



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Química

**Avaliação do potencial da utilização de solos marginais em
Portugal para o crescimento de plantas energéticas
regadas com águas residuais tratadas**

TÂNIA ISABEL CRISTÓVÃO PIRES
(Licenciada em Engenharia do Ambiente)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadora:

Doutora Ana Maria Garcia Henriques Barreiros Joanaz de Melo

Júri:

Presidente: Doutora Isabel Maria da Silva João

Vogais:

Doutor José Augusto Paixão Coelho

Doutora Ana Maria Garcia Henriques Barreiros Joanaz de Melo

Abril de 2024



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Química

**Avaliação do potencial da utilização de solos marginais em
Portugal para o crescimento de plantas energéticas
regadas com águas residuais tratadas**

TÂNIA ISABEL CRISTÓVÃO PIRES
(Licenciada em Engenharia do Ambiente)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadora:

Doutora Ana Maria Garcia Henriques Barreiros Joanaz de Melo

Júri:

Presidente: Doutora Isabel Maria da Silva João

Vogais:

Doutor José Augusto Paixão Coelho

Doutora Ana Maria Garcia Henriques Barreiros Joanaz de Melo

Abril de 2024

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação não teria sido possível sem um conjunto de pessoas a quem quero agradecer. Muito mais do que uma formalidade, estas linhas de agradecimento são a minha forma de reconhecimento de que sem eles não estaria a terminar este mestrado.

Em primeiro lugar à minha Orientadora, a Professora Ana Barreiros, pelos desafios e pela motivação constante, mesmo quando eu não via progressos suficientes ou o caminho a seguir. Pela paciência e disponibilidade permanentes, pelo empenho na transmissão de conhecimentos e novos pontos de vista.

Aos colegas do MEQA, por terem transformado este mestrado em bem mais do que uma fase meramente académica, pela partilha das conquistas alcançadas, mas também das horas de desespero. Um agradecimento especial à Elsa, à Inês e ao Jorge.

Aos meus Pais, Irmão e Cunhada, pelo apoio desde sempre sem nunca questionarem ou duvidarem, pela compreensão das inúmeras ausências. Por, mesmo sem se aperceberem, permitirem que tudo fosse mais leve.

E, finalmente, mas acima de tudo, ao Miguel, que embarcou nesta aventura comigo e, mesmo no meio do caos em que a nossa vida por vezes se transformou, foi fundamental para que no fim do dia o saldo fosse sempre positivo. Pelo seu exemplo de empenho e trabalho que tanto me motivaram e continuam a motivar.

E ao André, por todo o tempo que me permitiu ter.

Muito obrigada a todos.

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AR	Águas residuais
ART	Águas Residuais Tratadas
CBO	Carência Bioquímica de Oxigénio
CE	Comissão Europeia
DARU	Diretiva Tratamento das Águas Residuais Urbanas
DL	Decreto-Lei
e.p.	Equivalente de população
EEA	Agência Europeia do Ambiente
EM	Estados-membros
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ETAR	Estações de Tratamento de Água Residual
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oils</i>
IIASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	Organização Internacional de Normalização
JCR	<i>Joint Research Centre</i>
MAGIC	<i>Marginal Lands for Growing Industrial Crops</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
P-3AC	Programa de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas
PAEC	Plano de Ação para a Economia Circular
PENSAARP 2030	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais e Pluviais 2030
PNEC 2030	Plano Nacional de Energia e Clima
RED	Diretiva das Energias Renováveis

RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
SEEMLA	<i>Sustainable Exploitation of Biomass for Bioenergy from Marginal Lands</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SQR	<i>Muencheberg Soil Quality Rating</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
t	Tonelada
tep	Tonelada equivalente de petróleo
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta

RESUMO

O planeta enfrenta importantes constrangimentos que carecem de resolução urgente, nomeadamente ao nível da segurança energética, segurança alimentar, escassez de água e alterações climáticas. Neste contexto, a produção de energia limpa, como os biocombustíveis a partir de culturas energéticas, destaca-se como estratégia alternativa aos combustíveis fósseis.

O caminho para a sustentabilidade do planeta deve reconhecer a interdependência entre os recursos a eles associados: água, alimentos e energia. É importante garantir que a produção das culturas industriais para biocombustíveis não represente uma ameaça à obtenção de alimentos para consumo humano e animal, competindo por terra ou água.

Portugal regista uma área cada vez maior de terras sem aptidão agrícola, consideradas marginais, e detém já um significativo número de Estações de Tratamento de Água Residual (ETAR) com tratamento adequado para rega de culturas energéticas. A conjugação destes dois recursos representa um potencial impulso para a produção de biomassa para biocombustíveis.

Com recurso ao *software* ArcGIS procedeu-se ao cruzamento de informação sobre solos marginais, solos não cultiváveis e ETAR localizados em território nacional. O tratamento destes dados permitiu aferir que, aproximadamente, 80% das ETAR com tratamento adequado para rega de culturas energéticas encontram-se localizadas em solos marginais ou nas suas imediações, possibilitando a rega de culturas energéticas numa área de 2 449 km². Por outro lado, pelo estudo de um segundo cenário, concluiu-se que 7 146 km² de solos marginais são susceptíveis de ser irrigados com águas residuais tratadas (ART) provenientes de ETAR com tratamento secundário.

A produtividade do conjunto de culturas energéticas selecionadas com base no projeto MAGIC - *Marginal Lands for Growing Industrial Crops*, para as áreas calculadas, encontra-se entre os 82 670 t/ano de matéria seca e os 1 014 026 t/ano de matéria seca, permitindo a produção de energia entre 1 426 244 868 MJ/ano e 17 745 454 802 MJ/ano.

Palavras-chave:

Biocombustíveis; Solos marginais; Águas Residuais Tratadas; Estações de Tratamento de Água Residual; Culturas energéticas

ABSTRACT

The planet faces important constraints that require urgent resolution, particularly in terms of energy security, food security, water scarcity and climate change. In this context, the production of clean energy, such as biofuels from energy crops, stands out as an alternative strategy to fossil fuels.

The path to the planet's sustainability must recognize the interdependence between the resources associated with them: water, food and energy. It is important to ensure that the production of industrial crops for biofuel production does not pose a threat to obtaining food for human and animal consumption, competing for land or water.

Portugal has an increasing area of land without agricultural potential, considered marginal, and already has a considerable number of Wastewater Treatment Stations (WWTP) with adequate treatment for irrigating energy crops. The combination of these two resources represents a potential boost to produce biomass for biofuels.

Using the ArcGIS software, information on marginal soils, uncultivated soils and WWTP located in the national territory was crossed. The treatment of these data allowed to assess that approximately 80% of the WWTP with adequate treatment for irrigation of energy crops are in marginal soils or in their vicinity, allowing the irrigation of energy crops in an area of 2 449 km². On the other hand, the study of a second scenario concluded that 7 146 km² of marginal soils are likely to be irrigated with treated wastewater from WWTP with secondary treatment.

The productivity of the set of energy crops selected based on the MAGIC - Marginal Lands for Growing Industrial Crops project, for the calculated areas, is between 82 670 t/year of dry matter and 1 014 026 t/year of dry matter, allowing energy production between 1 426 244 868 MJ/year and 17 745 454 802 MJ/year.

Key words:

Biofuels; Marginal soils; Treated Wastewater; Wastewater Treatment Stations; Energy crops

Do presente Trabalho Final de Mestrado resultou o artigo Pires, T.; Barreiros, A.M.. 2024. «*Marginal land irrigated with treated wastewater. An opportunity for biofuel production in Portugal?*», aprovado para comunicação oral no ICoWEFS 2024 (*International Conference on Water, Energy, Food and Sustainability*), de 8 a 10 de maio de 2024, em Portalegre (ANEXO VI). O artigo será publicado nos *Proceedings* da Conferência pela Springer, com indexação Scopus.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 BIOCOMBUSTÍVEIS	2
2.1.1 Definição e classificação	2
2.1.2 Enquadramento legal	3
2.1.3 Contributo dos biocombustíveis para o cumprimento dos ODS – Agenda 2030.....	5
2.1.4 Importância do Nexus Água-Energia-Alimento na produção de biocombustíveis.....	6
2.1.5 Produção e consumo de biocombustíveis em Portugal.....	7
2.2 SOLOS MARGINAIS	9
2.2.1 Importância e definição	9
2.2.2 Quantificação e mapeamento de solos marginais em Portugal.....	11
2.2.3 Solos marginais para a produção de culturas energéticas - Breve análise SWOT.....	14
2.3 CULTURAS ENERGÉTICAS.....	16
2.3.1 Culturas energéticas como fonte alternativa de biomassa para biocombustíveis.....	16
2.3.2 Culturas energéticas lenhocelulósicas.....	17
2.3.3 Vantagens e desvantagens de culturas energéticas lenhocelulósicas.....	18
2.3.4 Culturas energéticas em Portugal.....	19
2.4 ÁGUAS RESIDUAIS TRATADAS	23
2.4.1 Definição e enquadramento legal das águas residuais tratadas	23
2.4.2 Reutilização de águas residuais tratadas	25
2.4.3 Limitações à reutilização de águas residuais tratadas	27

2.4.4	Águas residuais tratadas na Europa e em Portugal.....	27
3.	METODOLOGIA.....	30
3.1	METODOLOGIA ADOPTADA	30
3.1.1	SIG – Sistemas de Informação Geográfica.....	30
3.1.2	Mapeamento dos solos marginais aptos para produção de culturas energéticas.....	32
3.1.3	Mapeamento das ETAR e da área de viabilidade de rega	33
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.	CONCLUSÕES	42
6.	BIBLIOGRAFIA	43
	ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de biocombustíveis de acordo com a matéria-prima (Production of liquid biofuels from renewable resources, adaptado por [7]).	2
Figura 2 - Processos de Conversão e tipo de biocombustível final, de acordo com a matéria-prima (Grahn, M.&Hansson, J. (2014), adaptado por [7]).	3
Figura 3 - Nexus Alimento-Energia-Água (Adaptado de [19]).	7
Figura 4 - Consumo de energia primária por tipo de fonte de energia (Portugal, 2021) (Adaptado de [22]).	8
Figura 5 - Matéria-prima (% em volume) utilizada na produção de biocombustíveis (FAME e HVO), 2020, Portugal [12].	8
Figura 6 - Incorporação de biocombustíveis nos combustíveis rodoviários, Portugal, 2022 (tep) (Adaptado de [23]).	9
Figura 7 - Incorporação Física Mensal de Biocombustível em 2022 (%) (Adaptado de [24]).	9
Figura 8 - Suscetibilidade dos solos à desertificação (IDRH, EAN, 2003, adaptado por [30]).	10
Figura 9 - Tipos de uso do solo na UE, 2018 (Adaptado de [31]).	11
Figura 10 - Mapeamento de solos marginais na Europa (Esquerda: MAGIC [37] / Direita: SEEMLA) [38].	13
Figura 11 - Marginalidade dos solos agrícolas na UE [5].	14
Figura 12 - Estrutura da parede celular de espécie lenhocelulósica (adaptado de [51]).	18
Figura 13 - Lista das 20 culturas energéticas mais promissoras, obtidas pelo projeto MAGIC através de análise multicritério (Adaptado de [55]).	20
Figura 14 - Esquema de tratamentos de águas residuais [65].	24
Figura 15 - Evolução de reutilização de águas residuais - Portugal 2015-2021 (%) ([77-83]).	25
Figura 16 - Níveis de tratamento por ETAR - Portugal 2018 (%) [92].	28
Figura 17 – ETAR, e nível de tratamento, reportadas pelos Estados-membros no âmbito da Diretiva n.º 91/271/CEE, 2020, EU-27 + Islândia (Adaptado de [93]).	28
Figura 18 – ETAR, e nível de tratamento, localizadas em aglomerados populacionais com mais de 2.000 e.p.. em Portugal Continental, 2020 (Adaptado de [93]).	29
Figura 19 - Operações associadas a um SIG [97].	30
Figura 20 - ArcGIS – Camada de Solos Marginais, com filtro).	32
Figura 21 - ArcGIS - Mapa de ETAR reportadas pelos EM no âmbito da Diretiva 91/271/CEE (2020), integrado no ArcGIS [93].	33
Figura 22 - ArcGIS – Camada ETAR de Portugal no âmbito da Diretiva 91/271/CEE, com filtro (Esquerda: Cenário 1 / Direita: Cenário 2).	34
Figura 23 - ArcGIS - Buffer com raio de 10 km delimitado a partir da ETAR.	35
Figura 24 - ArcGIS - Buffer de 10 km com centro nas ETAR (Esquerda: Cenário 1 / Direita: Cenário 2).	35
Figura 25 - ArcGIS - Camada solos marginais dentro do buffer de 10 km de raio obtida pela interseção das camadas Solos Marginais com filtro e Buffer de 10 km de raio.	36

Figura 26 - ArcGIS - Camada solos marginais dentro do buffer de 10 km de raio sem áreas não cultiváveis, obtida pelas ferramentas “interseção” e “apagar”	36
Figura 27 - ArcGIS – Solos marginais contidos no buffer de 10 km de raio, sem zonas incultiváveis (Esquerda: Cenário 1 / Direita: Cenário 2).	37
Figura 28 - Área de solo marginal elegível com potencial de cultivo, com base nas necessidades hídricas das culturas (ha).	39
Figura 29 - Rendimento para a área marginal com potencial de produção (t/ano de matéria seca). .	40
Figura 30 - Potencial de produção de energia para a área marginal com potencial de produção (MJ/ano).....	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Solos Marginais em Portugal (Adaptado de MAGIC [36]).....	13
Tabela 2 - Análise SWOT, não exaustiva, do uso de solos marginais para produção de culturas energéticas [40-41].	15
Tabela 3 - Culturas energéticas em estudo e suas principais características (Adaptado de [55, 57-58].	21
Tabela 4 - Nível de tratamento por uso de águas residuais tratadas (adaptado de [84]).....	26
Tabela 5 - Principais ferramentas do ArcGIS utilizadas neste trabalho (Adaptado de [98]).....	31

1. INTRODUÇÃO

A questão energética está na ordem do dia, muito motivado pelo previsível aumento da procura de energia devido ao crescimento populacional, aumento do poder de compra, fim iminente das reservas de combustíveis fósseis, e pela necessidade imperativa de garantir a segurança e independência energética, a redução das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e a mitigação das alterações climáticas [1].

O setor da energia assume um importante papel, tanto a nível económico como ambiental, tendo contribuído com 67,1% das emissões nacionais de dióxido de carbono (CO₂), em 2020. Neste setor, as fontes mais representativas em termos de emissões são os transportes, juntamente com a produção e transformação de energia, com 25,8% e 18,1% do total das emissões de CO₂ respetivamente [2]. Neste contexto, Portugal estabeleceu uma política energética que visa a descarbonização, e o cumprimento dos acordos internacionais, onde os biocombustíveis são apresentados com elevado potencial enquanto fonte alternativa de energia [3].

Importa, contudo, garantir a geração deste tipo de energia, sem comprometer a disponibilidade de água ou competir com a produção de alimentos. Para tal, a interdependência destes recursos, designada por Nexus Água-Energia-Alimento, sugere que devem ser geridos de forma integrada [4]. A importância da inter-relação entre água, alimentos e energia é essencial para cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030.

Neste sentido, o presente trabalho pretendeu abordar o cultivo de plantas energéticas para produção de biocombustíveis, não descuidando a segurança alimentar e minimizando o aumento de pressão nos recursos hídricos. Desta forma, no seguimento do estudo desenvolvido pelo projeto MAGIC (*Marginal Lands for Growing Industrial Crops*) que visou “*promover o desenvolvimento sustentável de culturas industriais eficientes em termos de recursos e economicamente rentáveis cultivadas em terras marginais*” [5], procurou-se agora avaliar o potencial de rega dessas culturas com águas residuais tratadas.

De facto, a utilização de terras que não têm capacidade para a agricultura, bem como a reutilização de ART para irrigação, resulta não só em benefícios económicos, mas também em benefícios ambientais e sociais.

O trabalho baseia-se na revisão bibliográfica de forma a apresentar o panorama atual relativo ao tema em causa, e no tratamento de dados no *software* ArcGIS, de forma a aferir o potencial de crescimento de plantas energéticas em solos marginais regados com ART.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOCOMBUSTÍVEIS

2.1.1 Definição e classificação

De acordo com a primeira diretiva europeia sobre biocombustíveis, Diretiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, publicada em 2003 define-se biocombustível como o “combustível líquido ou gasoso para transportes produzido a partir de biomassa”, e biomassa como sendo a “fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos” [6].

Os biocombustíveis são, assim, substitutos dos combustíveis fósseis, caracterizando-se como uma opção sustentável de energia.

Uma das formas de classificação dos biocombustíveis faz-se de acordo com a origem de biomassa que lhe dá origem, como madeira, culturas lenhocelulósicas ou algas, e a existência, ou não, de conversão dessa biomassa (Figura 1). Deste modo, os biocombustíveis podem ser classificados como primários ou secundários: os biocombustíveis primários provêm diretamente da queima de madeira ou excrementos de animais, sem qualquer processamento da biomassa, enquanto os biocombustíveis secundários requerem uma forma de conversão [7].



Figura 1 - Classificação de biocombustíveis de acordo com a matéria-prima (Production of liquid biofuels from renewable resources, adaptado por [7]).

Dentro do grupo dos biocombustíveis secundários, identificam-se duas categorias principais – biocombustíveis convencionais e biocombustíveis avançados.

