin *et al.* (2003) estudaram diferentes opções de valorização de lamas, considerando como aspetos ambientais mais relevantes o uso de energia, a depleção de recursos ricos em fósforo e as emissões de metais pesados. Verificou-se que a co-incineração apresenta uma melhor *performance* ambiental, considerando a possibilidade de recuperação de energia e a redução do uso de gás natural e emissões de CO₂, apresentando no entanto elevados encargos económicos associados, principalmente, ao elevado custo de investimento e instalação. Relativamente à valorização agrícola de lamas, os impactes ambientais negativos estão associados principalmente ao uso de energia fóssil para a fase de tratamento, transporte e incorporação das lamas, e do ponto de vista económico é considerada a opção mais vantajosa. Foi ainda introduzida a opção de recuperação do P existente nas cinzas resultantes do processo de mono-incineração de lamas, cuja relevância reside no facto de o P ser um recurso mineral não-renovável, e o aumento da sua procura estar a causar a degradação das reservas de fosfato. Além de recuperar nutrientes, a

incineração permite ainda a recuperação de energia, referindo-se a importância de continuar a apostar no desenvolvimento desta tecnologia.

Já Lederer e Rechberguer (2010) consideram que a tecnologia de recuperação de P apresentava bons indicadores ao nível de emissões para a água, ar e solo. Também a mono-incineração de lamas seguida de aplicação das cinzas resultantes em solos agrícolas surge como uma boa alternativa, apresentando piores resultados que a tecnologia anteriormente referida apenas em relação às emissões para o solo e água. A aplicação direta de lamas e a co-incineração em cimenteiras surgem como as piores soluções de destino final, devido às elevadas emissões associadas.

Por último, Barberio *et al.* (2013) estudaram diferentes opções, de eliminação e valorização, incluindo variáveis no tratamento das lamas. Neste estudo, constatou-se a importância da correta estabilização das lamas de depuração, de forma a minimizar impactos negativos decorrentes da sua aplicação nos solos.

Os resultados e as conclusões obtidas neste tipo de estudos podem ser criticáveis, considerando a importância subjetiva que é atribuída às diferentes variáveis por cada autor, e à necessidade de cálculo de coeficientes na realização das LCA.

Relativamente à situação de Portugal, e tendo como base o preenchimento dos formulários dos operadores do Mapa Integrado de Registo de Resíduos, a APA quantificou as lamas produzidas em Portugal de acordo com a sua origem. Considerando 2013 como ano de referência, 66% w/w das lamas produzidas corresponderam a LDU. Apenas 3% destas lamas são sujeitas a operações de eliminação (e.g. aterro sanitário). Neste relatório pode ainda verificar-se que a incineração e co-incineração de lamas não é um destino considerado em Portugal, ao contrário do que se verifica em países como a Alemanha, onde a maioria das lamas (cerca de 50%) são incineradas (Kruger e Adam, 2015).

A potencialidade das lamas para valorização energética tem sido estudada por alguns autores. O poder calorífico superior (PCS) é indicativo do seu potencial energético, sendo variável consoante as características das lamas. Komilis *et al.* (2013) estudaram a influência da MO e ST no PCS de diferentes substratos, concluindo que no caso específico de LDU, estas possuíam mais energia por unidade de massa de material que os restantes substratos analisados. Ainda neste estudo, obtiveram-se valores de PCS entre 13000 e 18600 kJ/kg ST consoante o teor de humidade. Estes valores encontram-se na mesma

ordem de grandeza que os obtidos noutros estudos, como Nhuchhen e Salam (2012), que obtiveram PCS numa gama de 10140 a 13920 kJ/kg ST.

Em Portugal, 97% w/w das lamas produzidas seguem para opções de valorização, sendo 52% armazenadas temporariamente e posteriormente enviadas para terrenos agrícolas e 22% sujeitas ao processo de compostagem (APA, 2013). Uma vez que o principal destino de valorização em Portugal é a aplicação direta de lamas nos solos agrícolas, e que esta é também a principal alternativa de destino considerada na Bioenergias, procedeu-se à revisão de literatura relativa a este tema.

4.2. Valorização agrícola de lamas de depuração

De forma a perceber o impacto das lamas nos solos, procedeu-se à compilação de alguns artigos para efeito de análise dos parâmetros considerados mais relevantes na caracterização dos diversos tipos de solo, antes e depois da incorporação de lamas, conforme representado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Efeito da aplicação de lamas de depuração no solo.

Ref.	Tipo de lamas aplicadas	Tipo de solo estudado	Metodologia	Principais conclusões
Hussein, 2009	LDU	Arenoso e Calcário	Aplicação de 25, 50, 75, 100 e 125 t lamas/ha, na camada 0 - 30 cm, 2 meses antes da plantação de pepino.	-Redução do teor de pH; -Aumento dos teores iniciais de MO e P; -Aumento da concentração de metais pesados .
Bourioung <i>et al.</i> , 2014	LDU tratada com digestão aeróbia	Argiloso	Aplicação de 30 e 60 t lamas/ha. Lamas misturadas na camada 0 - 20 cm, 6 semanas antes da plantação de cedros.	-Inalteração do pH; -Aumento do P e N; -Aumento do teor de Cu e diminuição do Pb.
Fang <i>et al.</i> , 2016	Composto de LDU	Franco-limoso	Aplicação de 48 t composto/ha, na camada 0 - 10 cm.	-Redução do teor de Pb e Ni; -Diminuição do pH; -Aumento do TOC.
Lloret <i>et al.</i> , 2016	LDU estabilizada por via aeróbia e anaeróbia	(não especificado)	Comparação do efeito da aplicação de fertilizante mineral, lamas de digestão aeróbia e a digestão anaeróbia de modo a aplicar 1,8 g N/kg e 0,13 g P/kg de solo. Lamas misturadas na camada 0 - 20 cm, antes da plantação de melão.	-Inalteração do pH, -Aumento do teor de Cu e Zn e diminuição de Cr; -Aumento do TOC.

Hussein (2009), nos trabalhos realizados, observou que inicialmente o solo arenoso e o calcário apresentavam, respetivamente, um pH de 7,84 e 7,75. Após a aplicação das lamas nos solos, verificou-se uma redução do pH do solo, tanto maior quanto maior a quantidade incorporada. Os teores iniciais de P (5,12 no solo arenoso e 7 mg P/kg no calcário) e MO (0,28 no solo arenoso e 0,33% w/w no calcário) chegaram a aumentar quatro e nove vezes com a aplicação de lamas no solo arenoso e calcário, respetivamente. No entanto, o autor registou um aumento da concentração de metais nos solos analisados, principalmente de Pb, Cu) e Zn, sendo que a acumulação é mais evidente no solo calcário.

Bourioung *et al.* (2014) estudaram o efeito da aplicação de lamas em solo argiloso e verificou-se que os valores de pH do solo permaneceram aproximadamente iguais no solo de referência e nos solos onde foram aplicadas lamas. Relativamente aos nutrientes, observou-se uma maior diferença no teor de P no solo, que inicialmente era de 620 mg/kg e depois da introdução da quantidade máxima de lama conseguiu obter-se 2750 mg/kg, enquanto o teor de N passou de 1480 para 3330 mg/kg. Observou-se um aumento significativo do teor de Cu no solo, e uma ligeira diminuição da concentração de Pb no solo quando se procedia à aplicação da quantidade máxima de lamas no solo. Nos restantes metais pesados analisados não se verificou nenhuma alteração significativa, quer acrescentando 30 ou 60t lamas/ha.

Fang *et al.* (2016) referem uma redução de cerca de 2 mg/kg do teor de Pb quando se procede à aplicação de composto num solo franco-limoso, observando-se o mesmo comportamento aquando a análise da concentração de Ni. Os restantes metais pesados não demonstraram uma variação de concentração significativa, mantendo valores aproximadamente iguais antes e depois da incorporação do composto. Regista-se também uma pequena diminuição do pH do solo, de 7,35 para 6,91, e um aumento do Carbono Orgânico Total (TOC), de 18,4 para 24,6 g C/kg.

Lloret *et al.* (2016) procederam à comparação do solo sem aplicação de qualquer matéria, com um solo onde foi aplicado fertilizante e solos com dois tipos de lamas com tratamentos diferentes. Não se observou alterações relevantes de pH no solo; ao contrário do TOC do solo, que inicialmente era 7,2 g C/kg (valor que se manteve com a aplicação do fertilizante), mas aumentou para 8,4 e 9,2 g C/kg com a aplicação das lamas tratadas por digestão aeróbia e anaeróbia, respetivamente. Relativamente aos metais

pesados constatou-se, como esperado, que a aplicação de fertilizante não provoca a alteração dos valores iniciais apresentados pelo solo. Também com a aplicação das lamas, não houve alterações significativas nos teores de Ni e Pb, verificando-se no entanto aumentos significativos dos níveis de Cu e Zn e uma diminuição de cerca de 10 mg/kg do teor de Cr.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Amostragem

No âmbito deste trabalho, procedeu-se à amostragem de dois tipos de lamas: LDU da ETAR do Choupal (Coimbra) e LDI provenientes de uma indústria de reciclagem de plástico (designadas LRP).

5.1.1. Lamas urbanas da ETAR do Choupal

A ETAR do Choupal, Coimbra, tem capacidade nominal para tratar 36000 m³/dia de efluentes domésticos.

O tratamento da ETAR engloba tratamento preliminar, primário e secundário, e na depuração dos efluentes líquidos são formadas as lamas indicadas na Figura 5.1. No esquema pode observar-se os locais de amostragem, bem como a designação atribuída às amostras, em que LM designa lamas mistas, LD1e LD2 são as lamas dos digestores anaeróbios primário e secundário, respetivamente, e LE são as lamas estabilizadas.