Os biocombustíveis convencionais, também conhecidos como biocombustíveis de primeira geração, são produzidos a partir de culturas energéticas alimentares, como cereais, culturas

oleaginosas ou culturas ricas em açúcar. Por seu lado, os biocombustíveis avançados diferenciam-se em três gerações de biocombustíveis: os de segunda geração, com origem em biomassa lenhocelulósica, designadamente culturas energéticas lenhocelulósicas ou resíduos florestais, agrícolas, industriais ou urbanos; de terceira geração, produzidos a partir de biomassa proveniente de algas; e os biocombustíveis de quarta geração que utilizam culturas geneticamente modificadas como matéria-prima [7].

À semelhança da diversidade de matérias-primas que dá origem aos biocombustíveis, existem igualmente vários processos de conversão dessa biomassa, assim como de produtos finais (Figura 2).

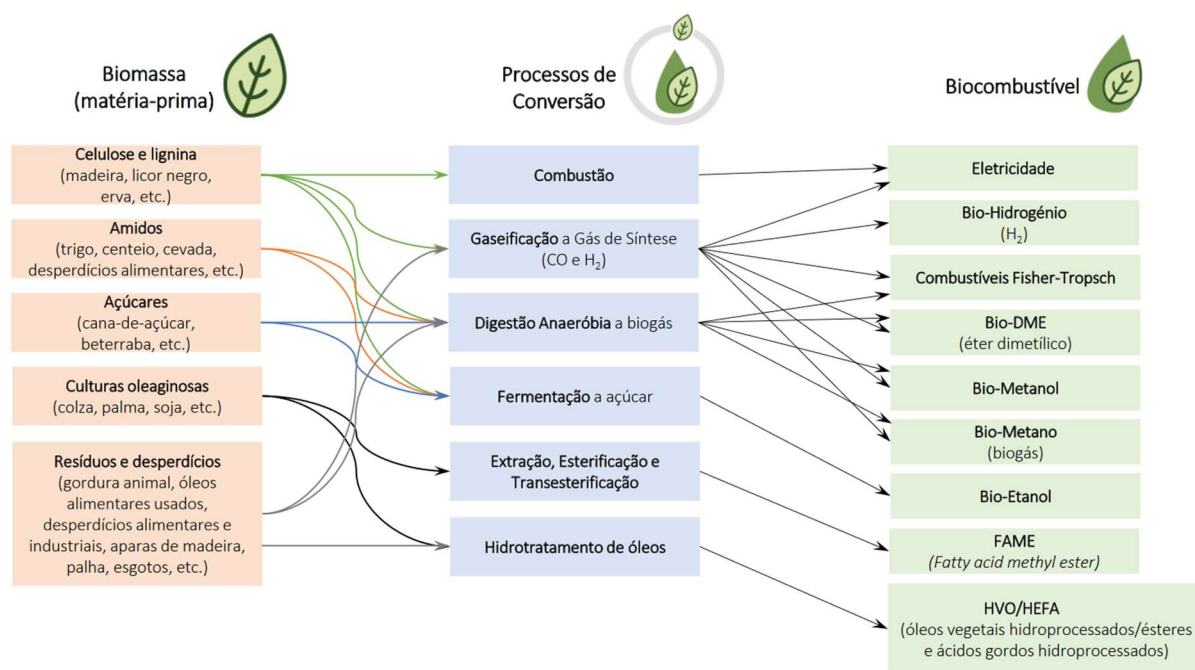


Figura 2 - Processos de Conversão e tipo de biocombustível final, de acordo com a matéria-prima (Grahm, M.&Hansson, J. (2014), adaptado por [7]).

2.1.2 Enquadramento legal

Estratégias e políticas internacionais, europeias e nacionais apostam na promoção dos biocombustíveis como substitutos promissores dos combustíveis fósseis [1]. A política europeia de biocombustíveis insere-se no cumprimento do Acordo de Paris [8-9], compromisso internacional, juridicamente vinculativo, ratificado em 2015. O Acordo de Paris estabeleceu metas com objetivo de alcançar a descarbonização e minimizar as consequências do aquecimento global, mantendo o aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, e desenvolver esforços de forma a evitar que esse aumento supere 1,5 °C [9-10].

A Diretiva 2003/30/CE, conhecida por Diretiva dos Biocombustíveis, estabeleceu as primeiras metas de incorporação de biocombustíveis para os Estados-membros [6]. Contudo, essas metas vieram a ser alteradas em 2009, pela Diretiva 2009/28/CE (Diretiva Energias Renováveis - RED) [11]. Este diploma legal estipulou uma meta obrigatória para todos os Estados-membros de 10%, em teor energético, de energias renováveis no setor dos transportes. Foram também impostos critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis, nomeadamente a redução de 50%, no mínimo, das emissões de GEE resultante da utilização de biocombustíveis ou de, pelo menos, 60% no caso de biocombustíveis provenientes de instalações que começaram a produzir após o início do ano de 2017. A mesma Diretiva definiu ainda uma bonificação na contabilização dos biocombustíveis com origem em matérias-primas obtidas em solos degradados ou contaminados, sem aptidão para produção de alimentos ou rações, bem como a interdição do cultivo de matérias-primas em solos caracterizados por serem ricos em biodiversidade, nomeadamente terrenos que, até janeiro de 2008, eram de floresta primária ou de pastagens; com elevado teor de carbono como zonas húmidas ou zonas continuamente arborizadas; ou solos de turfeiras.

Com efeito, a problemática relacionada com as terras para produção de culturas destinadas a biocombustíveis tem especial relevância no sentido em que a sua produção pode deslocar o cultivo de espécies alimentares para novos terrenos, transformando, por exemplo florestas em terras agrícolas. Esta alteração indireta do uso do solo, denominada ILUC (do inglês *Indirect Land Use Change*) pode conduzir a um aumento de emissões de CO₂, comprometendo os benefícios dos biocombustíveis.

Neste sentido, em 2015, a Diretiva ILUC - Diretiva (UE) 2015/1513 atribuiu um fator ILUC às emissões de biocombustíveis provenientes de matérias-primas que promovam a alteração do uso do solo, e um fator de emissão zero aos biocombustíveis cujas matérias-primas não conduzam ao aumento da procura de terrenos, como é o caso de materiais lenhocelulósicos, resíduos, detritos ou materiais celulósicos não alimentares [13]. A lista destas matérias-primas, inicialmente publicada na Parte A do Anexo IX da Diretiva Energias Renováveis [11], foi aditada com a com a indicação de novas fontes de matérias-primas na Diretiva ILUC. Este diploma legal estabeleceu ainda novos limites de incorporação de biocombustíveis e de utilização de biocombustíveis convencionais, a partir de culturas alimentares, com um máximo de 7% [13].

Atualmente encontra-se em vigor a Diretiva RED II - Diretiva (UE) 2018/2001 [14], que determina uma quota mínima de 14% de energia renovável nos transportes até 2030. Contudo, a sua transposição para a legislação nacional, pelo Decreto-Lei 84/2022, de 9 de Dezembro, estabeleceu que o consumo final de energia no setor dos transportes em Portugal deve ter uma contribuição proveniente de fontes renováveis de, pelo menos, 29% [15].

Ainda com vista ao cumprimento do tratado internacional sobre as alterações climáticas – Acordo de Paris, a União Europeia aprovou o Pacote Energia-Clima para 2030, e posteriormente um novo conjunto de propostas – Objetivo 55, que visa metas mais rigorosas e vinculativas de redução de GEE impostas pela Lei Europeia em matéria de clima, em pelo menos, 55% até 2030, com objetivo de se alcançar a neutralidade carbónica na Europa em 2050 [16].

Neste sentido, Portugal apresentou o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC), com vista à descarbonização e transição energética em Portugal e o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC) como “o principal instrumento de política energética e climática”. Nestes documentos, os biocombustíveis avançados assumem um importante papel para a descarbonização do setor dos transportes e várias medidas são apresentadas no sentido de promover a produção e consumo de biocombustíveis. Algumas das metas para atingir as medidas propostas por Portugal no horizonte 2030 consistem em [3]:

- redução de 45% a 55% das emissões de GEE em relação a 2005;
- incorporação de 47% de energias renováveis;
- redução de 40% de emissões de GEE no setor dos transportes, por referência às emissões registadas em 2005.

2.1.3 Contributo dos biocombustíveis para o cumprimento dos ODS – Agenda 2030

As orientações políticas de produção e promoção de biocombustíveis têm também em conta a Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável — «Transformar o nosso mundo», aprovada na Assembleia Geral das Nações Unidas a 25 de setembro de 2015. A Agenda 2030 visa o desenvolvimento sustentável através de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e 169 metas, a serem implementados por todos os países signatários, de acordo com três vetores: social, económico e ambiental [17].

A produção de biocombustíveis representa, de forma generalizada, um importante contributo positivo para o cumprimento de alguns ODS. Segundo Nazari et al., 2021 [18] os impactos positivos dos biocombustíveis são maioritariamente visíveis no cumprimento do ODS 13 - Ação Climática e do ODS 7 – Energias Renováveis e Acessíveis. Contudo, os biocombustíveis avançados de segunda geração, produzidos a partir de culturas energéticas não alimentares, contribuem igualmente para o alcance de outros objetivos, nomeadamente o ODS 8 - Trabalho Digno e Crescimento Económico, na medida em que permitem gerar novos empregos e promover o desenvolvimento rural, estimulando o crescimento económico ou bioeconomia;

ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestruturas, por via da imprescindível investigação e criação, ou adaptação, de tecnologias associadas; ODS 10 - Reduzir as Desigualdades, potenciado pela promoção da bioeconomia e do crescimento económico; ODS 12 - Produção e Consumo Sustentáveis, uma vez que a produção local de matéria-prima pode incrementar a economia circular; e ODS 17 – Parcerias para a Implementação dos Objetivos, atendendo à concretização de políticas e incentivos aos biocombustíveis e ao envolvimento das empresas que incluem os ODS nos seus objetivos.

Não obstante o contributo positivo dos biocombustíveis para o alcance dos ODS, esta fonte de energia revela também alguns impactos adversos para o cumprimento da Agenda 2030. Os impactos negativos causados pelos biocombustíveis de primeira geração revelam-se mais severos pela utilização de biomassa alimentar como matéria-prima, no entanto também a produção de biocombustíveis de segunda geração pode desencadear efeitos negativos. Estes biocombustíveis avançados não recorrem a culturas alimentares, contudo o cultivo da biomassa lenhocelulósica necessita igualmente de terra, água, energia e fertilizantes. Também o pré-tratamento necessário para a utilização da biomassa lenhocelulósica implica um elevado consumo energético, hídrico e de produtos químicos. Neste sentido, os biocombustíveis de segunda geração podem desencadear efeitos negativos ao nível dos ODS 6 – Água Potável e Saneamento; ODS 14 – Proteger a Vida Marinha, e ODS 15 – Proteger a Vida Terrestre [18].

2.1.4 Importância do Nexus Água-Energia-Alimento na produção de biocombustíveis

Como evidenciado no ponto anterior, a produção e utilização de biocombustíveis representa impactos positivos e, simultaneamente, impactos negativos no desenvolvimento sustentável do planeta, impondo mecanismos de *trade-offs*, onde um aspeto é beneficiado em detrimento de outro que será desfavorecido.

A Figura 3 sintetiza algumas das interações existentes entre os recursos alimento, energia e água.

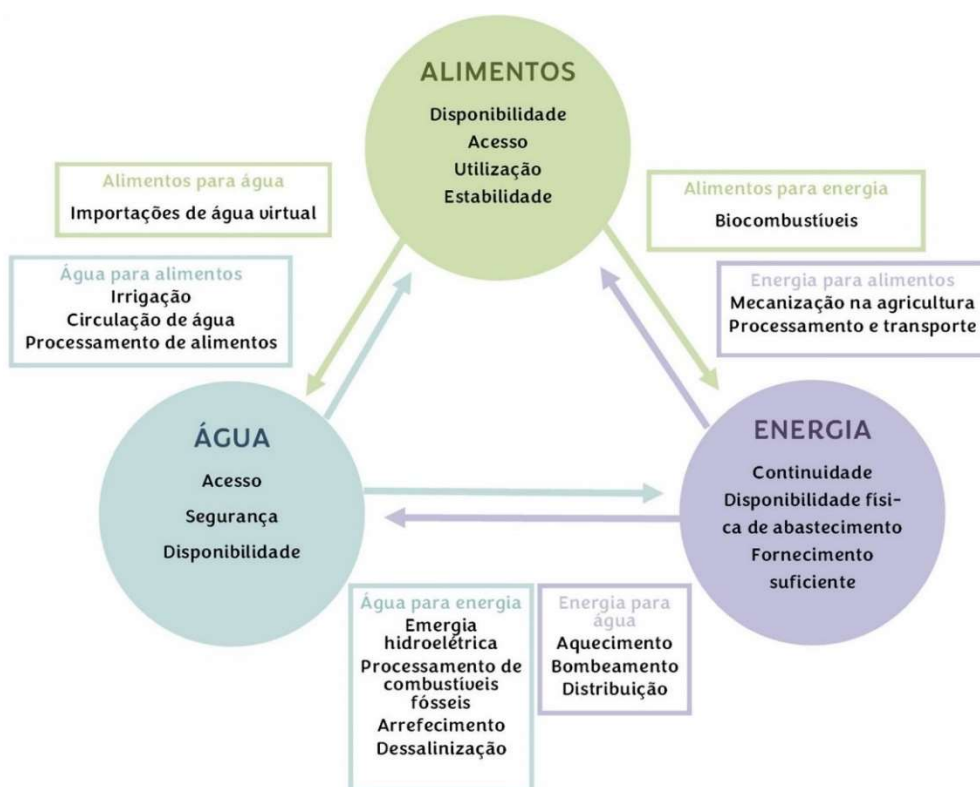


Figura 3 - Nexus Alimento-Energia-Água (Adaptado de [19]).

O conceito Nexus Água-Energia-Alimento foi apresentado no Fórum Económico Mundial em 2008, e consolidado em 2011 na Conferência “*The Water, Energy, and Food Security Nexus - Solutions for the Green Economy*”. O conceito realça a interdependência e interconexão existente entre água, energia e alimentos, e visa a promoção de políticas que considerem os três setores de forma integrada [4].

Também na produção de biocombustíveis importa a gestão integrada dos recursos com os quais se interage. Esta abordagem, na gestão do processo de produção e promoção de biocombustíveis, pode fazer parte da solução para evitar a necessidade de *trade-offs* entre os recursos, minimizar os impactos negativos para os ODS potenciar o cumprimento do Acordo de Paris [20-21].

2.1.5 Produção e consumo de biocombustíveis em Portugal

Em Portugal, conforme representado na Figura 4, a fonte de energia predominante é o petróleo. Uma vez que em território nacional não existem reservas de petróleo, Portugal está dependente, em grande escala, de importações para satisfazer as necessidades energéticas.

As energias renováveis constituem a segunda fonte de energia com maior relevo em termos de consumo de energia primária em Portugal [22].



Figura 4 - Consumo de energia primária por tipo de fonte de energia (Portugal, 2021) (Adaptado de [22]).

A produção de biomassa assume um importante papel para as energias renováveis em Portugal, assumindo-se, em 2021, como a principal fonte de energia renovável, com 43%. No entanto os biocombustíveis representam somente 6% do contributo para as energias renováveis em Portugal (Figura 4) e, conforme representado na Figura 5, apenas uma pequena parte deste total é considerada elegível para a contabilização dos biocombustíveis avançados, sendo que o restante não consta da Parte A do Anexo IV do Decreto-Lei n.º 117/2010, de 2 de Outubro, na redação que lhe é dada no Decreto-Lei n.º 8/2021, de 20 de Janeiro [22].

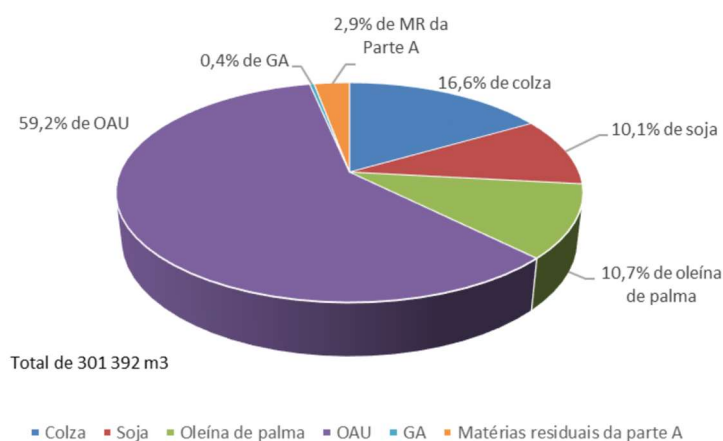


Figura 5 - Matéria-prima (% em volume) utilizada na produção de biocombustíveis (FAME e HVO), 2020, Portugal [12].

A Figura 6 evidencia que, no ano de 2022, os biocombustíveis com maior percentagem de incorporação foram os substitutos de gasóleo, como o FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) e o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oils*). O facto de existir em Portugal algumas empresas que se dedicam à produção de biocombustíveis substitutos de gasóleo, pode explicar que os valores

de incorporação de biocombustíveis em gasóleo sejam muito superiores aos valores de incorporação em gasolina. Com efeito, em Portugal, a incorporação de biocombustíveis na gasolina tem dependido da sua importação [12].

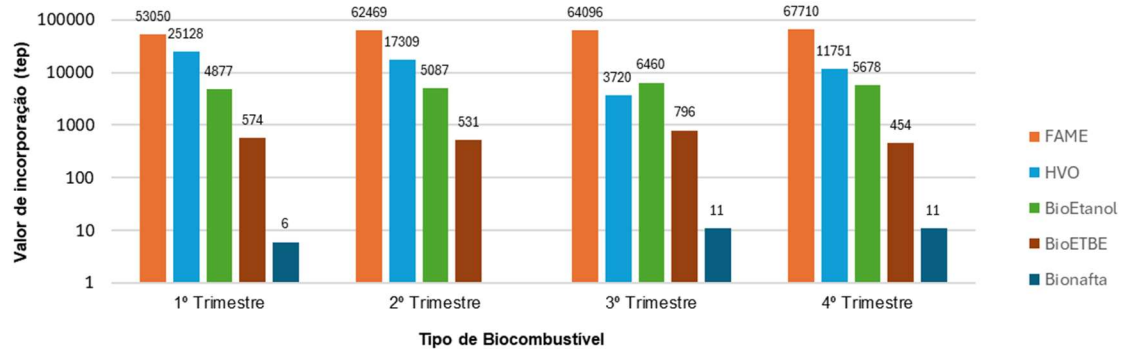


Figura 6 - Incorporação de biocombustíveis nos combustíveis rodoviários, Portugal, 2022 (tep) (Adaptado de [23]).

A percentagem de incorporação de biocombustíveis em Portugal está ainda bastante abaixo dos 11% que constituem a meta obrigatória (Figura 7). Assim, a criação de condições para a produção de biocombustíveis reveste-se da maior importância e interesse, sendo evidente o potencial de crescimento para produção e consumo de biocombustíveis.

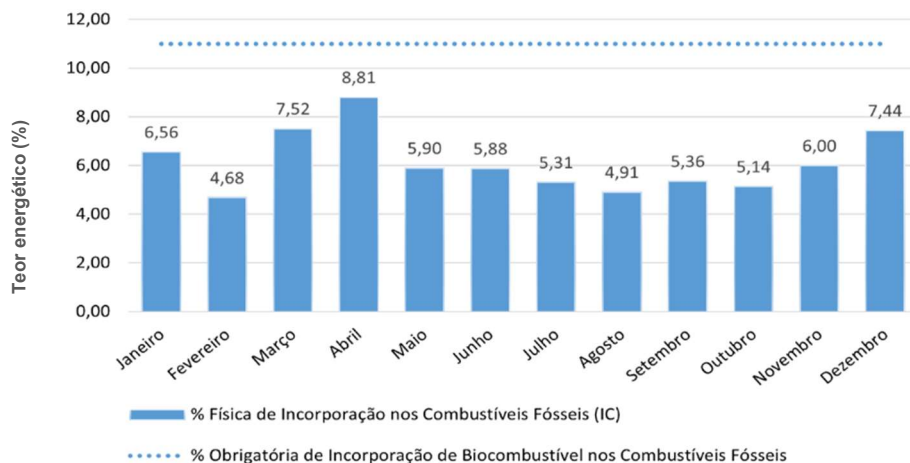


Figura 7 - Incorporação Física Mensal de Biocombustível em 2022 (%) (Adaptado de [24]).

2.2 SOLOS MARGINAIS

2.2.1 Importância e definição

A dificuldade do acesso à terra para cultivo de plantas energéticas sem comprometer a segurança alimentar e a produção de rações ou os ecossistemas existentes, é um

constrangimento significativo para a produção de biocombustíveis e, por conseguinte, para o cumprimento das metas estabelecidas nos acordos e objetivos assumidos por Portugal.

Neste contexto, muito se tem estudado a ideia de utilização de terras sem aptidão agrícola, generalizadamente denominadas como terras marginais, para crescimento de culturas energéticas visando a produção de biocombustíveis ou outras formas de bioenergia [25-28].

A investigação do potencial de utilização de solos marginais tem sido fundamentada por estudos como o levado a cabo por Perpiña Castillo et al., 2018, onde se refere que cerca de 11% das terras agrícolas europeias se encontram em elevado risco de abandono, no período 2015-2030 [29]. Nesse estudo, Portugal é referido como um dos países onde o risco de abandono de terras agrícolas é mais severo. Efetivamente, a desertificação, enquanto degradação do solo que afeta negativamente os territórios a nível demográfico e económico previsto é uma realidade já registada em Portugal [30] (Figura 8).

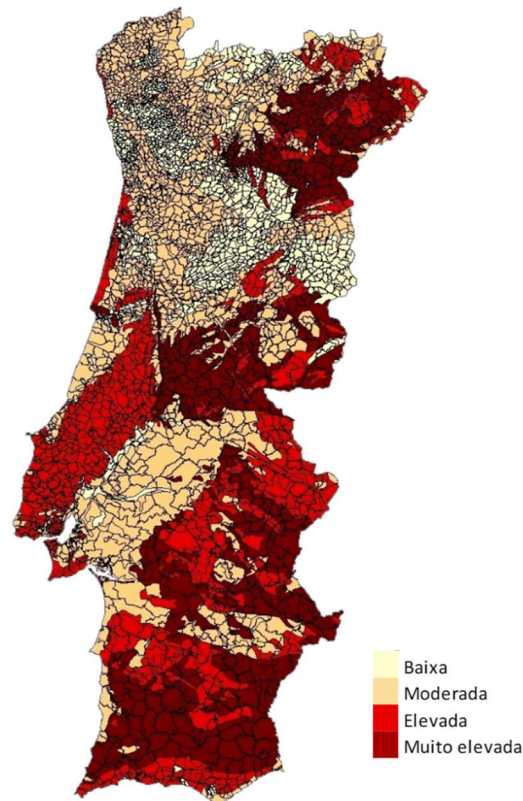


Figura 8 - Suscetibilidade dos solos à desertificação (IDRH, EAN, 2003, adaptado por [30]).

Em 2018, a UE detinha já 14,8% de território agrícola classificado como “sem uso e terrenos abandonados” (Figura 9), enquanto a área classificada como “agrícola” não chegava aos 40% [31].

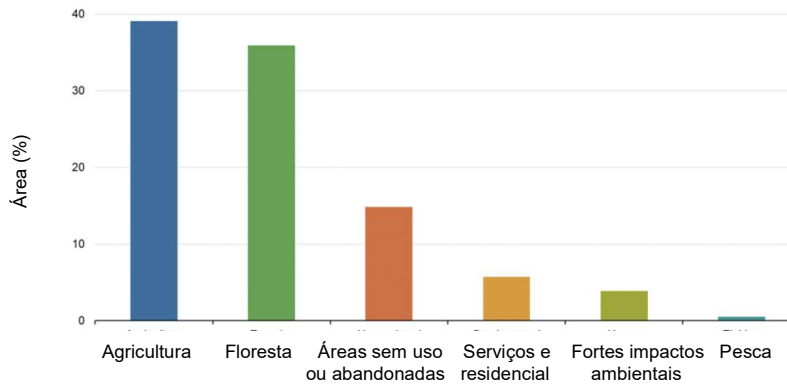


Figura 9 - Tipos de uso do solo na UE, 2018 (Adaptado de [31]).

A Diretiva RED estabeleceu critérios de sustentabilidade para a produção de biocombustíveis e biolíquidos para os transportes, promovendo o uso de solos degradados e contaminados, a fim de mitigar os impactos negativos para o ambiente que advêm das alterações indiretas do uso do solo [11]. A produção de culturas energéticas para biocombustíveis em solos marginais, pode, desta forma, satisfazer os critérios de sustentabilidade, viabilizando a contabilização dos biocombustíveis produzidos para as metas estabelecidas pela UE.

O conceito “solos marginais” assumiu diversas definições ao longo do tempo, dependendo da abordagem feita. Apesar da falta de entendimento comum, é generalizadamente aceite que a marginalidade de um solo depende do fim a que se destina, ou seja, um solo pode ser considerado marginal para determinada cultura, no entanto para uma outra cultura diferente pode ser perfeitamente apto [25, 32-33].

A dificuldade na definição de solos marginais prende-se com os critérios de classificação, que variam consoante o autor. Segundo Khanna et al., 2021, os critérios mais utilizados na caracterização dos solos marginais são:

- Características biofísicas, como fatores físicos e químicos da qualidade do solo, produtividade ou degradação da terra;
- Características de uso da terra, nomeadamente abandono de terra, pousio, zona tampão ou terra convertível sem cultivo;
- Características económicas, cultivo economicamente não rentável.

2.2.2 Quantificação e mapeamento de solos marginais em Portugal

A comunidade científica tem produzido um grande número de estudos sobre produção de culturas energéticas em solos marginais, identificando e mapeando as áreas marginais no território europeu, nomeadamente, o projeto SEEMLA - *Sustainable Exploitation of Biomass for*

Bioenergy from Marginal Lands (2016-2018) [34] e *MAGIC - Marginal Lands for Growing Industrial Crops* (2017-2021) [5]. Estes projetos levaram a cabo investigações que envolveram a avaliação e quantificação da extensão de terras marginais na Europa.

Para o projeto SEEMLA, a definição de solos marginais incluiu *“principalmente locais que foram afetados por processos de degradação, na maioria dos casos desencadeados por impacto antropogénico. Estes locais apresentam claras ineficiências económicas no que diz respeito à utilização agrícola e más condições ecológicas do local, como indicado pela obviamente reduzida fertilidade do solo. (...) não incluem locais com produtividade potencialmente elevada que foram reservados ou temporariamente abandonados devido a razões socioeconómicas, (...) terras áridas com fertilidade de solo naturalmente extremamente baixa, bem como a maior parte de áreas abandonadas ou terrenos baldios antropogénicos (...). A infertilidade destes últimos locais é considerada um claro obstáculo para uma produção rentável de biomassa”*. Na classificação dos solos marginais os investigadores do SEEMLA tiveram em conta eventuais conflitos com outros usos da terra, nomeadamente proteção da natureza, silvicultura ou agricultura. Para o mapeamento das terras marginais foi utilizado um sistema de informação geográfico (SIG) baseado no índice *Muencheberg Soil Quality Rating* (SQR), incluindo critérios biofísicos, como qualidade do solo, topografia e clima. O SEEMLA identificou 45% do território europeu como terra marginal (Figura 10 - Direita), contabilizando 13% (63 Mha) dessa área como disponível para produção de biomassa, devido a restrições de conservação da natureza e outras políticas em vigor [35].

Por seu lado, no âmbito do projeto MAGIC, foi assumido que as terras marginais estão localizadas em áreas que já tiveram aptidão agrícola, e que não desempenham outras funções como usos urbanos, conservação da natureza, silvicultura ou outros, a definição de solos marginais consistiu em: *“terra com limitações que, no seu conjunto, são severas para a aplicação sustentada de um determinado uso e/ou são sensíveis à degradação do solo, como resultado de intervenção humana inadequada, e/ou já perderam parte ou toda a sua capacidade produtiva como resultado de intervenção humana inadequada (...) incluem também, locais contaminados e potencialmente contaminados que constituem um risco potencial para os seres humanos, a água, os ecossistemas ou outros receptores”* [36]. O projeto MAGIC classificou assim 29% (69 Mha) de território europeu como terra marginal, anteriormente com aptidão agrícola (Figura 10 - Esquerda).

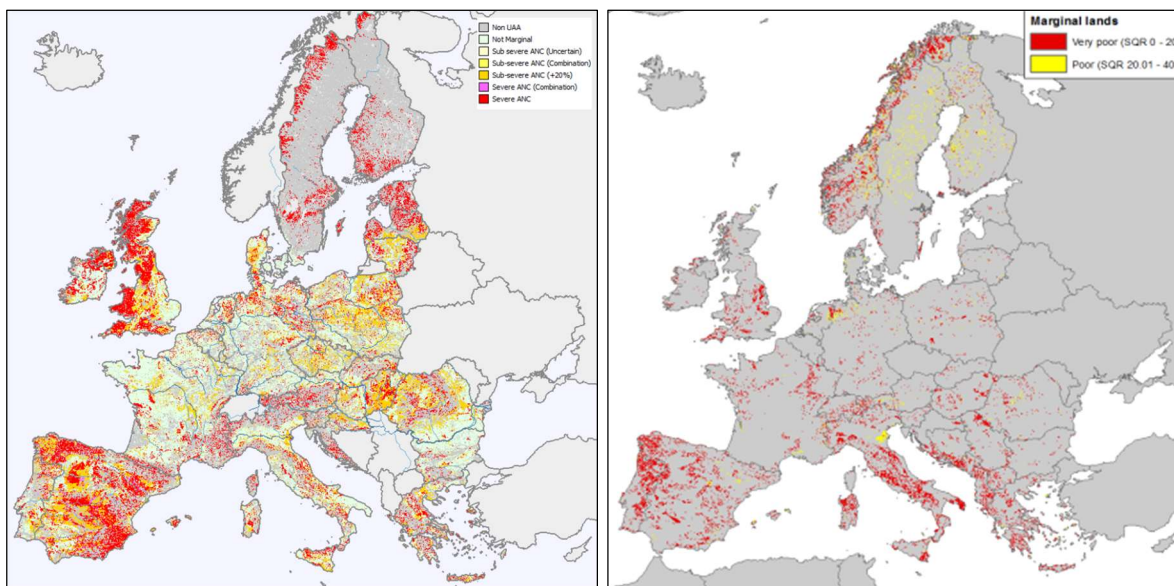


Figura 10 - Mapeamento de solos marginais na Europa (Esquerda: MAGIC [37] / Direita: SEEMLA) [38].

Para o presente trabalho, foram utilizados os dados referentes a Portugal recolhidos pelo projeto MAGIC (Tabela 1), pelo facto de consistirem na análise e mapeamento de terras marginais em território europeu mais recente.

Tabela 1 - Solos Marginais em Portugal (Adaptado de MAGIC [36]).

Fator de constrangimento	Área Solo Marginal (km ²) *	Solo Marginal (%)	Solo não marginal (%)
Clima Adverso	371	1%	99%
Humidade excessiva do solo	76	0%	100%
Condições químicas adversas	1.666	3%	97%
Baixa fertilidade do solo	1	0%	100%
Más condições de enraizamento	11.191	21%	79%
Condições adversas do terreno	4.356	8%	92%
TOTAL	13.726	26%	74%

*Área que esteve em uso agrícola (de acordo com o Corine Land Cover (CLC) entre 1990 e 2012)

A Figura 11 representa o mapa concebido pelo MAGIC evidenciando a marginalidade dos solos agrícolas na UE. A marginalidade dos solos foi agrupada por classes e identificada ao nível das unidades administrativas locais, designadas por LAU 2 (*Local Administrative Units*). As LAU constituem um sistema de unidades administrativas criadas pelo Serviço de Estatística da União Europeia (*Eurostat*) de forma a dar resposta à necessidade de produzir estatísticas

locais em toda a União Europeia, permitindo a integração com as NUTS (Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos). Até 2016 existiram dois níveis de LAU, LAU 1 e LAU 2, correspondendo, em Portugal, aos Concelhos e Freguesias, respetivamente. Desde 2017, apenas permanece um nível de LAU, correspondendo ao nível inferior LAU 2 [39].

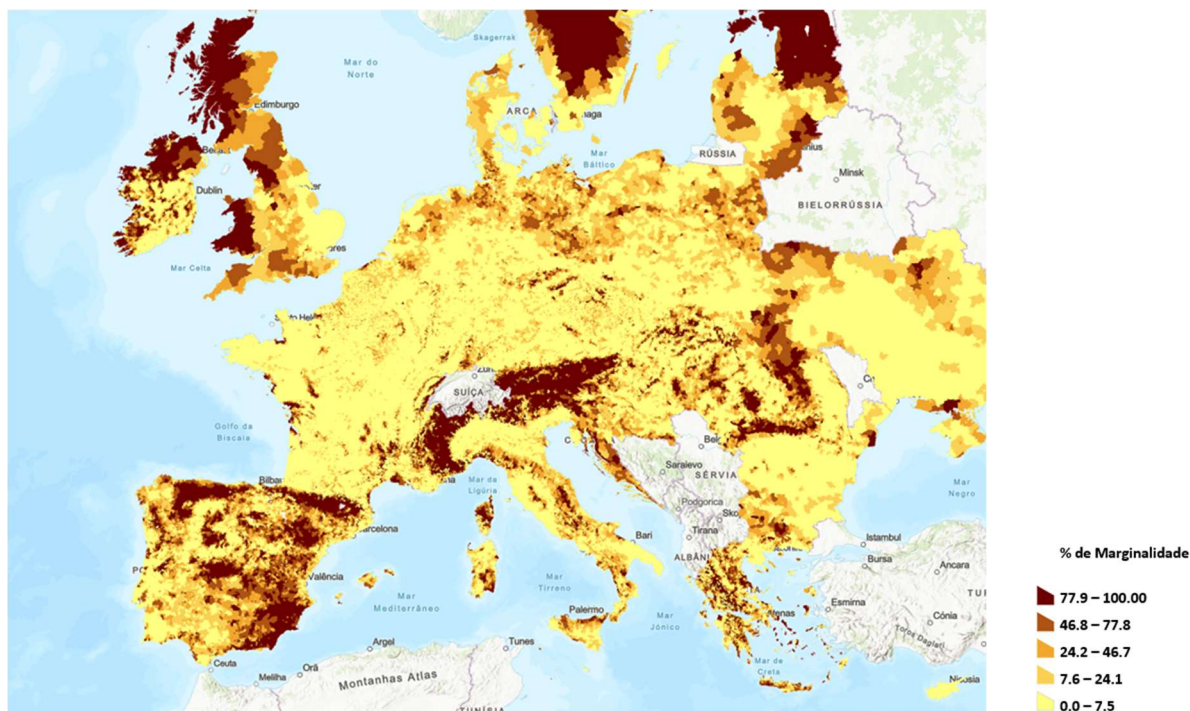


Figura 11 - Marginalidade dos solos agrícolas na UE [5].