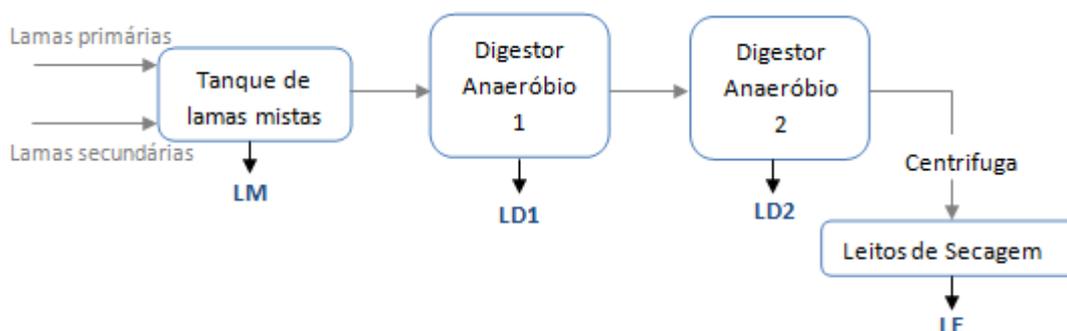


Figura 5.1. Locais de recolha das amostras de lama urbana estudada.

5.1.2. Lamas da reciclagem de plásticos

A amostragem deste tipo de lamas foi efetuada numa empresa de reciclagem de plástico proveniente de ecopontos e do desperdício plástico de produção industrial, possuindo um sistema de lavagem de materiais sujos. O efluente líquido resultante da lavagem das embalagens de plástico é tratado num decantador primário, onde é adicionado

anti-espuma. A lama deste sedimentador é desidratada por centrifugação e cerca de 1kg de amostra LRP foi recolhida à saída da centrífuga. A amostra foi mantida a 4 °C até análise.

5.2. Caracterização das amostras de lamas

A caracterização das lamas da ETAR do Choupal (LM, LD1, LD2 e LE) e da empresa recicladora de plástico (LRP) foi realizada nos laboratórios dos Departamentos de Engenharia Química e de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

5.2.1. Humidade e sólidos totais

A determinação da humidade (H) das amostras foi realizada utilizando cadinhos previamente secos na estufa a 105°C, durante 1 h , e arrefecidos no excicador. De seguida, colocou-se aproximadamente 25 g de amostra no cadinho ($m_{inicial}$) e secou-se na estufa a 105°C, durante 24 h. A massa seca foi registada (m_{seca}) e a humidade foi obtida através da Eq. (5.1).

$$H [\%] = \frac{m_{inicial} - m_{seca}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (5.1)$$

A quantidade de sólidos totais, ST , foi calculada pela Eq. (5.2).

$$ST [\%] = 100 - H [\%] \quad (5.2)$$

5.2.2. Sólidos voláteis e carbono orgânico total

Os sólidos voláteis (SV) foram determinados através da calcinação de amostras de massa conhecida, durante 2 h, numa mufla a 550°C. Após arrefecimento, a amostra foi novamente pesada para determinar a massa final ($m_{calcificada}$). A quantidade de SV foi obtida através da Eq. (5.3).

$$SV [\% ST] = \frac{m_{seca} - m_{calcificada}}{m_{seca}} \quad (5.3)$$

O carbono orgânico total (TOC) foi calculado com recurso ao teor de SV obtido experimentalmente, através da fórmula proposta por Petric *et al.* (2009), Eq. (5.4).

$$TOC [\%] = \frac{SV [\%]}{1,8} \quad (5.4)$$

5.2.3. pH

O pH das amostras foi medido através do medidor *Metrohm 691 pH Meter*. Nas amostras líquidas, o pH foi medido diretamente, mas nas amostras sólidas foi necessário preparar uma suspensão com razão L/S de 10 L/kg. Após agitação magnética durante 10 min, a suspensão permaneceu em repouso durante 10 min e o pH foi medido no sobrenadante.

5.2.4. Carência Química de Oxigênio

A carência química de oxigênio (CQO) foi determinada na parte líquida e na parte sólida da lama.

A determinação do CQO na fase líquida (CQO_L) requereu a diluição da amostra e a centrifugação durante 20 min a 3000 rpm (centrífuga Modelo 2655), seguida de filtração. De seguida foram preparados *vials* contendo 2,5 mL de amostra diluída 6 vezes no caso da amostra de LM, e diluída 3 vezes nas amostras de LD1 e LD2. Foi introduzido também 1,5 mL de solução de digestão e 3,5 mL de solução ácida.

Para determinar o CQO na fase sólida (CQO_S), procedeu-se à secagem das amostras na estufa a 105°C, durante 24 h. Pesou-se 2,5 mg de matéria seca e adicionou-se 0,4 mL de água destilada e 3,6 mL de solução de digestão e solução ácida.

Seguidamente, colocou-se os *vials* no termoreactor por 2 h a 150°C, deixando-se arrefecer depois à temperatura ambiente na ausência de luz, durante 1 h. A absorvância das amostras foi determinada num fotómetro a 620 nm. Estes passos do procedimento são idênticos para a fase sólida e líquida.

5.2.5. Fitotoxicidade

A determinação da fitotoxicidade das amostras requereu a, preparação de uma suspensão aquosa com razão L/S de 15, colocando 5 g de amostra em base seca e 75 mL de água destilada num agitador orbital durante 1 h. Este extrato foi centrifugado durante 20 min e o sobrenadante filtrado. De seguida, humedeceu-se um papel de filtro com 5 mL do

filtrado das amostras ou água destilada (no caso do teste de controlo), e colocou-se em caixas de petri, onde foram também introduzidas 10 sementes de *Lepidium Sativium*. As caixas foram colocadas na estufa a 27 °C, durante 48 h. No final, observou-se o número de sementes que germinaram, medindo-se o comprimento das raízes com recurso a um paquímetro. Desta forma, procedeu-se ao cálculo do Índice de Germinação (GI) para cada tipologia de lamas, através da Eq. (5.4):

$$GI [\%] = \frac{\% G \times \% L}{100} \quad (5.4)$$

onde G é determinado através da Eq. (5.5) e representa a percentagem da média das sementes germinadas (G_t) em relação ao branco (G_c), e L representa o comprimento médio das raízes (L_t) face ao valor do branco (L_c), segundo a Eq. (5.6).

$$\% G = \frac{G_t}{G_c} \times 100 \quad (5.5)$$

$$\% L = \frac{L_t}{L_c} \times 100 \quad (5.6)$$

5.2.6. Poder calorífico superior

A medição do poder calorífico superior (PCS) foi apenas realizada para a amostra LRP. Esta determinação foi realizada no equipamento *Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter*, mostrada na Figura 5.2.

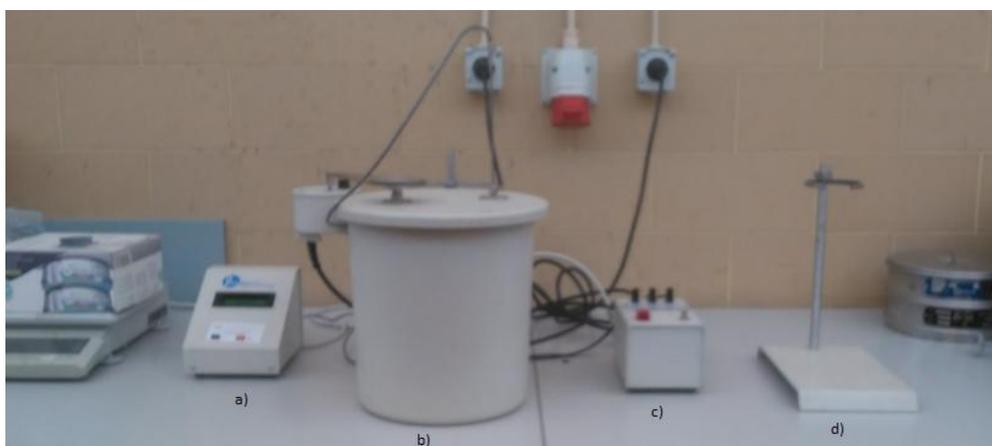


Figura 5.2. Equipamento utilizado na determinação do PCS. a) *termómetro digital Parr Model 67*; b) *Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter*; c) *Parr 2901 EE ignition Unit 230/50/60*; d) suporte do cadinho.

A determinação do PCS requer que se coloque $2000 \pm 0,5$ g de água destilada no recipiente do calorímetro. Para analisar a amostra é necessário formar uma pastilha, com aproximadamente 1 g de amostra de LRP, colocando-a depois no cadinho. De seguida, cortou-se 10 cm de fio de ignição e colocou-se no suporte do cadinho, com o auxílio de uma pinça de modo a ficar em contato com a pastilha e a não contatar com as paredes do cadinho. Colocou-se o suporte do cadinho dentro da bomba calorimétrica e, depois de fechada, pressurizou-se a 25 bar com O_2 , colocando-a depois dentro do recipiente do calorímetro, ficando assim submersa na água destilada. Ligou-se os cabos elétricos do sistema de ignição, o agitador e o termómetro e esperou-se 5 min para a temperatura da água estabilizar, medindo-se a temperatura a partir desse momento em intervalos de 1 min até aos 10 min. Nesse instante fez-se a ignição da amostra, que acontece por efeito de Joule do fio de ignição, devido a uma descarga elétrica gerada pelo equipamento *Parr EE Ignition Unit 230/50/60*. A ignição da amostra provoca a sua combustão e o calor libertado é transmitido à água pela parede da bomba calorimétrica totalmente imersa. Os registos de temperatura foram efetuados de forma metódica até se verificar uma estabilização da temperatura. Após essa estabilização, parou-se a medição da temperatura e registou-se a quantidade de fio que ficou por queimar.

O PCS foi calculado pela Eq. (5.8):

$$PCS \left[\frac{kJ}{kg} \right] = \left(\frac{T \times W - e_1 - e_2 - e_3}{m} \right) \times 4,1868 \quad (5.8)$$

onde m representa a massa da pastilha utilizada na reação, T refere o aumento de temperatura devido à reação (calculado conforme representado na Eq. (5.9)), W é a capacidade calorífica da bomba, determinada na calibração da bomba através da aplicação do procedimento de determinação do PCS a uma pastilha de ácido benzoico (cujo PCS é conhecido), os coeficientes e_1 , e_2 e e_3 representam correções, respetivamente, para o calor de formação do ácido nítrico, calor de formação do ácido sulfúrico e para o calor de combustão do fio de ignição consumido aquando a reação. No entanto, na realização deste trabalho, apenas foi considerado o coeficiente e_3 , uma vez que o equipamento utilizado não permite a recuperação do ácido nítrico e sulfúrico que se pudesse formar.

$$T = T_c - T_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (5.9)$$

Para calcular T é necessário conhecer os valores de a , b e c que representam, respetivamente, o momento em que ocorre a ignição da amostra, o momento em que a temperatura atinge 60% do aumento total e o momento em que começa a ocorrer a estabilização da temperatura; T_a e T_c representam a temperatura registada nos momentos a e c ; já r_1 e r_2 representam a taxa a que a temperatura evolui nos primeiros e últimos 5 minutos do ensaio. A Figura 5.3 consta no Manual de Instruções do Calorímetro e representa uma curva típica do comportamento da temperatura em função do tempo nesta experimentação.

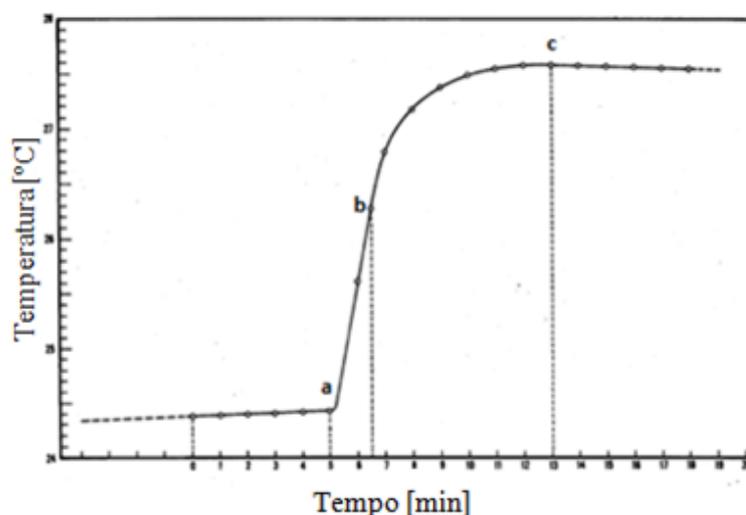


Figura 5.3. Evolução típica da temperatura em função da temperatura.

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, começa-se por se analisar o sistema de gestão de lamas da Bioenergias, consultando dados relativos a alguns terrenos agrícolas onde se pretende aplicar as lamas recebidas na unidade, bem como as características dessas lamas. Estes dados foram resultado de análises encomendadas pela Bioenergias a entidades externas.

De seguida, procede-se à apresentação de discussão dos resultados obtidos na caracterização dos dois tipos de lamas referidos na metodologia: LDU proveniente da ETAR do Choupal e LDI resultante do processo de uma indústria recicladora de plástico. Por fim, indicam-se alguns pontos de melhoria ao sistema de gestão da Bioenergias.

6.1. Análise do sistema de gestão de lamas na Bioenergias

No âmbito da gestão de lamas, a Bioenergias realiza várias tarefas de modo a encontrar a solução mais adequada para este subproduto. Uma das fases essenciais é a análise dos solos que potencialmente podem receber lamas. De modo a perceber a metodologia utilizada, foram compilados os resultados de análises efetuadas a terrenos onde se pretende aplicar lamas representados na Tabela 6.1.

Estudou-se solos de explorações agrícolas (identificadas por E) que desenvolvem diferentes culturas, de forma a perceber o tipo de carências em função da cultura sustentada.

Cada exploração foi estudada recolhendo várias amostras representativas do solo, conforme referido no capítulo anterior, pelo que são apresentadas gamas de valores para cada uma.

Tabela 6.1. Caraterização de terrenos de cultivo.

Exploração		E1	E2	E3	E4	E5
Localização		Tentúgal	Carvide	Covilhã	Caria	Malpica do Tejo
Cultura		Milho	Milho	Macieira	Pessegueiro	Prado de Sequeiro
Produção esperada [t/ha]		60	60	n.d.	n.d.	4
Área total da exploração [ha]		24,5	11,1	54,3	8,4	172,7
Textura	Areias (>63 μ m) [%]	n.d.	58,2-86,9	85,1-87,3	84,8-85	80,8-83,1
	Limos (2-63 μ m) [%]	n.d.	5,6-11	8,5-10,3	13,4-13,7	14,4-16,6
	Argilas (<2 μ m) [%]	n.d.	7,4-31	3,9-4,7	1,48-1,51	2,43-2,52
Parâmetros Físicos	ST [%]	72-78	n.d.	n.d.	89,9-91,2	88,5-93,3
	SV [% ST]	3,4-3,8	<1-2,5	<1-1,2	1,44-1,66	1,59-2,89
	pH	5,2-5,7	5,6-7,4	6-6,6	5,7-5,8	5,5-6
Metais Pesados	Cd [mg/kg ST]	<0,2	<0,7	<0,7-<1,3	<0,4	<0,4
	Cu [mg/kg ST]	8-9	<6,7-10	<6,7-<13	5,8-6,2	6,8-60,3
	Ni [mg/kg ST]	10	<6,7-12	<6,7-<13	4,1-4,8	9,5-9,6
	Pb [mg/kg ST]	17-19	<6,7-9,1	11-15	8,8-12,1	10,1-12,8
	Zn [mg/kg ST]	67-70	<13-37	31-44	61,6-70,8	18,2-56,7
	Hg [mg/kg ST]	0,090-0,093	<0,02-0,04	<0,02	<0,2	<0,2
	Cr [mg/kg ST]	16-19	<6,7-20	<6,7-13	6,88-7,73	12-12,9
Elementos	N [mg/kg ST]	0,7-0,9	<0,01	<0,01-0,05	<0,01	<0,01
	P [mg/kg ST]	320-380	<21-39	<21	20	<10

n.d. (não determinado)

Considerando o diagrama exposto na Figura 2.3, concluiu-se que o solo E2 é o que tem uma textura mais variável, possuindo solos franco-argilo-arenosos e arenoso-francos. A textura dos solos de E3 e E4 é arenosa-franca, enquanto E5 é franco-arenosa.

Relativamente aos parâmetros físicos, os solos E4 e E5 apresentam valores elevados de ST, o que revela a existência de solos com teor de humidade baixos. Os SV, sendo um indicador da MO do solo, mostram que E2 a E5 apresentam valores muito baixos neste indicador. A MO do solo E1 é bastante aceitável para uma produção agrícola.

Todas as explorações possuem valores de pH dentro do intervalo de valores definido como favoráveis para cada cultura em INIAP (2006), com exceção de E4, que possui valores inferiores aos de referência, conforme representado no Anexo C.

Estas análises aos solos agrícolas têm um papel essencial para que se possa detetar as suas carências, que podem ser causadas pelas suas características ou por práticas agrícolas inadequadas. Para mitigar essas carências, pode proceder-se à adição de material fertilizante ou corretivo, adicionando as substâncias necessárias para melhorar a capacidade do solo, de modo a sustentar uma plantação saudável. Considerando o valor

fertilizante das lamas, devido aos teores de nutrientes e matéria orgânica que têm na sua composição, estas apresentam-se como uma ótima opção para colmatar os défices de fertilização de alguns solos.

Tal como anteriormente referido, a Bioenergias gere várias tipologias de lamas, procedendo à análise das mesmas, conforme requerido no Decreto-lei nº 276/2009, com a finalidade de se verificar se reúnem as características necessárias para poderem ser aplicadas em solos agrícolas. Além disso, é imprescindível verificar as quantidades dos nutrientes fertilizantes presentes nas lamas, nomeadamente o N, P e K, para que se possa calcular a quantidade a incorporar no solo, de modo a satisfazer as exigências das culturas. Desta forma, mostra-se na Tabela 6.2 a caracterização de lamas recebidas na unidade da Bioenergias, classificadas com código LER que lhes permite sofrer valorização agrícola (190805 e 030311).

Tabela 6.2. Caracterização de lamas recebidas na Bioenergias passíveis de sofrer valorização agrícola.