2.2.3 Solos marginais para a produção de culturas energéticas - Breve análise SWOT

A utilização de solos marginais para a produção de culturas para bioenergia apresenta vários benefícios associados à qualidade do solo, ao desenvolvimento rural, impactos ambientais positivos, apresentando ainda a mais-valia de não colocar em causa a segurança alimentar. No entanto, o uso de solos marginais também acarreta alguns desafios e impactos negativos.

A Tabela 2 apresenta uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), não exaustiva, do uso de solos marginais para produção de culturas industriais, listando alguns dos pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças associados à sua utilização.

Tabela 2 - Análise SWOT, não exaustiva, do uso de solos marginais para produção de culturas energéticas [40-41].

Pontos fortes	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidade de terreno - Segurança alimentar - Segurança energética - Desenvolvimento rural e da economia local - Aptidão para produção de culturas energéticas - Benefícios ambientais (solo, ecossistemas, erosão, sumidouro de carbono biodiversidade) 	<ul style="list-style-type: none"> - Metas e legislação a nível de Energias Renováveis - Procura de alternativas aos combustíveis fósseis - Necessidade de garantir a independência e segurança energética - Contributo para a bioeconomia - Resiliência às alterações climáticas – plantas mais resistentes
Fraquezas	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> - Viabilidade económica - Baixa produtividade - Custos elevados de produção - Distância às refinarias - Incerteza do impacto ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> - Riscos naturais - Alterações climáticas - Mão-de-obra - Custo

2.3 CULTURAS ENERGÉTICAS

2.3.1 Culturas energéticas como fonte alternativa de biomassa para biocombustíveis

Como já referido, atendendo à necessidade de fomentar uma alternativa limpa e sustentável aos combustíveis fósseis, os biocombustíveis com origem em culturas energéticas assumem um importante papel.

Cultura energética pode ser definida como *“qualquer material vegetal plantado ou cultivado com a finalidade de produzir grande volume de biomassa utilizada posteriormente na produção de diferentes tipos de biocombustíveis”* [42].

A constituição da biomassa das culturas energéticas conduz à sua classificação em três categorias [42-44]:

- Culturas glucídicas (sacarinas e amiláceas) – espécies vegetais cuja composição contém elevados teores de açúcar (ex.: cana-de-açúcar, batata, sorgo)
- Culturas oleaginosas – espécies vegetais constituídas por elevados teores de óleos vegetais (ex.: colza, girassol, amendoim)
- Culturas lenhocelulósicas – espécies vegetais constituídas maioritariamente por fibras de celulose, hemicelulose e lenhina, caracterizada por uma elevada produção de matéria seca que permite o seu uso numa ampla gama de utilizações energéticas (ex.: painço, salgueiro, choupo)

De entre os tipos de culturas energéticas mencionados, a produção e utilização de culturas glucídicas e oleaginosas, por serem espécies alimentares, está limitada e é desencorajada por via da legislação europeia transposta para o direito nacional [13, 45]. O enfoque nas culturas energéticas para produção de biocombustíveis de segunda geração deverá assim incidir nas culturas energéticas lenhocelulósicas, também denominadas culturas dedicadas ou industriais, por não serem adequadas para consumo humano ou animal.

Assim, de forma que a produção de culturas para fins energéticos seja viável e sustentável, têm sido amplamente estudadas as características de várias espécies vegetais de forma a identificar as que melhor se adequam para produção de biomassa com destino a bioenergia. A investigação científica reuniu um conjunto de critérios de seleção que permite identificar as culturas que podem ser consideradas energéticas, entre os quais se destaca [43-44, 46-48]:

- elevados e constantes níveis de rendimento (quantidade e qualidade);
- conteúdo de matéria na época da colheita;

- adaptação às condições edafo-climáticas;
- rendimento competitivo em relação às culturas tradicionais;
- baixa necessidade energética de produção;
- baixo custo económico;
- reduzida necessidade de nutrientes;
- resistência a pestes, doenças e secas;
- elevada densidade energética das plantas (MJ.kg^{-1});
- eficiência no uso da água;
- facilidade de colheita e armazenamento;
- resistência a adversidades bióticas e abióticas.

A adaptabilidade das culturas energéticas é determinada também pelas características das regiões onde são cultivadas. A FAO (*Food and Agriculture Organization*) em conjunto com o IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*), desenvolveram, ao longo dos últimos anos, uma metodologia que determina zonas agroecológicas com base nas características de clima, solo e topografia que podem condicionar a prática agrícola [49]. Na prossecução do trabalho desenvolvido, os cientistas do projeto MAGIC criaram um mapa que caracteriza as zonas marginais da Europa para produção de culturas energéticas. A identificação das zonas agroecológicas marginais permitiu selecionar as culturas industriais mais adequadas a esses locais [36]. Alexopoulou listou algumas das culturas que melhor se adequam aos solos marginais europeus, e apresentou algumas das suas características [50] (ANEXO I).

2.3.2 Culturas energéticas lenhocelulósicas

As culturas energéticas lenhocelulósicas são atrativas para a produção de biomassa destinada a biocombustíveis por existirem em abundância e a baixo custo, além de não terem vocação alimentar. A sua produção, de uma forma generalizada, é viável em solos sem aptidão para a agricultura, como os solos marginais, não representando, assim, risco de alteração indireta do uso solo ou ameaça à segurança alimentar [42].

As espécies lenhocelulósicas possuem paredes celulares constituídas por fibras de celulose, inseridas numa matriz de polissacarídeos não celulósicos, nomeadamente hemicelulose e lenhina (Figura 12). A estrutura da parede celular das espécies lenhocelulósicas é, por esse

motivo, caracterizada como uma complexa barreira de acesso à celulose, que lhe atribui um carácter recalcitrante, impedindo a degradação pelas enzimas. Para a extração das moléculas-alvo da lenhocelulose é necessário recorrer-se a procedimentos e tecnologias específicos que destroem as paredes celulares das espécies vegetais, denominados por pré-tratamento [51].

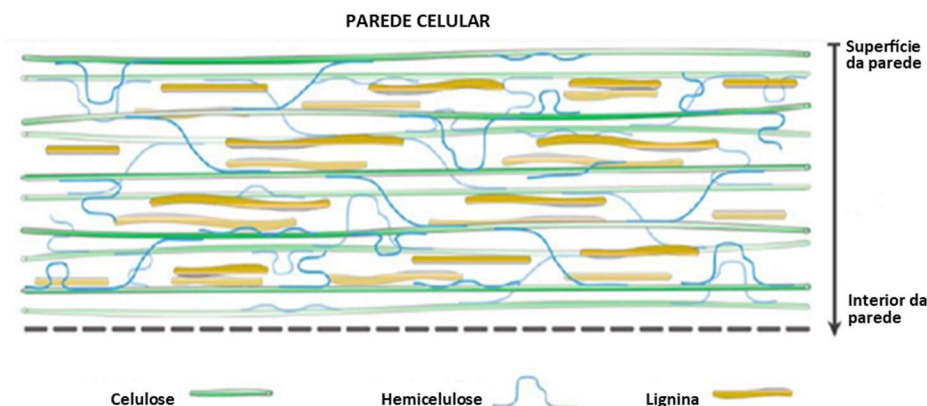


Figura 12 - Estrutura da parede celular de espécie lenhocelulósica (adaptado de [51]).

Segundo Abreu et al., 2020 podem considerar-se duas categorias de culturas lenhocelulósicas:

- **Culturas gramíneas herbáceas** – são caracterizadas por um teor menor em lenhina e maior teor em nutrientes. As quantidades de celulose e hemicelulose presentes nas espécies herbáceas garantem a possibilidade de produção de bioetanol de segunda geração. Estas culturas podem ser cortadas anualmente, e os rizomas deixados no solo permitem o crescimento contínuo por 15 anos ou mais, sendo, por este motivo, também encaradas como culturas perenes (ex.: painço e miscanto);
- **Culturas florestais como a talhadia de ciclo curto** – consideram as espécies lenhosas de crescimento rápido e de ciclo curto. A duração da plantação destas espécies chega aos 25 anos e normalmente, têm períodos de corte e regeneração a cada três a cinco anos, proporcionando rendimentos elevados em curtos períodos. Caracterizam-se por um teor maior em lenhina e menor em nutrientes (ex.: salgueiro e choupo).

2.3.3 Vantagens e desvantagens de culturas energéticas lenhocelulósicas

As vantagens e benefícios associados à produção de culturas lenhocelulósicas ultrapassam a produção de biocombustíveis. As características deste tipo de culturas proporcionam também mais valias ao nível do ambiente, economia e desenvolvimento rural [52]. Estas culturas contribuem para a melhoria da qualidade do solo ao nível da estrutura, fertilidade e controlo da erosão [53]. Desempenham ainda um papel de fitorremediação em solos contaminados ou

depuração de cursos de água poluídos, pela elevada capacidade para sequestrar contaminantes, nomeadamente metais pesados como o cádmio (Cd), chumbo (Pb), zinco (Zn), cobre (Cu) e outros poluentes dos solos e da água [46]. Relativamente ao impacto na biodiversidade, existem estudos contraditórios quanto aos benefícios, sendo que alguns estudos associam a produção de plantas energéticas a ameaças para a biodiversidade. Estes impactos negativos variam de acordo com o tipo de terra onde é feito o cultivo, e são apresentados como mais severos em terras agrícolas ou no cultivo de plantas energéticas para biocombustíveis de primeira geração. Ainda assim, em terras marginais, o cultivo de plantas energéticas parece representar também alguns efeitos negativos para a biodiversidade [53]. O facto de se tratar de culturas resilientes, com consumo eficiente de água e baixas necessidades de nutrientes faz com que sejam mais adequadas ao cultivo em solos marginais [54].

2.3.4 Culturas energéticas em Portugal

Como já referido, a produção industrial de culturas energéticas em Portugal para produção de biocombustíveis avançados de segunda geração é inexistente, apesar de cerca de 85% do território continental de Portugal ser coberto por vegetação. A produção de biocombustíveis em Portugal é maioritariamente proveniente de óleos alimentares usados e destina-se à produção de FAME e HVO, substitutos de gasóleo [12].

O projeto MAGIC estudou e selecionou o conjunto de plantas consideradas mais promissoras para produção de energia adaptadas às condições dos solos marginais da Europa [55]. Inicialmente foram abordadas 67 culturas industriais, com fundamentação em bases de dados e/ou projetos científicos. Os investigadores obtiveram a lista final de 20 culturas energéticas mais adequadas aos solos marginais em estudo, através de uma análise multicritério, em que cinco critérios, com um peso pré-determinado, foram pontuados de 1 a 5 por todo o consórcio (Figura 13). Os critérios analisados consistiram em:

- a) experiência com a gestão agrícola das culturas industriais propostas;
- b) produtividade da cultura para aplicações industriais (de acordo com os principais usos);
- c) desempenho esperado das culturas em terrenos marginais;
- d) necessidades da indústria;
- e) oportunidades de mercado.

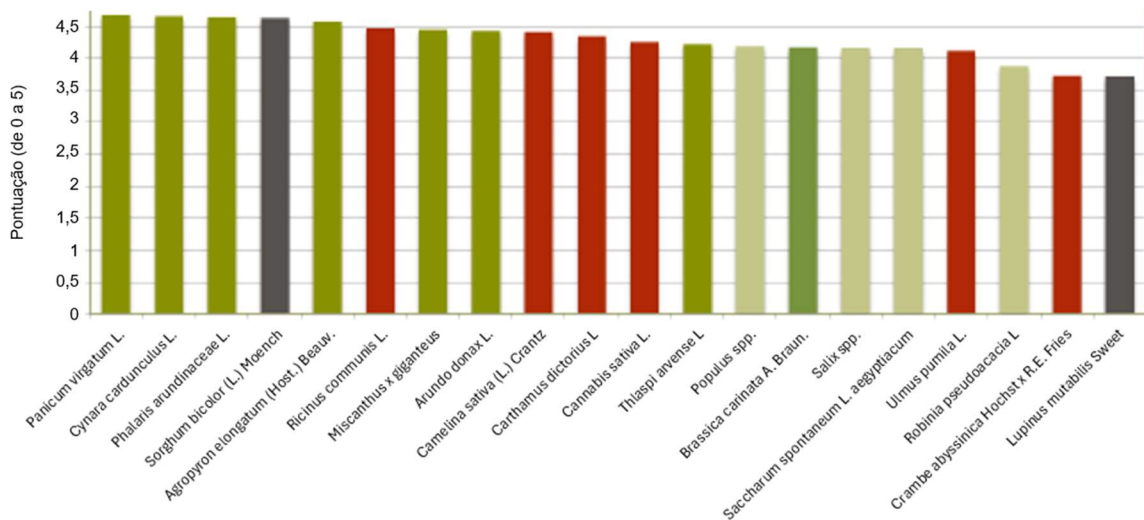










Figura 13 - Lista das 20 culturas energéticas mais promissoras, obtidas pelo projeto MAGIC através de análise multicritério (Adaptado de [55]).

Para este trabalho, a seleção das culturas energéticas baseou-se no estudo desenvolvido pelo projeto MAGIC, contudo foram descartadas as culturas energéticas que de alguma forma poderiam competir com a produção de alimentos e rações, por exemplo o sorgo; estão identificadas como invasoras em Portugal, nomeadamente as acácias, ou apresentam constrangimentos legais de plantação como o cânhamo [56]. Desta forma, as espécies em análise foram oito, cujas principais características se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 - Culturas energéticas em estudo e suas principais características (Adaptado de [55, 57-58]).

Cultura Energética		Necessidade hídrica (mm/ano ou mm/época de crescimento para anuais)	Produtividade (t/ha/ano de matéria seca)	Poder calorífico Superior (PCS) (MJ/kg)
<p><i>Miscanthus × giganteus</i> (Miscanto) [59]</p>  		600-1000 - adaptada	40	17,5
<p><i>Panicum virgatum L.</i> (Painço) [60]</p>  		500-600 - adaptada 600-1000 - muito adaptada	15	18,8
<p><i>Phalaris arundinacea L.</i> (Caniço-malhado) [61]</p>  		800-1000 - adaptada	4,7	17,3
<p><i>Populus spp.</i> (Choupo) [62]</p>  		800-1000 - adaptada	7	19,6

Saccharum spontaneum
(Cana-de-açúcar selvagem) [62]



400-500 - adaptada
500-1000 - muito adaptada

20

17

Salix spp.
(Salgueiro) [63]



800-1000 - adaptada

20

17

Ulmus pumila L.
(Ulmeiro siberiano) [61]



400-500 - adaptada
500-1000 - muito adaptada

7,5

18,2

Thinopyrum ponticum [64]



300-400 - adaptada
400-1000 - muito adaptada

9,5

17,9

2.4 ÁGUAS RESIDUAIS TRATADAS

2.4.1 Definição e enquadramento legal das águas residuais tratadas

Ao longo da história, o tratamento de águas para abastecimento público, e de águas provenientes da drenagem de águas residuais (AR), tem evoluído significativamente, pondo fim a epidemias com graves consequências na saúde pública e ambiental [65].

O saneamento básico é um direito humano reconhecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) [66-67], está previsto nas diretrizes europeias transpostas para a legislação nacional e é um dos 17 ODS da Agenda 2030 [68].

O saneamento básico é constituído por um conjunto de etapas de gestão das AR que permitem que as mesmas sejam conduzidas para ETAR. Após o tratamento adequado, as AR podem ser rejeitadas no meio recetor [69]. No entanto, atendendo à pressão dos recursos hídricos que atualmente se verifica, a reutilização das águas residuais tratadas afigura-se como uma potencial alternativa para combater a escassez hídrica e fazer face à procura cada vez maior, nomeadamente no setor agrícola, que consome cerca de 70% do total de água a nível mundial, sendo o setor que regista maiores consumos de água [70].

Em 2024 foi aprovado o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais e Pluviais 2030 (PENSAARP 2030) para o período 2021-2030, que estabelece uma meta de 10% de produção de água para reutilização para 2026, e de 20% para 2030 [71]. Com efeito, o Programa de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (P-3AC), aprovado em 2019 pelo Conselho de Ministros, estabelece a reutilização de ART na agricultura como uma das boas práticas de gestão de água a adotar neste setor, para prevenção dos impactos de seca e escassez de água [72].

Não obstante a importância de reutilização de ART, importa não descurar a necessidade de manter os caudais ecológicos mínimos em cursos de água superficial, o que pode depender de descargas de ART nos meios recetores [73].

As águas residuais podem, desta forma, ser um relevante contributo para o cumprimento dos ODS, designadamente o ODS 6 - "Assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos".

Segundo o Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Julho, na sua versão consolidada, relativo ao tratamento de águas residuais urbanas, as águas residuais podem diferenciar-se em águas residuais domésticas provenientes de residências e serviços, águas residuais industriais resultantes de qualquer tipo de atividade, não consideradas águas residuais nem pluviais, ou águas residuais urbanas que incluem as águas residuais urbanas, ou uma mistura destas com águas residuais industriais e/ou água pluviais [45].