Caraterização		Código 190805		Código 030311		V.L.
		LDU1	LDU2	LC1	LC2	
Parâmetros	ST [%]	36	15	12	29	
Físicos	SV [% ST]	93,1	71	80	67	
	pH	6,6	8,6	7	8,3	
Metais Pesados	Cd [mg/kg ST]	< 5	< 20	0,78	0,75	20
	Cu [mg/kg ST]	290	466	13	13	1000
	Ni [mg/kg ST]	< 20	< 100	32	7,5	300
	Pb [mg/kg ST]	< 20	< 80	24	24	750
	Zn [mg/kg ST]	1900	1410	73	51	2500
	Hg [mg/kg ST]	0,6	0,85	0,31	0,64	16
	Cr [mg/kg ST]	38	< 100	67	84	1000
Compostos Orgânicos	LAS [mg/kg ST]	< 50	2300	< 950	< 13	5000
	NPE [mg/kg ST]	< 40	68	< 25	1,1	450
	PAH [mg/kg ST]	0,54	1,54	< 5,4	0,74	5
	PCB [mg/kg ST]	< 0,21	< 0,021	< 0,7	0,8	0,8
	PCDD/ PCDF [ng TEQ/kg ST]	n.d.	0,0072	< 72	< 10	100
Microrganismos Patogénicos	<i>Escherichia coli</i> [células/g]	< 10	< 10	< 10	< 10	< 1000
	<i>Salmonella spp</i> [ausente em 50g]	Ausente	Ausente.	Ausente	Ausente	Ausente
Elementos	N [mg/kg ST]	34000	56800	43000	28200	
	P [mg/kg ST]	5900	15000	1200	6000	
	K [mg/kg ST]	1200	3210	2900	2020	

V.L.(Valores Limite estabelecidos no Decreto-lei nº 276/2009)

A caracterização das lamas LDU1, LDU2, LC1 e LC2 mostra que para o mesmo código LER, as lamas podem ser bastante diferentes, consoante a sua origem.

As lamas classificadas com o código LER 190805 são referentes à depuração de efluentes urbanos (LDU), produzidas em duas ETAR da zona centro do país. No entanto LDU1 apresentam um teor de ST superior (mais do dobro), ou seja, um teor de humidade menor relativamente a LDU2, devendo ter sido sujeitas a um processo de desidratação mais eficaz do que as lamas LDU2. O pH e SV são também bastante distintos, evidenciando terem resultado de tratamentos muito distintos nas instalações onde foram produzidas. Em relação às lamas celulósicas (LC), referenciadas com o código 030311, sendo provenientes de instalações distintas, a situação é análoga.

Na generalidade, as lamas possuem teores elevados de SV que, sendo um indicador de MO, mostra que a sua aplicação nos solos pode ser bastante vantajosa para a melhorar as condições de cultivo.

Relativamente à concentração de metais pesados e compostos orgânicos, há pequenas diferenças nos valores, mas todas cumprem os valores-limite estipulados no Decreto-lei nº 276/2009, o mesmo se verificando em relação aos microrganismos patogénicos. As lamas LDU1 e LDU2 cumprem têm teores elevados de Zn e Cu, mas ainda assim sem comprometer a possibilidade de aplicação nos solos.

A quantidade de N, P e K em cada lama, juntamente com os teores observados nas explorações, permite o cálculo da quantidade de lamas a aplicar, como referido na secção 2.3.5. Na Tabela 6.3 é indicada a quantidade de lamas que cada exploração pode receber. Para se efetuar estes cálculos, recorreu-se à fertilização recomendada em INIAP (2006), apresentadas no Anexo C do presente documento.

Tabela 6.3. Quantidade de cada lama (em t) estudada a aplicar a cada exploração (E1 a E5).

Lamas	Exploração				
	E1	E2	E3	E4	E5
LDU1	250	114	2305	793	353
LDU2	359	163	2176	748	507
LC1	593	270	34000	11694	837
LC2	374	170	2814	968	528

Nas explorações E1, E2 e E5, o fator que limita a quantidade de lamas a aplicar é o N, sendo necessário proceder a fertilização adicional para suprir as necessidades de P e K. Já em E3 e E4 relativas a culturas de macieira e pessegueiro, respetivamente, e o plano

de fertilização apenas contempla os teores de P e K, não estabelecendo requisitos de N. Nestes casos, o fator limitante é o P, necessitando de fertilização específica para atingir os valores requeridos de K. Este estudo das quantidades a aplicar em cada terreno em função das lamas disponíveis na unidade não é feito, sendo a lama aplicada selecionada casuisticamente. A aplicação dos cálculos a todas as lamas disponíveis, e não apenas a uma escolhida ao acaso, permite comparar as quantidades a aplicar e gerir uma maior quantidade de lamas de uma só vez, otimizando o processo de armazenamento na unidade da Bioenergias.

Avaliou-se também as características de três tipos de LDI classificadas com códigos LER não referidos no Decreto-lei nº 276/2009, logo para as quais não é passível a valorização na agricultura (190812 e 020204), conforme apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4. Caracterização de lamas recebidas na Bioenergias que não podem sofrer valorização agrícola.

Caraterização		Código 020204	Código 190812	
		LDI1	LDI2	LRP
Parâmetros agronómicos	ST [%]	46	17,2	35,5
	SV [% ST]	96	70,6	25
	pH	5,6	7,6	11,6
	N[mg/kg ST]	23800	67500	0,96
	P [mg/kg ST]	4500	8720	3100
	K [mg/kg ST]	300	1850	5000
Metais Pesados	Cd [mg/kg ST]	0,17	2,02	1,8
	Cu [mg/kg ST]	24	366	160
	Ni [mg/kg ST]	11	25,8	55
	Pb [mg/kg ST]	< 2	34,1	79
	Zn [mg/kg ST]	240	724	340
	Hg [mg/kg ST]	< 0,07	8,67	1,2
	Cr [mg/kg ST]	25	53,1	100
Compostos Orgânicos	LAS [mg/kg ST]	n.d.	n.d.	n.d.
	NPE [mg/kg ST]	n.d.	n.d.	n.d.
	PAH [mg/kg S]	n.d.	n.d.	n.d.
	PCB [mg/kg ST]	n.d.	n.d.	n.d.
	PCDD/ PCDF [ng TEQ/kg ST]	n.d.	n.d.	n.d.
Microrganismos patogénicos	<i>Escherichia coli</i> [células/g matéria fresca]	< 10	< 10	< 10
	<i>Salmonella spp</i> [ausente em 50 g de material original]	Ausente	Ausente	Ausente

LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares); NPE (nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados); PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos); PCB (compostos bifenilos policlorados); PCDD (policlorodibenzodioxinas); PCDF (policlorodibenzofuranos); n.d. (não determinado).

As lamas apresentadas são provenientes de indústrias distintas: as LDI1 são provenientes de indústria de processamento de produtos alimentares de origem animal, LDI2 são lamas do tratamento biológico de águas residuais industriais e LRP são resultantes da indústria de reciclagem de plástico. A lama LDI2 possui um teor de ST inferior às restantes, possuindo assim um elevado teor de humidade. As LRP destacam-se por possuir um pH muito básico e um teor de N bastante inferior aos valores observados em todas as lamas consideradas neste estudo.

Os teores de metais pesados, compostos orgânicos e microrganismos patogénicos nestas lamas não estão sujeitos aos valores-limite estabelecidos no Decreto-lei nº 276/2009. Não sendo obrigatório o conhecimento destes parâmetros, pode ser importante conhecer a sua concentração para a tomada de decisão do destino a atribuir a estas lamas. O teor de metais pesados, por exemplo, pode ser um fator a considerar na deposição em aterro.

Tal como foi referido no Capítulo 3, atualmente estas lamas são encaminhadas para uma empresa que as trata por compostagem. Observando as características de LDI1 e LDI2, constatou-se que estas possuem propriedades que podem influenciar positivamente o processo de compostagem, nomeadamente o elevado teor de MO e nutrientes (N, P e K) que apresentam. As lamas LRP possuem baixo teor de MO e pH muito elevado, o que dificultará o seu processamento por compostagem.

6.2. Caracterização de LDU do Choupal e LRP

Para gerir adequadamente as lamas, é necessário conhecer as suas características. No âmbito deste estudo, procedeu-se à recolha de LDU geradas na ETAR do Choupal, que genericamente podem ser valorizadas na agricultura. Na ETAR do Choupal, recolheram-se amostras em diferentes locais das linhas de tratamento, como representado no capítulo anterior na Figura 5.1. A caracterização das amostras recolhidas teve como objetivo observar a evolução das características das lamas ao longo do processo de tratamento, de forma a destacar a importância de um tratamento adequado quando o destino final é a aplicação direta em solos agrícolas.

As LDI escolhidas foram originadas numa indústria recicladora de plástico. Estas lamas representam a maior fração das lamas recebidas pela Bioenergias que não podem ter valorização agrícola, conforme verificado na secção 3.1 do presente relatório. Além disso, as características de LRP referidas no sub- capítulo anterior, demonstram que o

destino final atualmente atribuído a estas lamas (a compostagem) pode não ser o mais indicado.

6.2.1. Caracterização física e química

Na Tabela 6.5 encontram-se os resultados da caracterização física e química efetuada às lamas obtidas no processo de tratamento da ETAR do Choupal referidas na seção 5.1.1, por lamas mistas (LM), lamas do digestor primário e secundário (LD1 e LD2) e lamas estabilizadas (LE), bem como as lamas industriais LRP.