O tratamento de água residuais promovidos em ETAR, consiste em operações e processos unitários, que permitem a remoção de substâncias poluentes e microrganismos patogénicos de forma que o efluente produzido seja uma ART com características adequadas para descarga no meio recetor ou reutilização, sem efeitos adversos para a saúde pública ou para o ambiente [65].

Os tratamentos realizados pelas ETAR podem ser mais ou menos complexos de acordo com a qualidade de água exigida para o destino final que se pretende dar aos efluentes [65]. A Figura 14 representa as diferentes etapas de tratamento:

- Tratamento preliminar – remoção de poluentes sólidos grosseiros (gradados, tamisados areias e gorduras) de forma a proteger os processos de tratamento subsequentes;
- Tratamento primário – remoção de sólidos suspensos facilmente sedimentáveis reduzindo pelo menos 20% a CBO₅ e pelo menos 50% das partículas sólidas em suspensão. Ocorre por processo físico e ou químico, geralmente através de sedimentação/decantação ou, menos regularmente, por flotação ou com coagulação química;
- Tratamento secundário – realizado geralmente por processos biológicos e físico-químicos como decantação e coagulação-floculação, de forma a cumprir os valores de qualidade da água definidos no Decreto-lei n.º 152/97;
- Tratamento terciário – remoção de nutrientes como compostos de azoto e/ou fósforo, protegendo o meio recetor de risco de eutrofização bem como de microrganismos patogénicos. Este tratamento é requerido quando a descarga do efluente ocorre em meio recetor sensível, segundo classificação do Anexo II do Decreto-lei n.º 152/97;

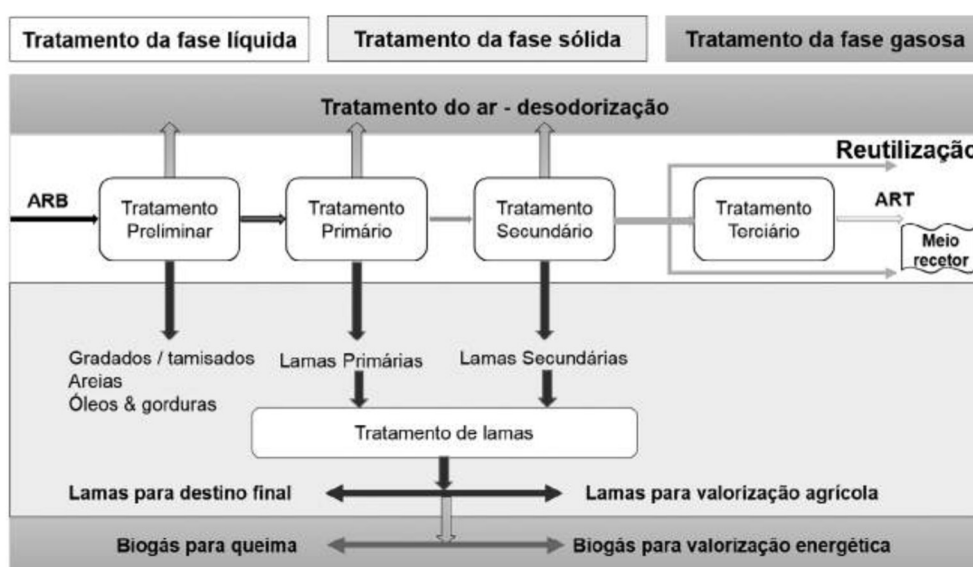


Figura 14 - Esquema de tratamentos de águas residuais [65].

2.4.2 Reutilização de águas residuais tratadas

O facto de a água doce ser um recurso renovável, não invalida que o mesmo seja limitado e, não obstante as AR serem sujeitas a tratamento, os efluentes rejeitados pelas ETAR, podem também representar um aumento de pressão sobre os recursos hídricos, na medida em que nem todos os componentes das AR são eliminados através do tratamento mais comum, o tratamento secundário [74]. A reutilização de ART afigura-se como uma fonte alternativa de água, que pode ajudar a combater a escassez hídrica e a crescente procura, nomeadamente no setor agrícola, o setor que, como referido, regista os maiores consumos de água a nível mundial [70].

Já em 2012, as AR foram identificadas como “*prioridade na gestão de recursos hídricos*” no programa “Uma Matriz Destinada a Preservar os Recursos Hídricos da Europa”, da Comissão Europeia (CE) [75], sendo uma opção alternativa para irrigação ou fins industriais. A reutilização de AR para rega agrícola é já uma prática antiga. Atualmente, além do setor agrícola, novas atividades têm sido beneficiadas com o recurso a ART. Na UE existem inúmeros casos de sucesso de utilização de ART, nomeadamente em Portugal, como a irrigação de campos de golfe no Algarve ou arrefecimento de superfícies comerciais na Grande Lisboa [76]. Contudo a taxa de reutilização de ART é ainda reduzida, conforme apresentado no gráfico da Figura 15.

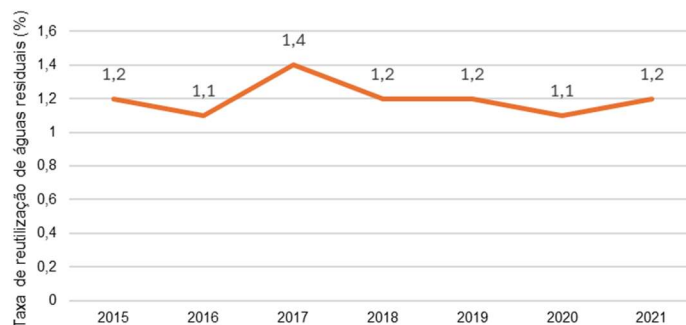


Figura 15 - Evolução de reutilização de águas residuais - Portugal 2015-2021 (%) ([77-83]).

Como mencionado, as ART podem ser reutilizadas em diversas atividades, implicando cada uma delas um tratamento adequado, de forma a evitar repercussões adversas para o ambiente e para a saúde [84].

O Regulamento (UE) 2020/741 do Parlamento Europeu e do Conselho e a Comunicação da Comissão 2022/C 298/01 estabelecem os requisitos e orientações para que a reutilização de ART seja seguro [85-86]. As diretrizes deste regulamento estão, na sua maioria, contempladas no Decreto-lei 119/2019, que estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais. A Tabela 4 apresenta algumas categorias de utilização das ART definidas nesse diploma legal, com indicação do tratamento

requerido, numa abordagem “*fit for purpose*” que considera que “*cada caso é um caso*” e, portanto, o tratamento é adequado ao fim a que se destina.

Tabela 4 - *Nível de tratamento por uso de águas residuais tratadas (adaptado de [84]).*

Classe	Possíveis Usos	Nível de Tratamento
A	Rega sem restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru em que a parte consumível está em direto contacto com a água; rega de jardins públicos sem restrição de acesso; rega de jardins privados	Mais avançado que secundário (desinfeção)
B	Rega com restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos; rega de jardins com restrição de acesso, incluindo áreas de lazer e desportivas (e.g., campos de golfe)	Mais avançado que secundário (desinfeção)
C	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos	Mais avançado que secundário (desinfeção)
D	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes, incluindo sementes para uso industrial ou produção de energia	Mais avançado que secundário (desinfeção)
E	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes; rega de áreas de uso restrito (e.g., sebes, áreas de contenção (prados em socialcos)	Mais avançado que secundário (desinfeção)

Realça-se que a rega de culturas energéticas se insere na “*Classe D – Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes, incluindo sementes para uso industrial ou produção de energia*”, sendo para tal necessário que as AR tenham um “*tratamento mais avançado que o secundário, incluindo desinfeção que inclui a radiação ultravioleta (UV), ozonização, processos por membranas, cloração (apenas admissível para a manutenção do teor residual desinfetante) ou outros processos de oxidação avançada*” [87].

A reutilização de efluentes provenientes de ETAR para rega de culturas energéticas apresenta-se como uma oportunidade com benefícios a vários níveis. Além da redução da pressão sobre os recursos hídricos e poupança da água doce, permite também a redução da aplicação de fertilizantes no solo, contribuindo ainda para a recarga dos aquíferos com menor carga de contaminantes.

A reutilização de águas residuais consiste assim numa abordagem de economia circular, na medida em que, além da própria água, também os nutrientes presentes, como o azoto e fósforo, são reaproveitados para fertilizar os solos aquando da reutilização na atividade agrícola. Em simultâneo surge a vantagem de prevenir o risco impactos ambientais como eutrofização do meio recetor devido à sua rejeição. A reutilização de águas residuais faz parte do Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) da UE, adotado em março de 2020 [88].

Outras estratégias estão igualmente a ser estudadas e implementadas com objetivo de serem alternativa à água doce natural, superficial e subterrânea, nomeadamente a dessalinização de

água do mar, barragens de retenção de águas superficiais ou estruturas de retenção de águas pluviais, contudo a reutilização de ART apresenta vantagens económicas devido aos menores custos de investimento e energia, apresentando também as mais-valias ambientais já referidas [75, 87, 89].

2.4.3 Limitações à reutilização de águas residuais tratadas

A CE identificou como possíveis entraves à reutilização de ART fatores como custos elevados para modernizar as ETAR e falta de incentivos financeiros [86]. No entanto outros aspetos podem estar a contribuir para a pouca adesão a esta fonte de água, nomeadamente a elevada e económica disponibilidade de água bruta natural; normativos técnicos e legais insuficientes para a promoção da reutilização de água; a perceção de que se trata apenas de uma ação complementar ao invés de ser encarada como basilar para uma política ambiental sustentável, com especial enfoque nos recursos hídricos; opinião pública negativa relativamente ao uso de AR e restrições ao uso, nomeadamente no setor agrícola e industrial; eventual distância entre os pontos de produção e de entrega/ aplicação das ART e, também, do ponto de vista da entidade gestora da ETAR, a incerteza da procura, nomeadamente relacionada com a sazonalidade.

Com o propósito de promover e regulamentar a produção de água para reutilização, diversas entidades internacionais estão a desenvolver metodologias visando travar possíveis impactos negativos decorrentes da reutilização das AR, designadamente a OMS - Organização Mundial de Saúde, a ISO – Organização Internacional de Normalização e a CE. As estratégias que estas organizações têm vindo a desenvolver consistem em normas que visam a proteção da saúde humana, a utilização de ART para diversos fins e avaliação de risco para a saúde e ambiente. A CE publicou em 2022 a “Orientação técnica - gestão do risco de reutilização de água para esquemas de irrigação agrícola na Europa” [90].

2.4.4 Águas residuais tratadas na Europa e em Portugal

Em Portugal, a instalação da primeira ETAR data de 1937, em Braga [65]. Contudo, o grande progresso ao nível de tratamento de AR ocorreu apenas a partir da década de 90 com a publicação da Diretiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio de 1991 [91], conhecida por Diretiva das Águas Residuais Urbanas (DARU), transposta para o direito nacional pelo Decreto-lei 152/97 [45].

Esta diretiva, que visa “*proteger o ambiente dos efeitos nefastos das descargas de águas residuais urbanas*”, estabelece as regras relativas à recolha, tratamento e eliminação de AR e determinou que todos os aglomerados populacionais com mais de 2 000 e.p. (equivalente de

população), excetuando zonas sensíveis definidas pelo mesmo diploma legal, devem ser servidos por uma ETAR com tratamento secundário [91]. De facto, o número de ETAR e o nível de tratamento registou um aumento significativo, imposto por via da legislação. A Figura 16 apresenta os níveis de tratamento por ETAR em Portugal em 2018, observando-se uma clara predominância do tratamento secundário na maioria das ETAR. Contudo, à data de hoje, ainda nem toda a população de Portugal continental é servida por sistemas de drenagem ou ETAR.

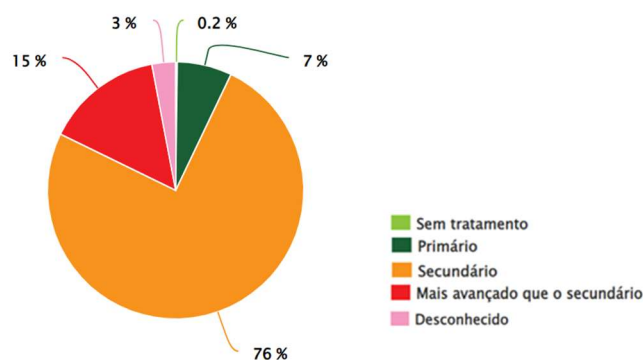


Figura 16 - Níveis de tratamento por ETAR - Portugal 2018 (%) [92].

O reporte da informação relativa à recolha e tratamento de AR é disponibilizado pela Agência Europeia do Ambiente (EEA) através de um mapa interativo com a informação fornecida pelos países da UE-27 e Islândia, referentes ao ano 2020 [93]. A Figura 17 apresenta as ETAR comunicadas pelos EM, diferenciadas por nível tratamento, de onde se realça a predominância de ETAR com nível de tratamento secundário no sul da Europa e, no norte da Europa, com nível de tratamento mais rigoroso.

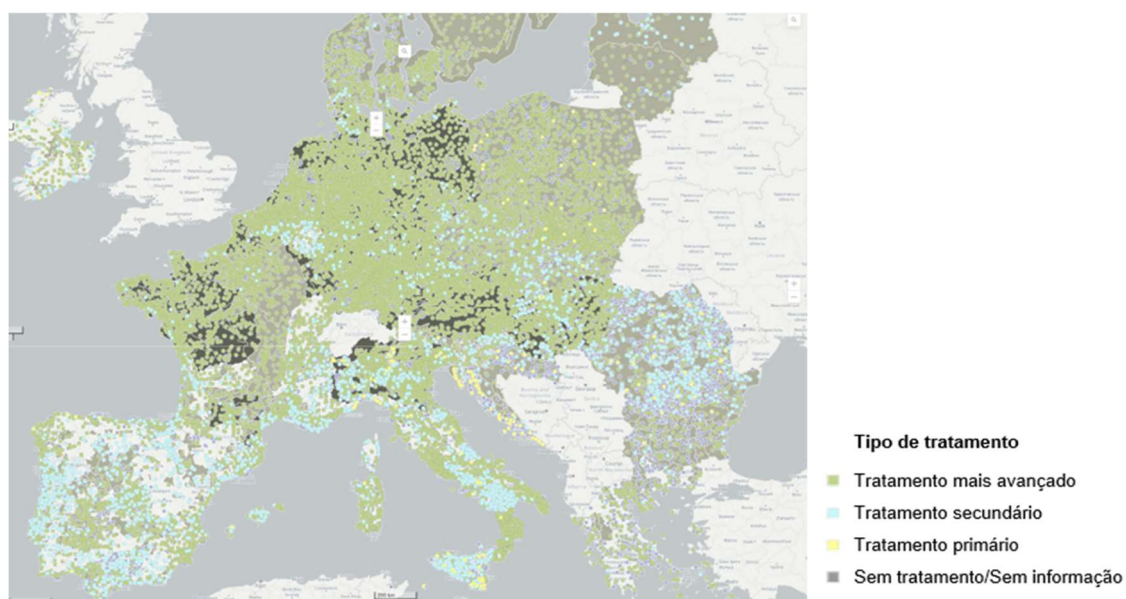


Figura 17 – ETAR, e nível de tratamento, reportadas pelos Estados-membros no âmbito da Diretiva n.º 91/271/CEE, 2020, EU-27 + Islândia (Adaptado de [93]).

A Figura 18 representa em pormenor a distribuição das ETAR, e os seus níveis de tratamento, em Portugal. Tal como nos restantes países da UE-27, observa-se claramente uma maior concentração de ETAR junto das grandes áreas urbanas. No território nacional, estas áreas, localizam-se no litoral do país, onde existem os maiores agregados populacionais.

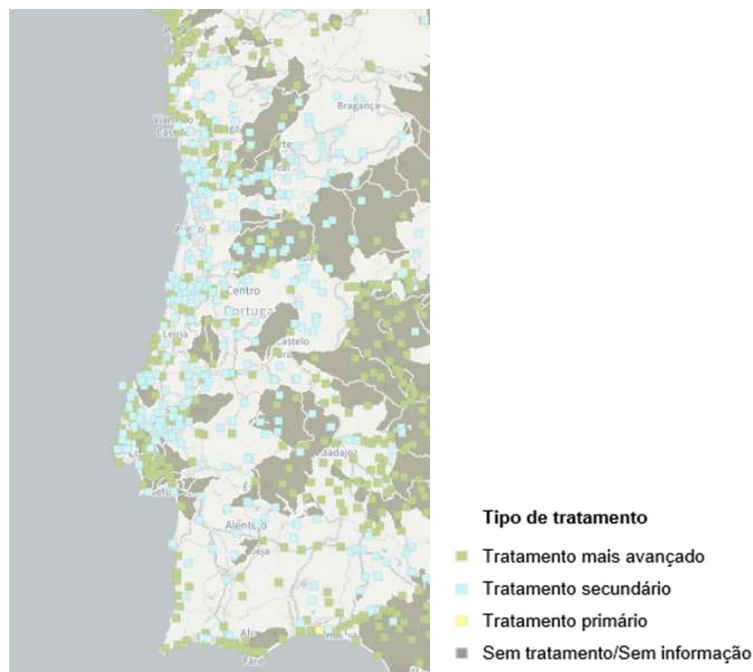


Figura 18 – ETAR, e nível de tratamento, localizadas em aglomerados populacionais com mais de 2.000 e.p.. em Portugal Continental, 2020 (Adaptado de [93]).