Tabela 6.5. Características físicas e químicas de LDU e LDI

Parâmetros	LDU (ETAR do Choupal)				LDI
	LM	LD1	LD2	LE	LRP
pH	5,76±0,15	6,79±0,07	7,19±0,55	7,29±0,19	11,92±0,12
ST [%]	6,6±1,5	1,5±0,3	3,6±0,7	24,3±1,6	33,9±0,9
SV [% ST]	78,3±4,7	68,5±0,6	67,4±1,5	66,2±1,9	36,9±0,7
TOC [% SV]	43,5±2,6	38,1±0,3	37,5±0,8	36,8±1,1	20,5±0,4
CQO _L [mg O ₂ /L]	4147±443	1143±46	936±14	-	-
CQO _S [g O ₂ /kg]	1277±52	1087±63	1032±30	988±42	597±46

n.d. (não determinado)

Na ETAR do Choupal há um aumento do pH das lamas geradas nas sucessivas etapas do processo de tratamento. Inicialmente, LM apresenta um pH de 5,76, aumentando para 6,79 e 7,19 no digestor primário e secundário, respetivamente. Pires (2015) indica intervalos de pH típicos de 5,2 a 6,3 para o digestor primário e de 6,7 a 7,5 para o digestor secundário. O valor determinado para LD1 encontra-se portanto ligeiramente acima do intervalo de pH sugerido para o digestor primário, pelo que seria necessário acidificar um pouco o pH do digestor para que a hidrólise e acidogénese ocorra de forma eficaz. Já LE apresenta um pH de 7,29, valor que vai ao encontro aos determinados em estudos semelhantes, como Alvarenga *et al.* (2015), onde são obtidos valores de 7,1 e 7,4 para lamas estabilizadas.

A percentagem de ST nas LM é 6,6% e encontrando-se dentro da gama indicada por Tchoubanoglous *et al.* (2014), de 3 a 9%. Este valor diminui para 1,5% durante o primeiro estágio da digestão anaeróbia, e no segundo estágio do processo determinou-se 3,6% de ST, estando concordantes com o intervalo de 2 a 4% referido por Tchoubanoglous *et al.* (2014) para as lamas mistas digeridas anaerobiamente. Nas LE,

sendo desidratadas e armazenadas em leitos de secagem, possuem maior concentração de ST, observando-se 24,3% de ST, valor concordante com o intervalo de 22 a 35% ST para lamas desidratadas com recurso a centrífuga, sugerido por Tchoubanoglous *et al.* (2014).

Relativamente aos SV, determinou-se 78,3% em LM, encontrando-se este valor no intervalo indicado na literatura de 60 a 85% (Tchoubanoglous *et al.*, 2014). Durante o processo de estabilização da lama, parte da matéria orgânica da lama é degradada, o que se traduz na diminuição do teor de SV nos dois estágios do processo de digestão anaeróbia. Assim, LD1 apresenta 68,5% e 67,4% para LD2. Na amostra LE obteve-se 66,2%, estimando-se uma redução total de 16% de SV ao longo do processo de tratamento. Um dos objetivos do tratamento de lamas é atingir entre 40 a 50% de redução da MO (Andriamirado *et al.*, 2007), valor que não é atingido no presente caso.

O teor de TOC nas amostras foi estimado através dos SV das amostras estudadas, com base na metodologia sugerida por Petric *et al.* (2009), pelo que este parâmetro revela o mesmo comportamento verificado relativamente a SV, demonstrando uma diminuição ao longo do processo de tratamento.

A carência química de oxigénio (CQO) é um parâmetro indicativo da quantidade de oxigénio que é consumida para que possa haver oxidação química da MO presente na amostra representando, tal como SV, a quantidade de MO na amostra estudada. No presente estudo, a CQO foi determinada na fase líquida e sólida das amostras de lamas. De modo geral, também neste caso se verificou-se uma diminuição do teor de CQO ao longo do processo de tratamento, o que indica que ocorreu degradação da MO das amostras e que a sua estabilização ocorre de modo progressivo.

Relativamente à CQO_L, durante o processo de estabilização no digestor primário houve uma redução de aproximadamente 72% e no digestor secundário de 5%, obtendo-se uma remoção total de 77%. Já no caso do CQO_S, a diminuição foi menos acentuada do que na fase líquida, determinando-se uma remoção total de aproximadamente 23%, o que significa que a MO existente na fração líquida será a principal fonte de MO para a produção do biogás. Foi no digestor primário que se verificou uma maior redução do CQO_S, de aproximadamente 15%, enquanto no digestor secundário e nos leitos de estabilização houve remoção de apenas 4% em cada.

Relativamente ao estudo de LDI, escolheu-se o estudo das lamas LRP por se entender, face à sua proveniência (lavagem de plásticos), poder apresentar um poder calorífico elevado, capaz de justificar o seu encaminhamento para valorização energética (incineração ou co-incineração).

A sua caracterização mostrou um pH de 11,92 para LRP, um valor muito elevado devido, provavelmente, à lavagem de muitos materiais que armazenavam substâncias muito básicas como, por exemplo, lixívia e detergentes.

O teor de ST destas lamas foi de 33,9%, o que revela uma lama com baixa humidade, ou seja, o processo de desidratação foi eficiente.

Contrariamente às lamas de ETAR, os SV são neste caso apenas 36,9% uma percentagem baixa, indicadora do baixo teor em MO de LRP. O valor obtido é, no entanto, maior do que o constante no boletim de análise pedido pela empresa (25%), o que pode traduzir alguma variabilidade nas características de LRP.

O valor de CQO_S é baixo (597 g O_2 /kg) e está em consonância com a percentagem de SV determinada, traduzindo ambas a baixa quantidade de MO de LRP. Não foi determinado CQO_L devido ao baixo teor de humidade apresentado pela lama.

6.2.2. Fitotoxicidade

Para além da contaminação microbiológica não analisada neste estudo, as lamas podem conter substâncias que inibem o crescimento de plantas, não sendo nesses casos indicadas a sua incorporação no solo. Assim, de modo a verificar a qualidade biológica das lamas em análise, procedeu-se à verificação da sua fitotoxicidade. Este método permite avaliar a existência de compostos fitotóxicos na amostra que possam inibir a germinação e o crescimento de plantas no meio onde se encontram, não identificando contudo que compostos específicos estão presentes na amostra (Trautmann e Krasny, 1997). Neste estudo foram utilizadas sementes de *Lepidium Sativum*, de modo a calcular o seu Índice de Germinação (GI), relacionando depois essa característica com a toxicidade da amostra, como se indica na Tabela 6.6.

Tabela 6.6. Relação entre o Índice de germinação (GI) calculado e a classificação dada à amostra (adaptado de Trautmann e Krasny, 1997).

GI [%]	Classificação	Ref.
< 40	Forte inibição do crescimento da raiz das plantas	Trautmann e Krasny, 2009
40-60	Inibição do crescimento da raiz das plantas	
60-80	Moderada inibição do crescimento da raiz das plantas	
80-100	Promoção da germinação e crescimento da raiz da planta	

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia descrita em 5.2.5 para LDU do Choupal e para LRP encontram-se representados na Figura 6.1.

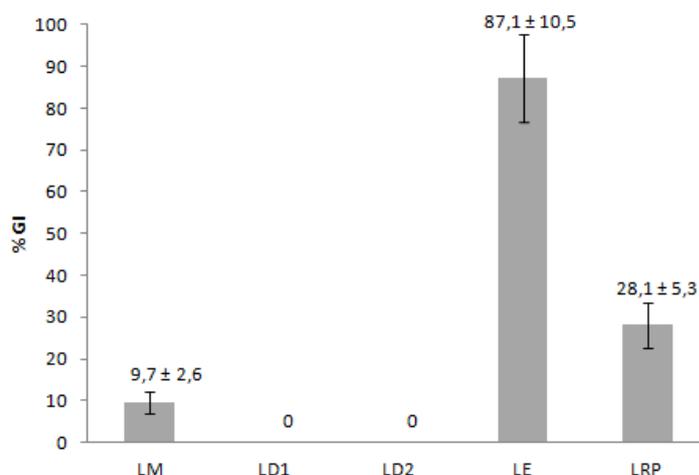


Figura 6.1. Fitotoxicidade das amostras estudadas.

Relativamente às LDU do Choupal, verifica-se que LE apresenta um GI de 87,1% o que significa que a aplicação desta lama promove a germinação das culturas. Pelo contrário, as lamas LM, LD1 e LD2 apresentam um GI que as classifica como fortemente inibidoras do crescimento das raízes. Este procedimento laboratorial permitiu confirmar a importância de um tratamento adequado às lamas que se pretendam aplicar em solos agrícolas, de modo a que estas não apresentem nenhum perigo ou impedimento ao desenvolvimento das culturas.

A elevada fitotoxicidade das LRP, que possuem um GI de 28,1%, revela forte inibição de germinação. Apesar destas lamas não poderem ser valorizadas diretamente no solo agrícola, este parâmetro reforça a incapacidade destas lamas serem uma mais valia na fertilização dos solos.

6.2.3. Caracterização térmica de LRP

A amostra de LRP apresentava elevada heterogeneidade nas dimensões e tipos de partículas, distinguindo-se sólidos muito finos e frações de plástico e matéria celulósica, mais grossa, proveniente das embalagens plásticas tratadas. Assim, devido à possibilidade de apresentarem propriedades muito distintas, houve necessidade de proceder à moagem da amostra e separação da fração mais fina (LRP_f) da grosseira (LRP_g) que compõem a amostra LRP, com recurso a um peneiro de 43 μ m. Esta separação da amostra foi realizada em base seca, e o resultado desta separação encontra-se na Figura 6.2.



Figura 6.2. Fração fina (LRP_f) e grosseira (LRP_g) da amostra LRP.

Determinou-se estudou-se as duas frações de modo separado, calculando-se a percentagem de cada fração da amostra de LRP, bem como a quantidade de SV, TOC e PCS, obtendo-se os resultados representados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7. Caraterização da amostra de LRP.

	Fração [%]	SV [% ST]	TOC [% SV]	PCS [kJ/kg ST]
LRP	-	$37 \pm 0,7$	$20.54 \pm 0,39$	8464 ± 406
LRP_f	$41,8 \pm 0,9$	30,9	17,2	5551 ± 266
LRP_g	$58,2 \pm 0,9$	45,3	25,2	12157 ± 816

Verificou-se que LRP é composta maioritariamente por sólidos grosseiros (cerca de 58% w/w), apresentando estes um teor de SV superior (45,3%) ao determinado para a fração fina da amostra (30,9%). Em LRP, o valor determinado por experimentação foi 37%, valor próximo do obtido quando calculado a partir das frações (39,2%). O TOC, sendo calculado a partir da percentagem de SV nas amostras, é também superior na fração grosseira da amostra de LRP, indicando que esta fração possui um teor de carbono superior.

O PCS representa a energia libertada sob a forma de calor, incluindo a energia de mudança de fase da água formada quando um material é sujeito a um processo de combustão, na presença de O_2 . Durante a combustão, ocorrem reações que oxidam o carbono e o hidrogénio a CO_2 e H_2O . Verificou-se que o PCS de LRP_f (5551 kJ/kg) é menos de metade do valor obtido para a fração grosseira da amostra (12156 kJ/kg), o que era expectável, considerando que o TOC e SV desta fração eram mais elevados relativamente à fração fina. Além disso, nesta fração era visível a presença de material

celulósico e fragmentos plásticos, que sendo derivados do petróleo, possuem um elevado valor energético. Quanto ao PCS de LRP, obteve-se experimentalmente 8464 kJ/kg, valor inferior ao obtido considerando as frações da amostra (9396 kJ/kg). Este valor encontra-se representado na Tabela 6.8, para efeitos de comparação com materiais combustíveis frequentemente utilizados e de lamas de diferentes origens.

Tabela 6.8. PCS da amostra de LRP e comparação com outras tipologias de lamas e materiais combustíveis.

Ref.	Lamas	PCS [kJ/kg ST]	Combustíveis	PCS [kJ/kg]*
Neste estudo	LRP	8464 ± 406	Petróleo	45217
	LRP _f	5551 ± 266	Gás Natural	43124
	LRP _g	12157 ± 816	Gasóleo	41868
Araújo, 2014	LDU	21046	Carvão	29308
	LC	22906	Madeira	18841

* Brito *et al.* (2010)

Comparando os valores da tabela apresentada, conclui-se que o valor de PCS obtido para a amostra de LRP é muito baixo quando comparado com os valores apresentados pelos combustíveis mais frequentemente utilizados, como sejam o petróleo e o gás natural. O valor obtido é ainda muito inferior aos valores apresentados por lamas urbanas e celulósicas estudadas por Araújo (2014), o que permite concluir que LRP não é adequado para valorização energética. No entanto, o valor determinado para a fração grosseira da amostra, LRP_g é da mesma ordem de grandeza que o PCS da madeira.

Desta forma, pode sugerir-se que esta fração da amostra seja valorizada procedendo-se à secagem e crivagem do material, seguindo a fração grosseira para valorização energética e a fração fina para aterro.

6.3. Propostas de melhoria no modelo de gestão de lamas da Bioenergias

Após análise do modelo de gestão de lamas implementado na Bioenergias, apresentam-se algumas propostas de melhoria, apresentadas na Figura 6.3, tendo por comparação o modelo de gestão esquematizado na Figura 3.1.

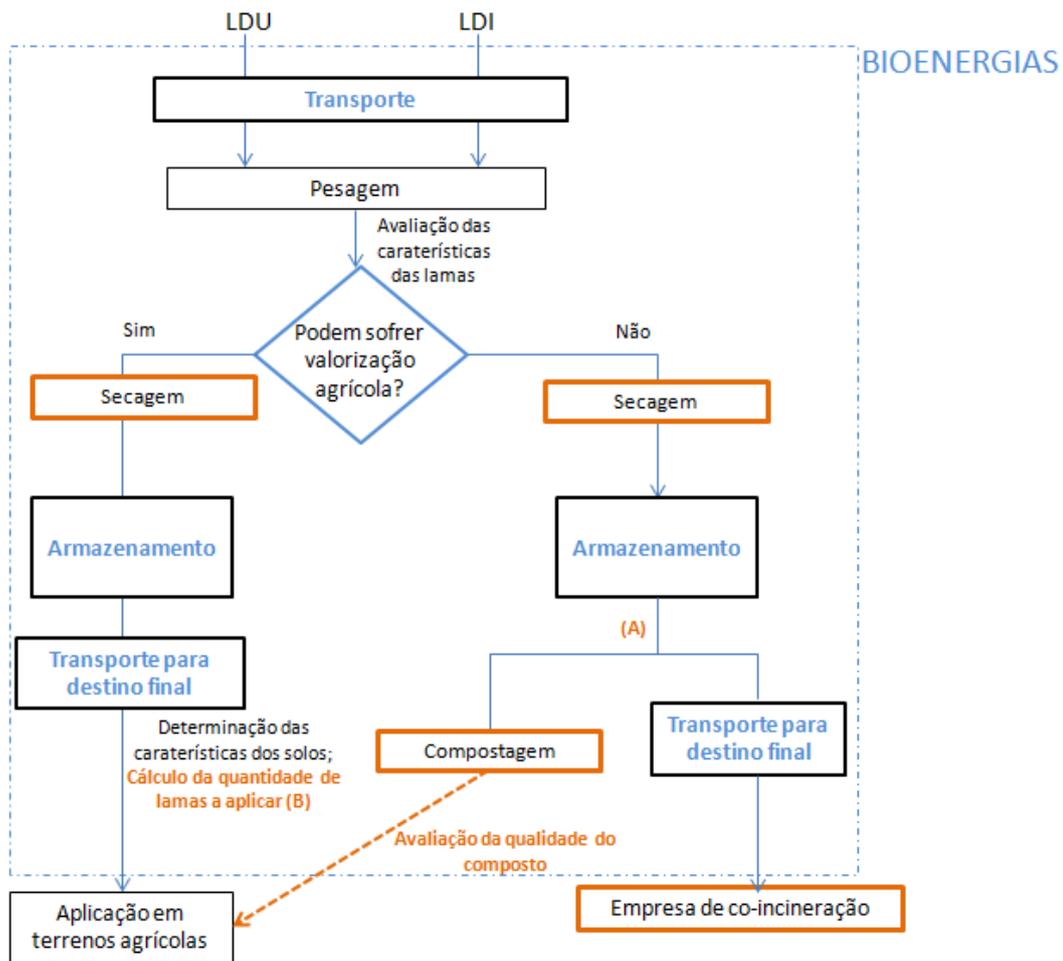


Figura 6.3. Proposta de sistema de gestão de lamas a implementar na Bioenergies.

(Obs.: As propostas de melhoria encontram-se assinaladas a laranja)

Através da análise da Tabela 6.2 e Tabela 6.4, contactou-se que as lamas recebidas na Bioenergies possuem um teor de humidade muito elevado. A humidade das lamas é um parâmetro que depende do tratamento efetuado na instalação produtora, não dependendo da ação da Bioenergies; no entanto constitui um problema na gestão de lamas. O elevado teor de humidade faz com que estas ocupem um maior volume, o que põe em causa a capacidade de armazenamento, uma vez que há períodos em que as lamas não podem ser aplicadas, acrescentando ainda a libertação de odores mais intensos. Verificou-se assim que a colocação de estufas para aumentar a desidratação de lamas não é suficiente, uma vez que nem sempre há condições naturais que promovam uma desidratação eficaz, sendo por isso necessário considerar outras soluções. Pode otimizar-se o sistema de drenagem nas baias de armazenamento, promovendo a escorrência das águas para um tanque de lixiviados. Mas, para se proceder a uma desidratação mais eficaz, a melhor

opção é a instalação de uma unidade de secagem na Bioenergias. A redução do teor de humidade das lamas seria feita por evaporação da água, utilizando um sistema que promovesse um gradiente de temperatura entre a lama e o ambiente envolvente. Há várias tecnologias que permitem a criação desde gradiente de temperatura, envolvendo a transferência direta, indireta ou mista de calor. Esta alternativa implica alguns custos de instalação, manutenção e energéticos, pelo que se deve proceder a um estudo aprofundado das tecnologias disponíveis, considerando a qualidade, o custo e as quantidades e propriedades das lamas a secar.

Ainda relativamente à gestão de lamas que podem sofrer valorização agrícola, sugere-se que a seleção da lama a aplicar seja feita de forma menos casuística, procedendo-se ao cálculo da quantidade a aplicar para todas as lamas disponíveis na unidade, de modo a determinar qual a que permite o envio da maior quantidade para a exploração agrícola. Desta forma evitam-se custos de transporte de pequenas quantidades de lamas e ganha-se maior capacidade de armazenamento da unidade de receção na Bioenergias. Esta proposta de melhoria encontra-se representada na Figura 6.3 com (B).

Considerando também a quantidade de lamas recebidas na Bioenergias que não podem sofrer valorização agrícola (cerca de 19%), e tendo em conta a necessidade de transporte dessas lamas para outra empresa de gestão, dever-se-á investigar a possibilidade de instalação de um sistema de compostagem na Bioenergias. São assim evitados custos de transporte até essa empresa, dando à Bioenergias maior controle sobre o tratamento e destino das lamas. Após a devida estabilização das lamas, o composto resultante poderá ser aplicado em solos como condicionador, devido ao elevado teor de MO.