Não obstante a DARU obrigar o reporte de ETAR em aglomerados com mais de 2 000 equivalente de população (e.p.), Portugal comunicou também informações de duas ETAR com aglomerados populacionais inferiores, mesmo não sendo exigido.

Com efeito, os dados utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, não contemplaram a grande maioria das ETAR localizadas em aglomerados populacionais com menos de 2 000 e.p.. Considerou-se que a informação destas ETAR poderia ser omitida pelo facto de servirem aglomerados populacionais pequenos e, portanto, com quantidades de ART irrelevantes para este estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA ADOPTADA

Para averiguar o potencial de crescimento de plantas energéticas em solos marginais regadas com ART adotou-se uma metodologia que combinou revisão da literatura e recolha de informação relativa aos três principais componentes em estudo – solos marginais, culturas energéticas e ART. Relativamente aos solos marginais e culturas energéticas, os dados utilizados para a análise foram baseados na investigação feita pelo projeto MAGIC, desenvolvido entre 2017 e 2021. Para o recurso ART, recorreu-se aos dados reportados por Portugal, referentes a 2020, no âmbito da Diretiva 91/271/CEE, disponível no site da EEA. A informação recolhida foi integrada e tratada num sistema de informação geográfica, o *software* ArcGIS *online*.

3.1.1 SIG – Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) definem-se como estruturas que possibilitam “visualizar, questionar, analisar e interpretar dados para compreender relações, padrões e tendências” [94]. Estes sistemas são cada vez mais essenciais na gestão de projetos e tomadas de decisão espacial. Com origem na ciência da geografia, este recurso é utilizado em áreas tão diferentes como agricultura, transportes ou saúde, pelo facto de permitir associar informações a uma localização [94-95].

Um SIG é composto por *hardware*, que permite a recolha, armazenamento, análise e produção de informação e por *software* que executa o processamento da informação espacial, como o ArcGIS. A Figura 19 evidencia as operações associadas ao SIG [95-96].

Recolha de dados - introdução de dados georreferenciados - atributos

Armazenamento – armazenamento de dados sob a forma vetorial (informação sob a forma de polígonos, pontos ou linhas) e *raster* ou matricial (informação baseada em células ou pixéis, como por exemplo as imagens)

Consulta – consulta dos atributos dos dados geográficos nas bases de dados

Análise - resposta a questões relacionadas com a interação das relações espaciais de vários dados



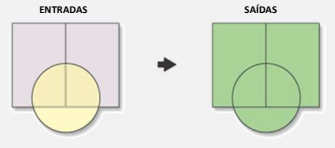
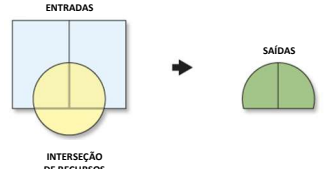
Visualização - identificação visual de relacionamentos espaciais de vizinhança, conexão e proximidade

Saídas – apresentação de resultados como mapas, relatórios e gráficos

Figura 19 - Operações associadas a um SIG [97].

Das várias ferramentas disponibilizadas pelo ArcGIS *online* que permitem operações de visualização e análise, as principais ferramentas utilizadas neste trabalho encontram-se sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais ferramentas do ArcGIS utilizadas neste trabalho (Adaptado de [98]).

Ferramenta	Característica
Filtro	Permite a visualização focada de uma camada de feição ou de imagens, apresentando apenas o pretendido. Um filtro usa uma ou mais expressões de filtro para determinar quais feições ou imagens são apresentadas no mapa. Cada expressão inclui um nome de campo, um operador e um valor.
Buffer	<p>Cria polígonos de <i>buffer</i> em torno de recursos de entrada a uma distância especificada.</p> <p style="text-align: right;">Ferramentas de proximidade</p> 
Apagar	<p>Sobrepõe recursos de entrada com os polígonos dos recursos de apagamento. Somente as partes dos recursos de entrada que estão fora dos recursos de apagamento fora dos limites são copiadas para a classe de recurso de saída.</p> <p style="text-align: right;">Ferramentas de sobreposição</p> 
Unir	<p>Calcula uma união geométrica dos recursos de entrada. Todos os recursos e seus atributos serão gravados na classe de recurso de saída.</p> <p style="text-align: right;">Ferramentas de sobreposição</p> 
Interseção	<p>Calcula uma interseção geométrica dos recursos de entrada. Recursos ou partes de recursos que se sobrepõem em todas as camadas e/ou classes de feição serão gravados na classe de feição de saída</p> <p style="text-align: right;">Ferramentas de sobreposição</p> 

3.1.2 Mapeamento dos solos marginais aptos para produção de culturas energéticas

O projeto MAGIC disponibilizou a informação relativa aos solos marginais em camada de feições geográficas [99], polígonos representativos de LAU 2, que em Portugal correspondem às freguesias, classificados de acordo com a percentagem de marginalidade do solo. A camada referente aos solos marginais foi adicionada no ArcGIS e, com recurso à ferramenta “Filtro”, foram selecionados apenas os solos localizados em Portugal (“CNTR_CODE” é “PT”) e com área de terra marginal diferente de zero (“KM2” não é “0”), resultando na camada apresentada na Figura 20.

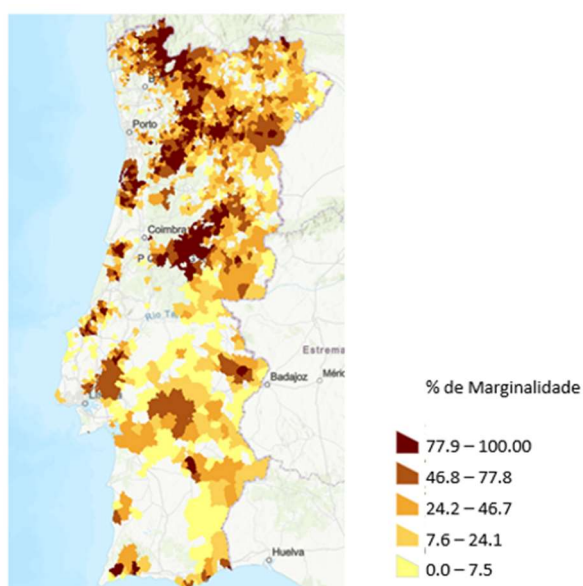


Figura 20 - ArcGIS – Camada de Solos Marginais, com filtro).

3.1.3 Mapeamento das ETAR e da área de viabilidade de rega

No que concerne à componente ART, foi utilizada a informação disponibilizada pela EEA sob a forma de camada de feições [100], através da sua integração no software ArcGIS (Figura 21).

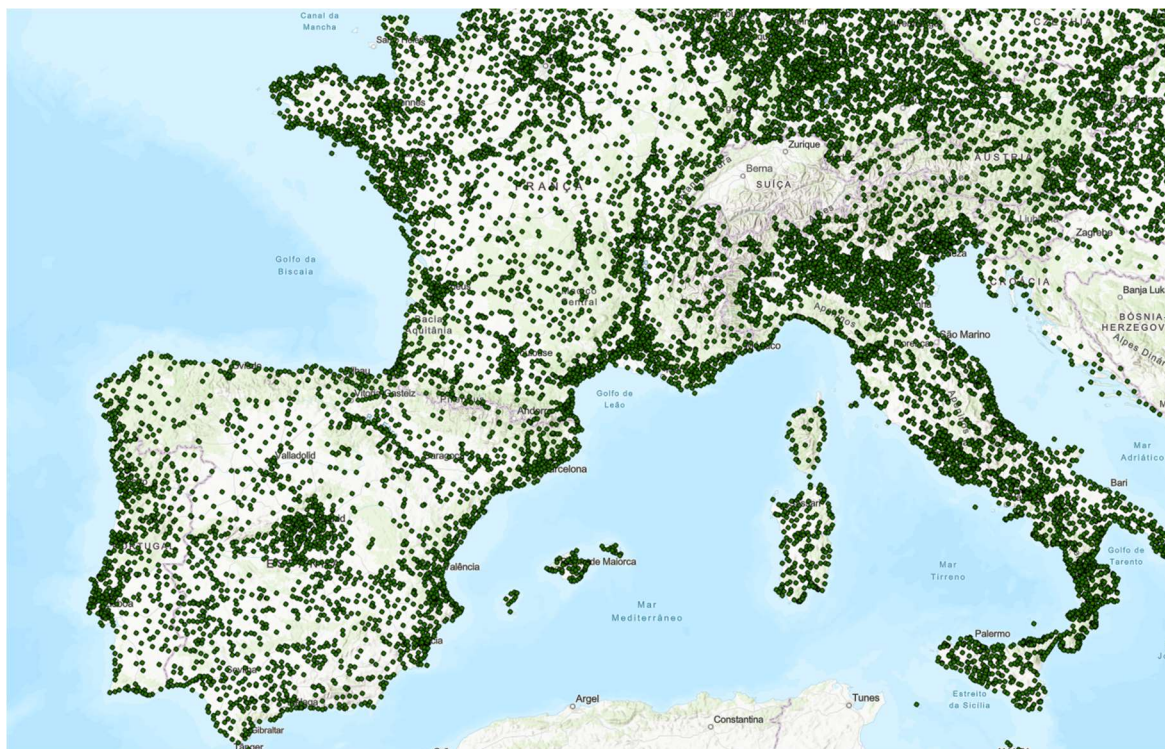


Figura 21 - ArcGIS - Mapa de ETAR reportadas pelos EM no âmbito da Diretiva 91/271/CEE (2020), integrado no ArcGIS [93].

A camada diz respeito à informação relativa às ETAR, reportada pelos EM no âmbito da Diretiva 91/271/CEE. Os dados associados à camada contêm informações como a identificação e localização geográfica de cada ETAR, capacidade de dimensionamento, data de entrada em funcionamento, tipos de tratamentos aplicados (ANEXO II).

Nesta fase foram estabelecidos dois cenários, o primeiro cenário em que foram consideradas somente as ETAR com tratamento mais avançado que o secundário, conforme requerido no Decreto-lei 119/2019 [84], e um segundo cenário em que, além das ETAR com tratamento mais avançado do que secundário, foram adicionalmente consideradas as ETAR apenas com tratamento secundário. Este segundo cenário foi estabelecido no sentido de averiguar qual o incremento de potencial de rega, colocando-se a hipótese de no futuro poder ser feita a modernização destas ETAR ou, nos casos em que não exista exposição ao público, venha a ser possível o uso de água residual sujeita somente a tratamento secundário para rega de culturas energéticas.

Desta forma, para o cenário 1, através da ferramenta “Filtro” foram impostas as condições que permitiram selecionar as ETAR localizadas em território nacional (“RepCode” é “PT_2020”), com tratamento secundário (“uwwSecondaryTreatment” é “1”) e com, pelo menos, um dos tratamentos mais avançados do que o tratamento secundário: (“uwwUV” é “1”; “uwwChlorination” é “1”; “uwwOzonation” é “1”; “uwwSandFiltration” é “1”; “uwwMicroFiltration” é “1”) (Figura 22 - Esquerda).

Para o cenário 2 foram impostas apenas as condições relativas à localização das ETAR em território nacional (“repCode” é “PT_2020”) e com tratamento secundário (“uwwSecondaryTreatment” é “1”) (Figura 22 - Direita).

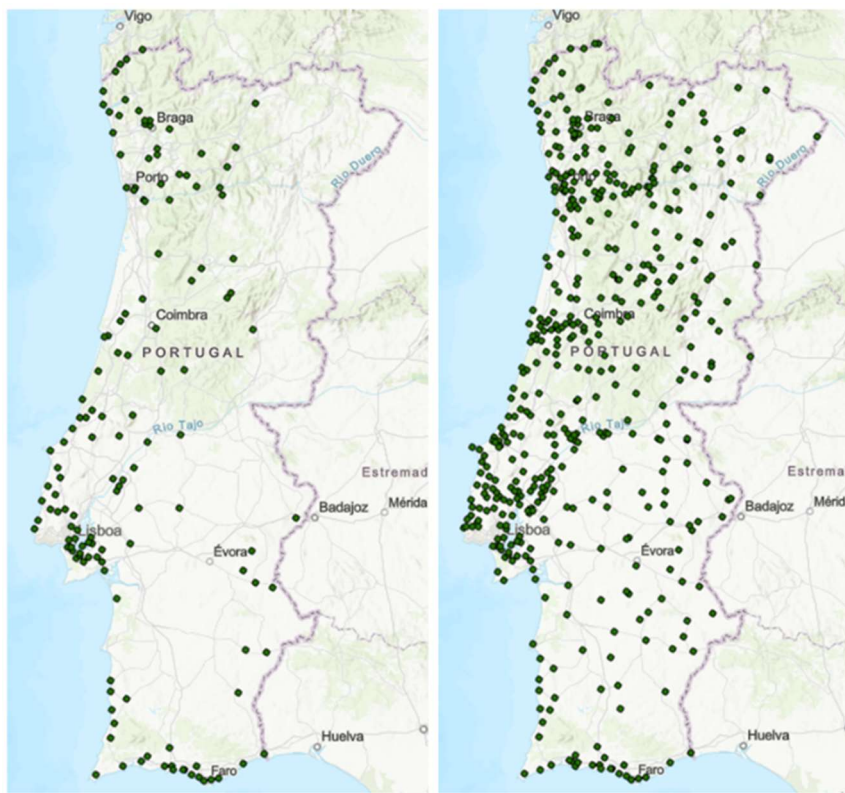


Figura 22 - ArcGIS – Camada ETAR de Portugal no âmbito da Diretiva 91/271/CEE, com filtro (**Esquerda**: Cenário 1 / **Direita**: Cenário 2).

De forma a mapear as áreas de solos marginais com potencialidade com possibilidade geográfica de serem irrigadas com os efluentes das ETAR selecionadas, foi criado, no software ArcGIS, um *buffer* com um raio de 10 km com centro em cada ETAR (Figura 23 e Figura 24). A medida do raio foi definida com base no estudo sobre o potencial de reutilização de água para irrigação na UE, onde assumem que a reutilização de ART em situações onde seja necessário

o seu transporte em distâncias superiores a 10 km não é viável por exigir esforços de bombeamento demasiado elevados [101].

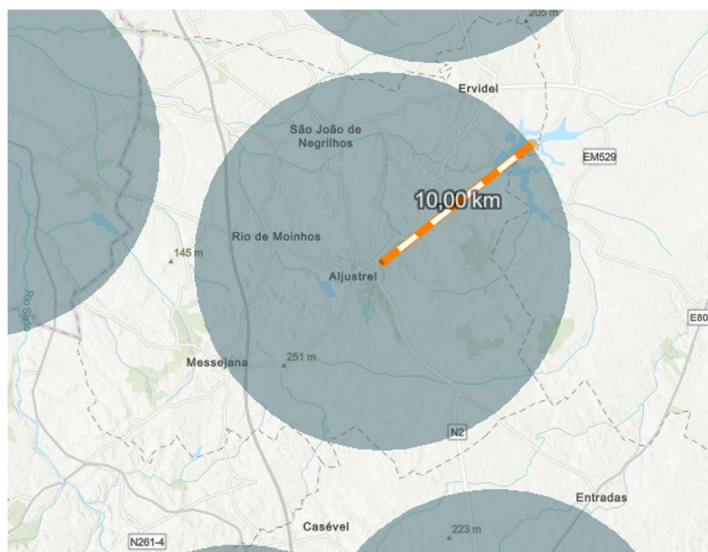


Figura 23 - ArcGIS - Buffer com raio de 10 km delimitado a partir da ETAR.

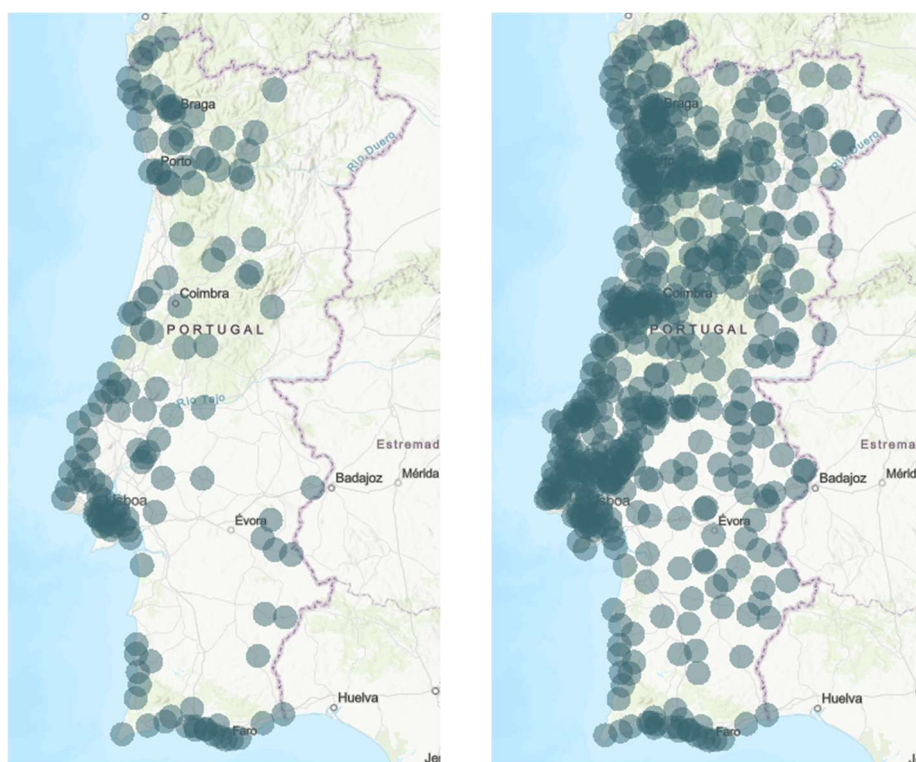


Figura 24 - ArcGIS - Buffer de 10 km com centro nas ETAR (**Esquerda**: Cenário 1 / **Direita**: Cenário 2).

Com recurso à ferramenta de sobreposição “Interseção” entre a camada contendo os *buffers* e a camada dos solos marginais, obteve-se a uma nova camada com as áreas de solos marginais que coincidem com o *buffer* de 10 km de raio a partir de cada ETAR (Figura 25).

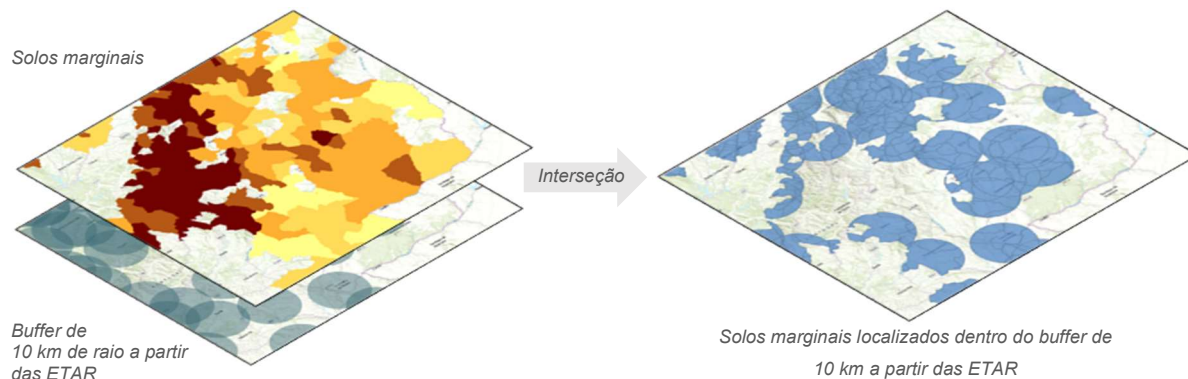


Figura 25 - ArcGIS - Camada solos marginais dentro do buffer de 10 km de raio obtida pela interseção das camadas Solos Marginais com filtro e Buffer de 10 km de raio.

De modo a conferir maior rigor à área de solos marginais elegível para cultivo de espécies industriais foram excluídas zonas onde não é possível cultivar [102] através da “Interseção” da camada anteriormente obtida, e eliminação através da função de sobreposição “Apagar”. As zonas excluídas foram: Zonas de Proteção Especial (ZPE), Sítios de Importância Comunitária (SIC), zonas húmidas classificadas como locais de importância ecológica internacional (RAMSAR), Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAC), Reservas da Biosfera da UNESCO, Massas de água e Zonas edificadas.

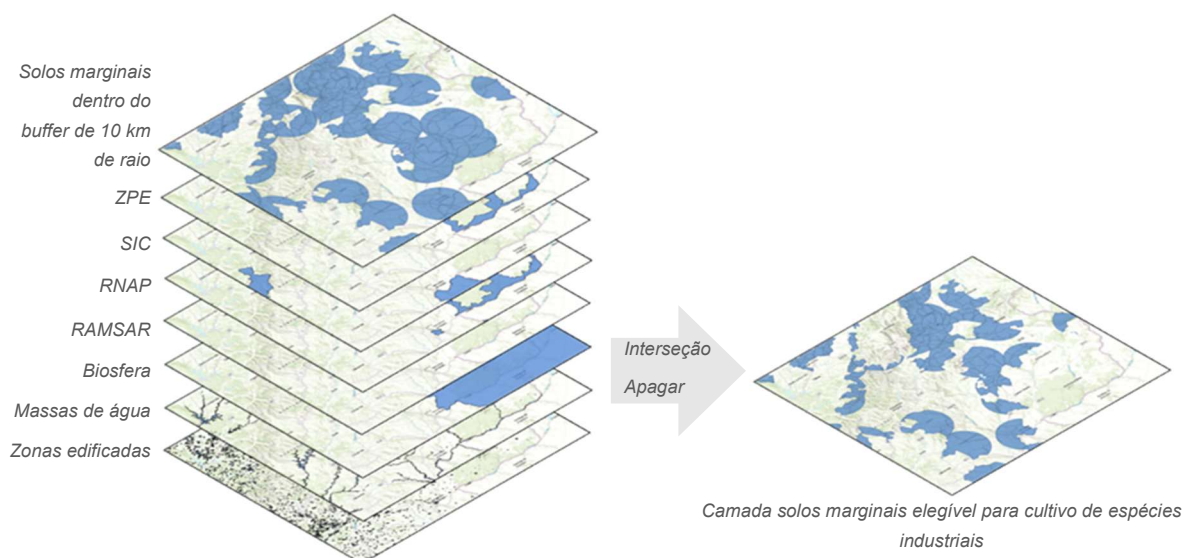


Figura 26 - ArcGIS - Camada solos marginais dentro do buffer de 10 km de raio sem áreas não cultiváveis, obtida pelas ferramentas “interseção” e “apagar”

Este procedimento foi realizado para os dois cenários, tendo-se obtido as camadas apresentadas na Figura 27.

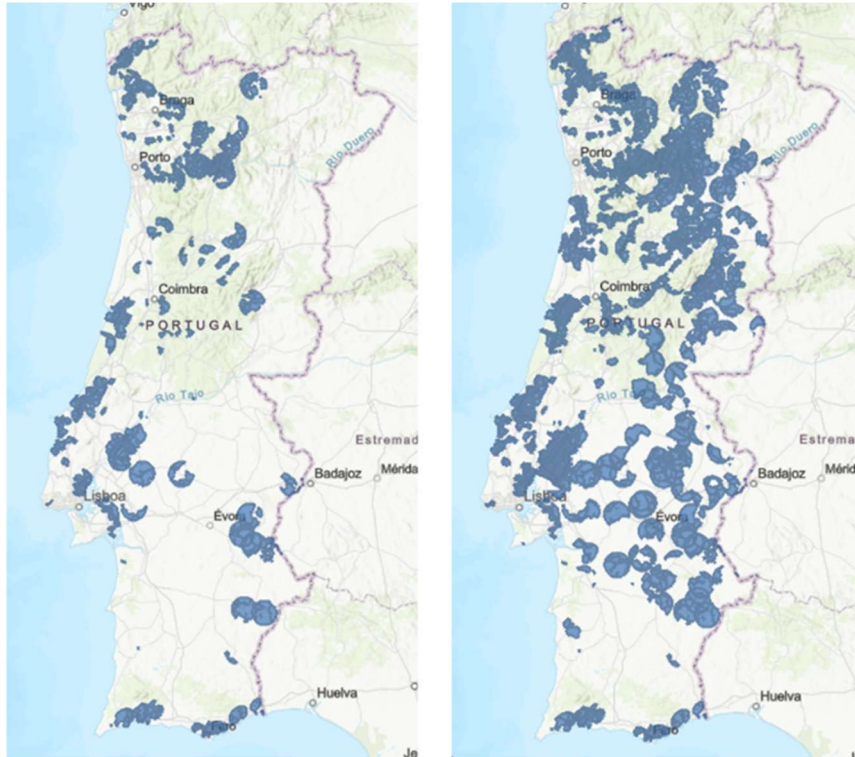


Figura 27 - ArcGIS – Solos marginais contidos no buffer de 10 km de raio, sem zonas incultiváveis (**Esquerda**: Cenário 1 / **Direita**: Cenário 2).

Através do *software* ArcGIS obteve-se as áreas elegíveis para o cultivo de espécies energéticas, regadas com ART numa área a 10 km de distância das ETAR, para os dois cenários estabelecidos. A informação associada a cada uma das camadas representadas na Figura 27 foram exportadas do *software* ArcGIS para folhas de cálculo Excel (ANEXO III).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos na análise do potencial de crescimento de plantas energéticas em solos marginais regados com ART, considerando os dois cenários estabelecidos.

Considerou-se que o potencial de crescimento de culturas energéticas em solos marginais regados com ART depende fundamentalmente de três variáveis:

- disponibilidade de ART, em quantidade e qualidade adequadas, provenientes de ETAR localizadas nas imediações dos solos marginais cultivados;
- existência de solos marginais nas imediações (distância de 10 km) das ETAR com tratamento adequado;
- necessidades hídricas das culturas energéticas para cultivo na área de solos marginais.

Assim, com base nos dados obtidos no ArcGIS exportados para folhas de cálculo Excel, foram realizados os cálculos para dar resposta a estas três questões, para cada um dos cenários estabelecidos.

Capacidade por ETAR

Em primeiro lugar, para cada ETAR, foi calculado o volume de água residual tratada (m^3 /dia) passível de ser utilizada. Os dados obtidos no software indicavam a capacidade em e.p. de cada ETAR, e assim, com base nas capacitações definidas no Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto [103] calculou-se capacidade máxima de água tratada. Assumiu-se que, para cada ETAR, este seria o valor de ART.

Com efeito, para ambos os cenários, a ETAR com maior volume de ART é a ETAR de Alcântara com caudal de $132\,300\ m^3$ /dia. Para o cenário 1 a ETAR de Mértola apresenta o menor volume de água residual tratada, um caudal de $216,90\ m^3$ /dia e, para o cenário 2, a ETAR de Arraiolos Norte com um caudal $32\ m^3$ /dia.

No cenário 1, considera-se a existência de 118 ETAR com nível de tratamento mais avançado do que o secundário com um total de $1\,135\,073\ m^3$ /dia de ART. No cenário 2 foram determinadas 424 ETAR, com tratamento secundário e $2\,078\,554\ m^3$ /dia de ART.

Área marginal elegível total e por cultura energética

Segundo o projeto MAGIC, Portugal continental tem uma área de $88\,771\ km^2$, sendo $11\,355\ km^2$ classificados como solo marginal, o que corresponde a 12,8% do território nacional.

Para o cálculo da área marginal elegível total, teve-se em conta a informação fornecida da área marginal por polígono de LAU 2 localizado na área do buffer de cada ETAR. Com efeito, nos casos em que a área marginal do polígono era superior à área do polígono coincidente com o buffer, considerou-se o segundo valor. Garantindo que não haveria interseção de áreas, estimou-se que a área marginal abrangida por ETAR com tratamento mais avançado do que o secundário é 2 449 km², e a área marginal abrangida por ETAR com tratamento secundário é 7 146 km².

Sabendo a capacidade de ART disponível e a quantidade de água que um hectare plantado com determinada cultura energética necessita, calculou-se a área que poderia ser irrigada. Neste cálculo, impôs-se a condição lógica “se a água residual tratada permite regar uma área superior à área disponível, então o resultado será a área disponível”. Para cada cultura energética foram calculadas as áreas para os limites de irrigação que diferenciam a adaptabilidade da cultura.

Quanto maior a necessidade hídrica das culturas, menor a área suscetível de ser irrigada, no entanto, a análise efetuada permitiu verificar que a água disponibilizada por aproximadamente 26% das ETAR responderia não só às necessidades hídricas ótimas das espécies industriais como ainda existiria água remanescente para outras atividades ou serviços. O gráfico da Figura 28 apresenta as áreas de solo marginal elegíveis para cultivo de cada espécie energética em estudo de acordo com as suas necessidades hídricas.

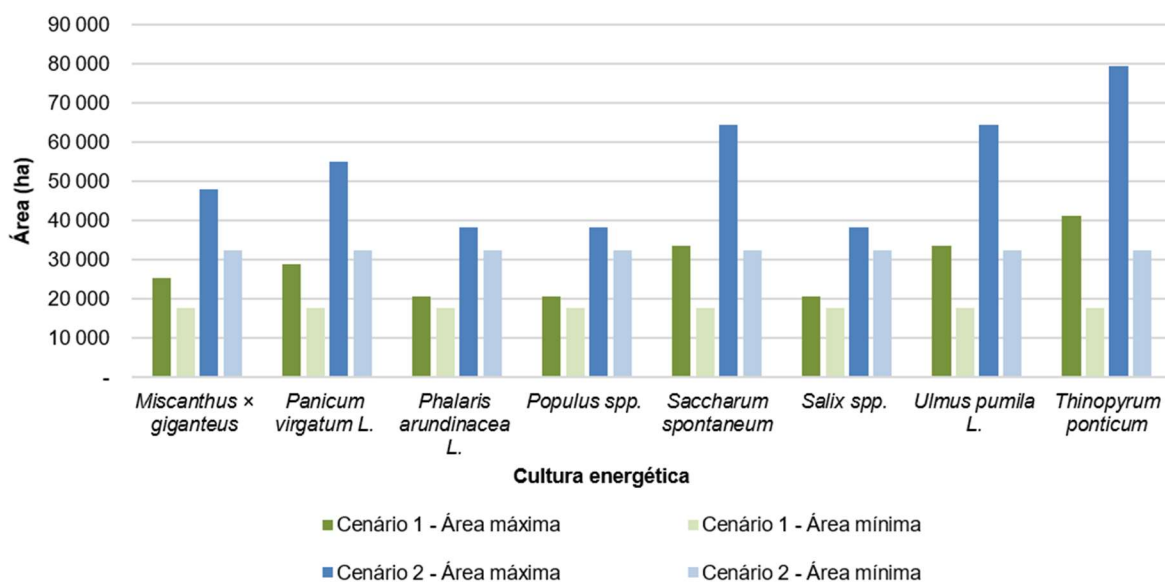


Figura 28 - Área de solo marginal elegível com potencial de cultivo, com base nas necessidades hídricas das culturas (ha).

De acordo com a ART disponível para irrigação, a área mínima de solo marginal elegível para cultivo, ou seja, com mais volume de água para rega, apresenta-se igual para as oito culturas

selecionadas, aproximadamente 17 500 ha no cenário 1 e 32 000 ha no cenário 2, uma vez que a condição ótima de irrigação para todas as plantas consideradas é 1 000 mm/ano ou época de crescimento para plantas anuais. Contudo, para o mínimo de água admissível para a adaptabilidade das culturas energéticas, as áreas diferem e a espécie *Thinopyrum ponticum* distingue-se com aproximadamente 40 000 ha de solo marginal para cultivo no cenário 1 e quase 80 000 ha no cenário 2.

Produtividade e potencial de geral energia

Em função dos valores obtidos relativamente às áreas com potencial para plantação das culturas energéticas irrigadas com ART, sendo conhecida a sua produtividade por hectare, determinou-se o rendimento de cada espécie para essas áreas. Posteriormente, determinou-se o valor de energia que as plantas cultivadas nas áreas apuradas, e irrigadas com ART, podem produzir.

No que concerne ao rendimento para a área marginal com potencial de produção, o *Miscanthus x giganteus* e o *Saccharum spontaneum* são as culturas com maior potencial em ambos os cenários, em condições de irrigação ótimas. No cenário 1, pode-se produzir aproximadamente 1 000 000 t/ano de matéria-seca e 700 000 t/ano de matéria-seca respetivamente e, no cenário 2, as mesmas culturas podem gerar 1 900 000 t/ano de matéria-seca e 1 300 000 t/ano de matéria-seca. Por outro lado, *Phalaris arundinacea L.* é a cultura com menor rendimento, nos cenários 1 e 2, mesmo em condições de irrigação ótimas (Figura 29).

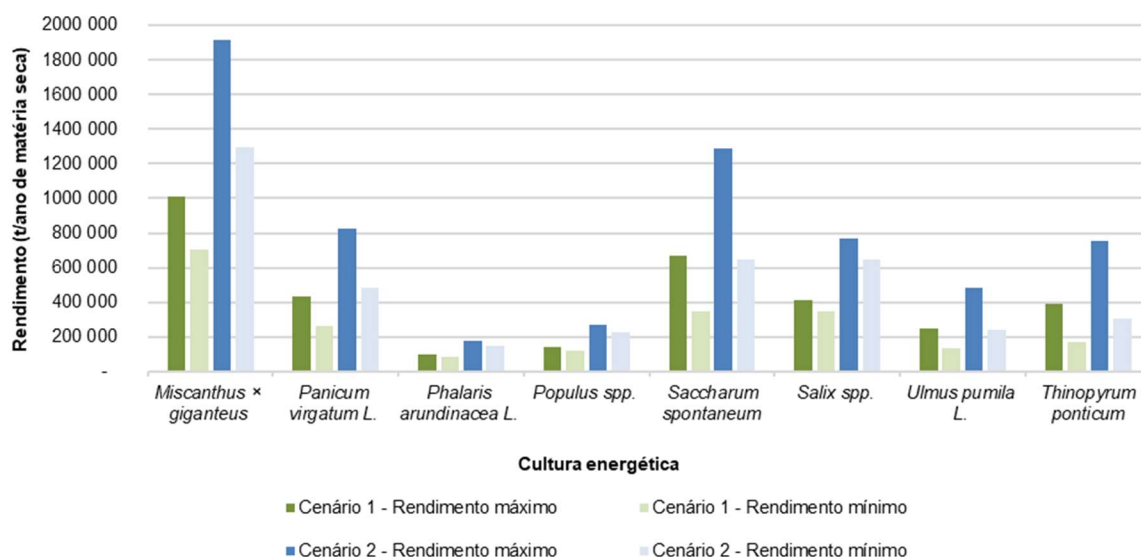


Figura 29 - Rendimento para a área marginal com potencial de produção (t/ano de matéria seca).