Atualmente, todas as lamas recebidas que não podem ser valorizadas na agricultura seguem para compostagem, no entanto observa-se que existem algumas cujas características não são as mais adequadas para este processo, como a amostra LRP estudada, que revelou um valor de PCS relativamente elevado na fração grosseira. É então sugerido que se proceda a um estudo mais aprofundado das características genéricas das lamas recebidas que não podem ser valorizadas na agricultura, de forma a perceber o seu potencial de valorização, atribuindo-lhes um destino final mais adequado (proposta assinalada na Figura 6.3 por (A)).

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O principal objetivo deste trabalho de dissertação foi a análise do sistema de gestão de lamas da Bioenergias, procurando detetar possíveis.

Sendo a principal atividade da Bioenergias a valorização agrícola de lamas, estudou-se e analisou-se os principais passos deste processo, desde o licenciamento até à análise das características dos solos e lamas a valorizar. Observou-se que as características dos solos e as necessidades de cada cultura são muito diferentes, sendo necessário atender à fertilização recomendada para que as culturas se possam desenvolver adequadamente, evitando a acumulação de metais ou excesso de nutrientes no solo. Também as características das lamas variam bastante, consoante a origem e tratamentos efetuados. A caracterização das lamas é um passo fundamental no processo de valorização agrícola. Tratando-se de um subproduto com elevada carga poluente, a sua aplicação em solos agrícolas encontra-se sujeita a constrangimentos legais e valores limite rígidos, pelo que devem ser sujeitas a um tratamento eficaz.

Assim, estudou-se a forma como evoluem as propriedades das lamas ao longo do processo de tratamento, escolhendo LDU da ETAR do Choupal, onde são sujeitas a digestão anaeróbia e processos de desidratação. Verificou-se que o tratamento permite passar de um teor de ST de 6,6% e de SV de 78,3% nas LM para 24,3% de ST e 66,2%, em LE.

Os testes de germinação permitiram concluir que LM, LD1 e LD2 apresentam elevada fitotoxicidade, e que LE, após desidratação e período de estabilização, apresentam um GI de 87,1%, que potencia a germinação das sementes e o crescimento das raízes. Estes resultados demonstraram a importância da fase estabilização no tratamento de lamas, tendo em perspetiva a sua aplicação em solos agrícolas.

No entanto, a Bioenergias também recebe lamas que legalmente não podem ser valorizadas em solos agrícolas. Atualmente, essas lamas seguem para uma empresa parceira, para sofrer compostagem. A construção de uma unidade de compostagem na Bioenergias permite a redução de custos de transporte e a produção de um composto

estabilizado que, após analisado, poderá também ser aplicado em solos, diversificando as opções de valorização oferecidas pela empresa

Analisando as características de algumas lamas recebidas, concluiu-se que nem sempre a compostagem é a alternativa mais adequada. As lamas LRP, por exemplo, apresentaram teores de MO e N muito baixos, pelo que se aferiu que a compostagem não seria um tratamento eficaz para estas lamas.

Assim, selecionou-se a lama LRP para um estudo das suas características. Constatou-se que possui um pH muito elevado (11,92), um nível de ST de 34% e 37% de SV. Sendo lamas de uma indústria recicladora do plástico, aferiu-se que estas pudessem possuir um elevado poder calorífico, pelo que se procedeu à determinação do PCS. Dada a heterogeneidade da amostra, esta foi peneirada, formando duas frações:, a fração fina (LRP_f), que constitui cerca de 42% de LRP, e grosseira (LRP_g), que representa os restantes 58%.

Para LRP_g determinou-se um teor de SV de 45%, valor superior a 31%, apresentado por LRP_f. Consequentemente, o valor de PCS obtido para a fração grosseira (12157 kJ/kg) foi também superior ao da fração fina (5551 kJ/kg), enquanto LRP apresentou um valor intermédio de 8463 kJ/kg. Estes resultados permitiram concluir que estas lamas poderão ser encaminhadas para destinos finais diferentes, aproveitando a fração grosseira de LRP para valorização energética.

Os resultados obtidos nesta caracterização demonstraram que as características das lamas recebidas que não podem ser valorizadas na agricultura devem ser exploradas de forma a proceder a um encaminhamento mais adequado para destino final.

Considerando que no processo de gestão de uma empresa se deve sempre ambicionar a melhoria contínua, propõe-se que o processo de gestão implementado seja revisto com alguma regularidade, de modo a averiguar alternativas e novas tecnologias que tornem o modelo de gestão mais eficaz.

Propostas futuras

Tendo em consideração os resultados obtidos no presente estudo e as propostas de melhoria ao sistema de gestão de lamas implementada na Bioenergias sugeridas, propõe-se que se proceda à:

- **Investigação do tipo de secadores** que podem ser construídos, a fim de proceder à desidratação das lamas recebidas na empresa com elevado teor de humidade, considerando os custos, as quantidades e as características das lamas a desidratar;
- **Avaliação económica da instalação** da unidade de compostagem, verificando se é economicamente mais vantajoso relativamente ao transporte para a empresa parceira;
- **Análise mais profunda das características das lamas** não valorizadas na agricultura em próximos trabalhos, de forma a potenciar a sua valorização.



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M. C. e Cunha-Queda, C., (2015). “Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors”, *Waste Management*, 40, 44-52.
- Andriamirado, L. *et al.*, (2007). “Water Treatment Handbook”, 7ª Ed., Degremont Suez.
- APA, (2013). Gestão de lamas de estações de tratamento de águas residuais urbanas (2010-2013). Agência Portuguesa do Ambiente.
- Araújo, A. (2014). “Análise das características físico-químicas e térmicas de diferentes resíduos biodegradáveis para valorização energética”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Barberio, G., Cutaia, L. e Librici, V., (2013). “Treatment and disposal of sewage sludge: comparative life cycle assessment on Italian case study”, *Environmental Engineering and Management Journal*, 12, 7-10.
- Bourioung, M., Alaoui-Sossé, L., Laffray, X., Raouf, N., Benbrahim, M., Badot, P. M., e Alaoui-Sossé, B., (2014). “Evaluation of sewage sludge effects on soil properties, plant growth, mineral nutrition state, and heavy metal distribution in European larch seedlings (*Larix decidua*)”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 5325-5335.
- Brito, P., Rodrigues, L. e Oliveira, A., (2010). “Aproveitamento energético de biomassa”, Centro Interdisciplinar de Investigação e Inovação do Instituto Politécnico de Portalegre.
- Carvalho, M., (2012). “O uso sustentado do solo em Portugal”, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Universidade de Évora, Évora.
- Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho. “Diário da República nº 116/2011, Série I, páginas 3251-3300. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Decreto-Lei nº 85/2005, de 28 de abril. “Diário da República nº 82/2005, Série I-A, páginas 3214-3234. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Decreto-Lei nº 152/97, de 19 de junho. “Diário da República nº 139/97, Série I-A,

páginas 2959-2966. Ministério do Ambiente.

Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de agosto. “Diário da Republica nº 153/2009, Série I, páginas 5170-5198. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Social.

Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro. “Diário da Republica nº 192/2009, Série I, páginas 7154-7165. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Fang, W., Wei, Y. e Liu, J., (2016). “Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: heavy metal leaching characteristics”, *Journal of Hazardous Materials*, 310, 1-10

Hussein, A. H. A., (2009). “Impact of sewage sludge as organic manure in some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop”, *Journal of Applied Sciences*, 8, 1401-1411.

INIAP, (2006). Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva. “Manual de Fertilização das Culturas”.

Kelessidis, A. e Stasinakis, A. S., (2012). “Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries”, *Waste Management*, 32, 1186-1192.

Komilis, D., Kissas, K. e Symeonidis, A., (2014). “Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram”, *Waste Management*, 34, 249-255.

Kruger, O. e Adam, C., (2015). “Recovery potential of German sewage sludge ash”, *Waste Management*, 45, 400-406.

Lederer, J. e Rechberger, H., (2010). “Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options”, *Waste Management*, 30, 1043-1056.

Lloret, E., Pascual, J. A., Brodie, E. L., Bouskill, N. J., Insam, H., Juárez, M. F-D., e Goberna, M., (2016). “Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process”, *Applied Soil Ecology*, 101, 37-46.

Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G. J. e Zetterlund, H., (2003). “Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options”, *Resources, Conservation & Recycling*, 41, 255-278.

Nhuchhen, D. R. e Salam, P. A., (2012). “Estimation of higher heating value of biomass

- from proximate analysis: a new approach”, *Fuel*, 99, 55-63.
- Ott, C. e Rechberger, H., (2012). “The european phosphorus balance”, *Resources, conservation and recycling*, 60, 159-172.
- Petric, I., Sestam, A.e Sestan, I. (2009). “Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure”, *Process Safety and Environmental Protection*, 87, 206-212.
- Pinto, L. (2014). “Valorização agrícola de lamas de ETAR e efluentes pecuários”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Pires, P. (2015). “Análise da eficiência do processo de digestão anaeróbia de lamas da ETAR municipal do Choupal”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Portaria nº 335/97, de 16 de maio. “Diário da República nº 113/97 – Série I-B”. Ministério da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Saúde e do Ambiente Lisboa.
- RASARP, (2015). Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal. Caracterização do setor de Águas e Resíduos, Volume 1. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.
- Sousa, R. (2005). “Estratégias de gestão de lamas das estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Extrusão de lamas para aplicação da agricultura”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Universidade do Porto, Porto.
- Tavares, P. (2007). “Otimização da gestão de lamas de ETAR numa perspetiva regional”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., (2014). “Metcalf and Eddy Wastewater Engineering: Treatment and Reuse”, 5ª Ed., Mc Graw-Hill.
- Trautmann, N. M., Krasny, M. E., (1997). “Composting in the classroom: Scientific Inquiry for High School Students”, Kendall/Hunt Publishing Company



ANEXO A

ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA O LICENCIAMENTO DA VALORIZAÇÃO AGRÍCOLA DE LAMAS

Segundo o Anexo III do Decreto-lei nº 276/2009, o PGL inclui obrigatoriamente:

- a) A identificação da origem das lamas e os processos de tratamento das águas residuais e das lamas;
- b) A caracterização das lamas a valorizar, quantidades previstas e a sua composição;
- c) A identificação e caracterização climática e fundiária do perímetro de intervenção;
- d) A caracterização das explorações onde se pretende proceder à aplicação, identificando restrições associadas ao meio natural, zonas sensíveis e vulneráveis, cursos e captações de água, albufeiras, zonas habitacionais, áreas de Reserva Ecológica Nacional, entre outras;
- e) O levantamento da atividade pecuária existente no perímetro de intervenção e nas explorações onde se pretende proceder à valorização das lamas;
- f) A descrição das características dos solos e dos sistemas de cultura;
- g) A descrição e localização das áreas de sequeiro, de regadio, de floresta e de pastagem no perímetro de intervenção, e as culturas desenvolvidas ou que se pretende desenvolver nas explorações onde se prevê a aplicação de lamas;
- h) A identificação do técnico responsável e de todas as pessoas ou entidades envolvidas na atividade, bem como da maquinaria e instrumentos a utilizar, dos riscos inerentes à aplicação, medidas preventivas e descrição do vestuário e outros equipamentos de proteção.

Já a DPO tem que incluir:

- a) Identificação do requerente, do técnico responsável pela aplicação e do agricultor, titular da exploração destinatária das lamas;
- b) Identificação das parcelas agrícolas de destino, onde se inclui o número de parcelário, localização, área do terreno e tipo de cultura praticada;
- c) Plano de fertilização para cada tipo de cultura, considerando a produção esperada, explicitando as quantidades de fertilizantes orgânicos e minerais, definindo a data de aplicação, a quantidade de lamas e a técnica de aplicação no solo;
- d) Caracterização das lamas a aplicar e dos solos onde se pretende proceder à aplicação.

ANEXO B

NÍVEIS DE SOLO

Em INIAP (2006) são atribuídos índices (ou níveis) ao solo, numa escala de 1 a 7, que traduzem a sua classe de fertilidade de acordo com o teor de P_2O_5 e K_2O , em ppm, conforme representado na Tabela B.1. O magnésio é um elemento cuja determinação do teor no solo não é exigida pela legislação em vigor, sendo importante apenas para algumas culturas.

A ATRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES AO SOLO SIMPLIFICA A INTERPRETAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES DE FERTILIZAÇÃO PARA CADA CULTURA A DESENVOLVER, COMO APRESENTADO NO ANEXO B

Tabela B.1. Correspondência entre níveis e teores de fósforo, potássio e magnésio no solo.

Nível ou índice	Teores do solo (ppm)		
	P_2O_5	K_2O	Mg
1	≤ 25	≤ 25	≤ 30
2	26 – 50	26 – 50	31 – 60
3	51 – 80	51 – 80	61 – 90
4	81 – 120	81 – 120	91 – 125
5	121 – 150	121 – 159	> 125
6	151 – 200	151 – 200	
7	> 200	> 200	



ANEXO C

FERTILIZAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA ALGUMAS CULTURAS

Apresenta-se neste anexo as condições e fertilização de referência definidas em INIAP (2006) para as diferentes culturas abordadas no presente relatório: milho-forragem, macieira, pessegueiro e prado de sequeiro.

7.3. MILHO-FORRAGEM

- Produção de referência: 60 t/ha de matéria verde (MV) (a)
- Faixa de pH mais favorável: 5,8 – 7,0

	Alta	Média
Sensibilidade às situações de carência em nutrientes secundários e micronutrientes	Mg Zn	B S (b)

Azoto (N), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) recomendados (kg/ha)

Produção esperada t/ha MV	N (c)	Fósforo - níveis no solo						Potássio - níveis no solo					
		1	2	3	4	5	6(d)	1	2	3	4	5	6
25	70	60	45	30	20	--	--	90	75	60	50	35	--
30	90	80	60	40	25	--	--	100	90	70	55	40	--
40	130	100	80	60	40	30	25	135	115	90	70	55	--
50	200	130	110	90	70	50	35	180	150	120	700	70	(e)
60	250	150	130	110	90	70	50	210	175	140	110	85	(e)
65	275	160	140	120	100	80	60	225	190	150	120	90	(e)
80	320	180	160	140	120	100	80	255	215	170	135	100	(e)
90	340	200	180	160	140	120	100	285	235	190	155	120	(e)

- (a) – 4 a 5 t de matéria verde (MV) \cong 1 t de matéria seca (MS). Híbridos, em especial de ciclo longo, apresentam, geralmente, uma relação MV/MS mais baixa.
- (b) – Utilizar sempre que possível adubos com enxofre, em especial nos solos com teores baixos de matéria orgânica e nos derivados de areia e/ou arenitos.
- (c) – Aplicar metade a um terço do azoto em fundo e o restante em uma ou duas coberturas, devendo a primeira ter lugar com o milho joelheiro e a segunda um pouco antes da floração (embandeiramento).
- (d) – Em especial nos solos de textura ligeira ou com pH \geq 7,0.
- (e) – Em solos derivados de areia e/ou arenitos aplicar as doses do nível 5.

Figura C.1. Fertilização recomendada para culturas de milho-forrageiro.

9.7. POMÓIDEAS: PEREIRAS E MACIEIRAS

- Produção de referência:
Macieira: 60 t/ha
Pereira : 40 t/ha
- Faixa de pH mais favorável: 6,0 a 6,5

	Alta	Média
Sensibilidade às situações de carência em nutrientes secundários e micronutrientes	Mg B	Fe Mn

Fósforo (P_2O_5), potássio (K_2O) e magnésio (Mg) recomendados à instalação do pomar (kg/ha)

Fósforo – níveis no solo					Potássio – níveis no solo					Magnésio – níveis no solo				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
200	150	100	0	0	300	225	150	0	0	60	45	30	0	0

Figura C.2. Fertilização recomendada para culturas pereiras e macieiras.

9.8. PESSEGUEIRO

- Produção de referência: 10 a 15 t/ha
- Faixa de pH mais favorável: 6,0 – 7,0

	Alta	Média
Sensibilidade às situações de carência em nutrientes secundários e micronutrientes		Fe Zn Mg

Fósforo (P_2O_5), potássio (K_2O) e magnésio (Mg) recomendados à instalação do pomar (kg/ha)

Fósforo – níveis no solo					Potássio – níveis no solo					Magnésio – níveis no solo				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
200	150	100	0	0	300	225	150	0	0	60	45	30	0	0

Figura C.3. Fertilização recomendada para culturas de pessegueiro.

7.5. PRADOS DE SEQUEIRO : Pastagens semeadas de trevo subterrâneo Pastagens naturais

- Produção de referência:
2 t/ha de matéria seca (MS) ano de instalação (a)
4 t/ha de matéria seca (MS) nos anos seguintes (a)
- Faixa de pH mais favorável: 5,5 – 7,0

	Alta	Média
Sensibilidade às situações de carência Em nutrientes secundários e micronutrientes (*)	Mg B Mo	Zn

(*)- As gramíneas são, de um modo geral, menos sensíveis que as leguminosas a baixos níveis de B e Mo no solo, sendo ligeiramente mais sensíveis relativamente à carência de Zn.

Azoto (N), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) recomendados (kg/ha)

Produção esperada t/ha MS	N (b)	Fósforo – níveis no solo (c)						Potássio – níveis no solo (c)					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		INSTALAÇÃO (Prados e pastagens semeadas)											
< 3	20	100	75	50	30	30	--	90	75	60	30	--	--
3 – 6	25	140	100	75	50	50	--	150	125	100	50	60	--
> 6	30	180	140	100	70	70	--	150	125	120	80	50	--

- (a) – 4 a 5 t de matéria verde (MV) \cong 1 t de matéria seca (MS), dependendo do tipo de consociação e época do corte.
- (b) – A fertilização azotada deverá ter em conta a composição botânica do prado.
Nas sementeiras tardias utilizar as doses mais elevadas.
– Na manutenção anual, a recomendação sem azoto é para prados equilibrados de gramíneas e leguminosas. Usar azoto nos casos em que o prado ou pastagem se apresentar desequilibrado, usando doses mais elevadas no caso de excesso de leguminosas e diminuindo-as em caso contrário.
– Nos casos de prados estremos de gramíneas, aquelas doses poderão ser aumentadas de acordo com a produtividade potencial do prado. Nestes casos fazer uma cobertura após o corte ou pastoreiro. Nos prados de trevo subterrâneo não aplicar azoto.
- (c) – É à instalação que há oportunidade de incorporar, à profundidade adequada, nutrientes pouco móveis, como o fósforo, pelo que as quantidades indicadas poderão ser aumentadas, devendo ter-se em vista o investimento a realizar. No caso da manutenção anual ter em atenção a produtividade e o equilíbrio entre leguminosas e gramíneas, em especial no tocante às doses de potássio.

Figura C.4. Fertilização recomendada para culturas de prado de sequeiro.