Por fim, foi analisado o potencial de produção de energia na área onde cada uma das espécies poderia ser cultivada. No cenário 1, o *Miscanthus × giganteus* apresentou o maior potencial de produzir energia, atingindo cerca de 18 000 000 000 MJ/ano e *Phalaris arundinacea L.* o menor potencial, não chegando aos 1 500 000 000 MJ/ano. No cenário 2, também o *Miscanthus × giganteus* tem os melhores resultados com cerca de 35 000 000 000 MJ/ano e *Phalaris arundinacea L.* no fim da tabela com aproximadamente 2 500 000 000 MJ/ano (Figura 30).

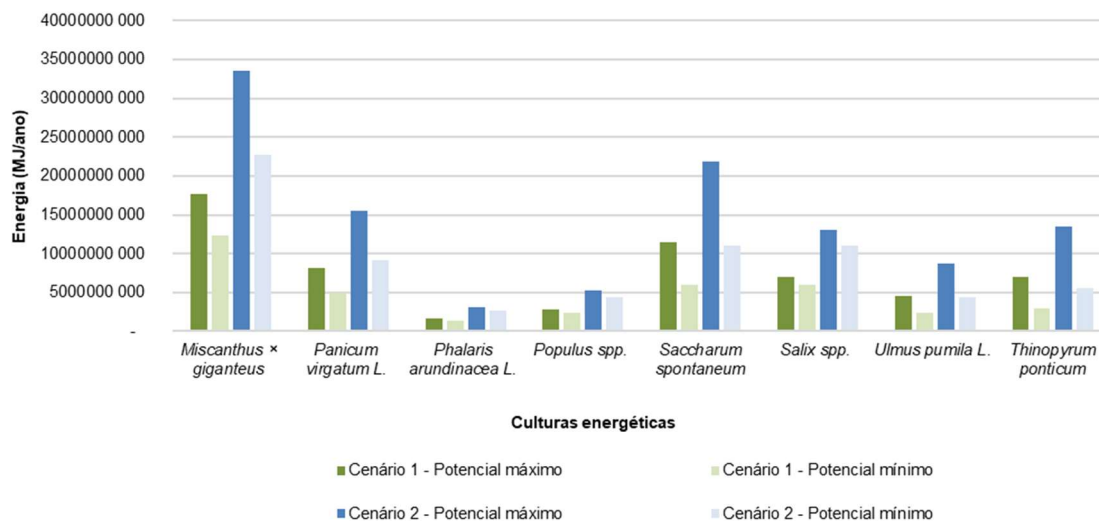


Figura 30 - Potencial de produção de energia para a área marginal com potencial de produção (MJ/ano).

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da utilização de solos marginais em Portugal para o crescimento de plantas energéticas regadas com ART.

O trabalho desenvolvido, permitiu constatar que aproximadamente 80% das ETAR com tratamento adequado para rega de culturas energéticas encontram-se localizadas em solos marginais ou nas suas imediações, com potencial para produção de culturas energéticas numa área de 2 449 km². Quase 90% das ETAR com tratamento secundário estão também localizadas em solos marginais, abrangendo 7 146 km² de solos marginais.

Apesar de as plantas energéticas terem baixas necessidades hídricas, o seu rendimento e produtividade são afetados positivamente quando este recurso é utilizado. Com efeito, a produtividade das culturas energéticas estudadas encontra-se entre os 82 670 t/ano de matéria-seca e os 1 014 026 t/ano de matéria-seca, permitindo a produção de energia entre 1 426 244 868 MJ/ano e 17 745 454 802 MJ/ano.

Estes valores não devem ser encarados isoladamente, uma vez que a marginalidade dos solos não depende apenas dos fatores hídricos e não era objetivo deste trabalho analisar fatores como custos inerentes à construção de infraestruturas de transporte de ART até aos campos de cultivo, e transporte da biomassa para as bio refinarias. Porém, os dados obtidos parecem justificar trabalhos futuros nesse sentido e uma análise mais aprofundada.

O estudo do cenário 2 indica que o potencial da utilização de solos marginais em Portugal para o crescimento de plantas energéticas regadas com águas residuais tratadas é aproximadamente o dobro. Deste modo, seria de todo o interesse, uma avaliação da viabilidade de utilização de ART com nível secundário de tratamento para a rega de culturas energéticas em solos marginais, garantido a ausência de risco para a saúde e ambiente.

De realçar o trabalho científico já existente relativo ao melhoramento genético das plantas energéticas, o que incrementará o rendimento e a qualidade da biomassa produzida, e consequentemente os valores de energia por elas gerados.

Dois dos fatores apontados para a diminuta adesão à ART deve-se ao baixo custo do acesso à água doce natural, e à falsa ideia de que se trata de um recurso ilimitado, pelo que as alterações na disponibilidade de água, e/ou no preço da água potável podem ter importantes implicações na procura de ART para irrigação.

Importa, pois, criar condições para que a reutilização de ART seja assumida e aceite como uma prioridade para minimizar a pressão sentida principalmente nos recursos hídricos, mas também no ambiente e, numa ótica de economia circular, permita o reaproveitamento e reciclagem de nutrientes evitando produção e aplicação de mais fertilizantes de síntese.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] WBCSD, «Biocombustíveis - Resumo Temático -Energia e Clima». Acedido: 4 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2013/11/publ-2008-Biocombustiveis.pdf>
- [2] APA, «Emissões de Gases com Efeito de Estufa | Relatório do Estado do Ambiente». Acedido: 27 de maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/emiss%C3%B5es-de-gases-com-efeito-de-estufa>
- [3] Ministério do Ambiente e da Ação Climática, «Plano Nacional de Energia e Clima 2030». Acedido: 13 de junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/PNEC-2030-Plano-Nacional-Energia-e-Clima.pdf>
- [4] H. Hoff, «Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus», Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm, 2011. Acedido: 23 de junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf>
- [5] «MAGIC», Magic. Acedido: 18 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://magic-h2020.eu/>
- [6] Directiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de Maio.
- [7] ERSE, «Relatório - Análise do Mercado de Biocombustíveis 2018-2020», ERSE, 2021. Acedido: 27 de fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.erse.pt/media/eknhoezr/relat%C3%B3rio-biocombust%C3%ADveis.pdf>
- [8] UNFCCC, «Acordo de Paris», 2016. Acedido: 15 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf?gclid=Cj0KCQjwm66pBhDQARIsALIR2zBs-JtRI-P_QpX5Hdadv0Fc9UR3ZN78-ATHItxMUZKBiYwln3gtsPYaAvWiEALw_wcB
- [9] A. Santos Silva e J. Matos Fernandes, «Acordo de Paris: 2015-2020», República portuguesa, ambiente e ação climática, 2020. Acedido: 26 de junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3D%3DBQAAAB%2BLCAAAAAAABAAzNLA0tgQAra2cKgUAAAA%3D>
- [10] Comissão Europeia, «Pacto Ecológico Europeu Com (2019) 640 Final», 12 de novembro de 2019.
- [11] Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril.

- [12] ECS/LNEG, «Relatório sobre o cumprimento dos critérios de sustentabilidade na produção de biocombustíveis em Portugal - 2020». Acedido: 22 de agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.Ineg.pt/wp-content/uploads/2021/05/Relatorio-de-Sustentabilidade-dos-biocombustiveis-Portugal-2020.pdf>
- [13] Diretiva (UE) 2015/1513 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de setembro.
- [14] Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro.
- [15] Decreto-Lei n.º 84/2022, de 9 de dezembro, Diário da República n.º 236/2022, Série I de 2022-12-09, páginas 8 - 45. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/84-2022-204502328>
- [16] European Commission, Directorate General for Communication., Pacto Ecológico Europeu: cumprir os nossos objetivos. LU: Publications Office, 2021. Acedido: 27 de junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2775/026800>
- [17] ONU, «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development», 2015. Acedido: 24 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>
- [18] M. T. Nazari, J. Mazutti, L. G. Basso, L. M. Colla, e L. Brandli, «Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review», *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, n.º 8, pp. 11139–11156, ago. 2021, doi: 10.1007/s10668-020-01110-4.
- [19] A. Fernández-Ríos et al., «Towards a Water-Energy-Food (WEF) nexus index: A review of nutrient profile models as a fundamental pillar of food and nutrition security», *Sci. Total Environ.*, vol. 789, p. 147936, out. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147936.
- [20] C. Carmona-Moreno et al., «Implementing the Water–Energy–Food–Ecosystems Nexus and Achieving the Sustainable Development Goals».
- [21] E. Moioli et al., «Analysis of the current world biofuel production under a water–food–energy nexus perspective», *Adv. Water Resour.*, vol. 121, pp. 22–31, nov. 2018, doi: 10.1016/j.advwatres.2018.07.007.
- [22] DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, «Estatísticas rápidas das renováveis», 2023. Acedido: 4 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/media/f1zc0kxu/dgeg-arr-2023-07.pdf>
- [23] «Incorporação de Biocombustíveis nos Combustíveis Rodoviários em 2022», ENSE. Acedido: 10 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ense-epe.pt/news/incorporacao-de-biocombustiveis-nos-combustiveis-rodoviaros-em-2022/>
- [24] ENSE, «Percentagem de incorporação de biocombustíveis nos combustíveis fósseis e na gasolina», 2023. Acedido: 25 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://www.ense-epe.pt/wp-content/uploads/2023/02/ENSE_Incorporacao_Biocombustivel_2016_2022.pdf

- [25] N. Csikós e G. Tóth, «Concepts of agricultural marginal lands and their utilisation: A review», *Agric. Syst.*, vol. 204, p. 103560, jan. 2023, doi: 10.1016/j.agsy.2022.103560.
- [26] Q. Feng, I. Chaubey, B. Engel, R. Cibin, K. P. Sudheer, e J. Volenec, «Marginal land suitability for switchgrass, *Miscanthus* and hybrid poplar in the Upper Mississippi River Basin (UMRB)», *Environ. Model. Softw.*, vol. 93, pp. 356–365, jul. 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.03.027.
- [27] M. Khanna et al., «Redefining marginal land for bioenergy crop production», *GCB Bioenergy*, vol. 13, n.º 10, pp. 1590–1609, 2021, doi: 10.1111/gcbb.12877.
- [28] T. Skevas, N. J. Hayden, S. M. Swinton, e F. Lupi, «Landowner willingness to supply marginal land for bioenergy production», *Land Use Policy*, vol. 50, pp. 507–517, jan. 2016, doi: 10.1016/j.landusepol.2015.09.027.
- [29] C. Perpiña Castillo, B. Kavalov, D. Vasco, C. Jacobs, F. Batista e Silva, e C. Lavallo, «Agricultural Land Abandonment in the EU within 2015-2030». Acedido: 23 de agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/publications/agricultural-land-abandonment-eu-within-2015-2030_en
- [30] European Court of Auditors., *Combater a desertificação na EU: uma ameaça crescente que exige mais ação*, Relatório especial n.º 33, 2018, LU: Publications Office, 2018. Acedido: 16 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2865/826553>
- [31] Eurostat, «Land cover statistics». Acedido: 25 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Land_use_statistics#Land_use
- [32] O. K. Shortall, «“Marginal land” for energy crops: Exploring definitions and embedded assumptions», *Energy Policy*, vol. 62, pp. 19–27, nov. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.048.
- [33] A. Burland e M. von Cossel, «Towards Managing Biodiversity of European Marginal Agricultural Land for Biodiversity-Friendly Biomass Production», *Agronomy*, vol. 13, n.º 6, p. 1651, jun. 2023, doi: 10.3390/agronomy13061651.
- [34] «Seemla – Exploração sustentável de biomassa para bioenergia de terras marginais». Acedido: 20 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.seemla.eu/home/>
- [35] S. Galatsidas et al., «Revealing Bioenergy Potentials: Mapping Marginal Lands in Europe - The Seemla Approach», *Proc. 26th Eur. Biomass Conf. Exhib.*, vol. 14-17 May 2018, p. 7 Pages, 2018, doi: 10.5071/26THEUBCE2018-1AO.4.1.
- [36] B. Elbersen et al., «D2.6 Methodological approaches to identify and map marginal land suitable for industrial crops in Europe», jul. 2018, doi: 10.5281/ZENODO.3539311.
- [37] M. Von Cossel et al., «Marginal Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production», *Energies*, vol. 12, n.º 16, p. 3123, ago. 2019, doi: 10.3390/en12163123.
- [38] W. Gerwin et al., «Assessment and quantification of marginal lands for biomass production in Europe using soil-quality indicators», *SOIL*, vol. 4, n.º 4, pp. 267–290, dez. 2018, doi: 10.5194/soil-4-267-2018.

- [39] «Unidades administrativas locais (LAU) - Eurostat». Acedido: 12 de abril de 2024. [Em linha].
- [43] S. Boléo, «Environmental Pros and Cons of Energy Crops Cultivation in Europe», 2011.
- [44] M. Ferreira, «Produção de novas culturas na Europa para Bioenergia em solos marginais», set. 2019. Acedido: 27 de fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/91653/1/Ferreira_2019.pdf
- [45] Decreto-Lei n.º 152/97, Diário da República n.º 139/1997, Série I-A. 1997. Acedido: 9 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/152-1997-365343>
- [46] E. Alexopoulou, *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts: Production, Uses, Sustainability and Markets for Giant Reed, Miscanthus, Switchgrass, Reed Canary Grass and Bamboo*, Academic Press, 2018.
- [47] S. A. Corinzia et al., «The response of lignocellulosic perennial grasses to different soil water availability», 2021, doi: 10.5071/29EUBCE2021-1DV.5.10.
- [48] M. Abreu et al., «Evaluation of the Potential of Biomass to Energy in Portugal - Conclusions from the CONVERTE Project», *Energies*, vol. 13, n.º 4, Art. n.º 4, jan. 2020, doi: 10.3390/en13040937.
- [49] G. Fischer, H. van Velthuisen, F. O. Nachtergaele, e A. Jernelöv, «Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results», nov. 2020.
- [50] E. Alexopoulou, «D1.5 – Handbook with fact sheets of the existing resource-efficient industrial crops», dez. 2018, doi: 10.5281/ZENODO.3539165.
- [51] «Lignocellulosic Biomass for Advanced Biofuels and Bioproducts: Workshop Report», 2015.
- [52] M. Von Cossel et al., «Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social - Ecologically Sound Bioeconomy», *Agronomy*, vol. 9, n.º 10, Art. n.º 10, out. 2019, doi: 10.3390/agronomy9100605.
- [53] J. Winberg, H. G. Smith, e J. Ekroos, «Bioenergy crops, biodiversity and ecosystem services in temperate agricultural landscapes - A review of synergies and trade-offs», *GCB Bioenergy*, vol. 15, n.º 10, pp. 1204–1220, 2023, doi: 10.1111/gcbb.13092.
- [54] M. Abreu et al., «Low Indirect Land Use Change (ILUC) Energy Crops to Bioenergy and Biofuels - A Review», *Energies*, vol. 15, n.º 12, p. 4348, jun. 2022, doi: 10.3390/en15124348.
- [55] E. Alexopoulou, «D1.3: List with the selected most promising industrial crops for marginal lands», fev. 2018, doi: 10.5281/ZENODO.3539150.
- [56] DGAV, «Enquadramento Legal de Cânhamo (*Cannabis sativa* L.) e Produtos à Base de Cânhamo enquanto Alimentos para Animais», 4 de outubro de 2023.
- [57] M. von Cossel et al., «D4.1 Low-input agricultural practices for industrial crops on marginal land», nov. 2019, doi: 10.5281/ZENODO.3539368.

- [58] Monti, «D1.9. – Final version of MAGIC-CROPS and uploading in the project website», ago. 2021, doi: 10.5281/ZENODO.7576007.
- [59] «MAKAQueS - an interactive, multi-access botanical key to the seed plants of the British Isles». Acedido: 22 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <http://www.makaques.com/index.html>
- [60] «GBIF». Acedido: 22 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.gbif.org/pt/>
- [61] J. B. UTAD, «Jardim Botânico UTAD», Jardim Botânico UTAD. Acedido: 22 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://jb.utad.pt>
- [62] «Poplar as a Biomass Crop». Acedido: 23 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.biomassconnect.org/technical-articles/poplar-populus-spp>
- [63] «Crops for Energy», Crops for Energy. Acedido: 23 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.crops4energy.co.uk/>
- [64] «Natural Resources Conservation Service, Pullman Plant Materials Center», 2022.
- [65] H. M. do Monte, M. T. Santos, A. M. Barreiros, e A. Albuquerque, Tratamento de Águas Residuais Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico, 2016. Acedido: 9 de setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/documents/ct5-trataguasresiduais.pdf>
- [66] United Nations General Assembly, A/RES/64/292 - The human Right to Water and Sanitation, 2010. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N09/479/35/PDF/N0947935.pdf?OpenElement>
- [67] United Nations General Assembly, A/RES/70/169 - The human rights to safe drinking water and sanitation, 2016. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210021753>
- [68] UN, «Agenda 2030 - ODS». Acedido: 27 de fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://ods.pt/ods/>
- [69] «ERSAR - Saneamento de águas residuais». Acedido: 19 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/saneamento-de-aguas-residuais>
- [70] FAO, The State of Food and Agriculture 2020, FAO, 2020. doi: 10.4060/cb1447en.
- [71] «PENSAARP_2030_Volume2.pdf». Acedido: 24 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/Plano sSetoriais/SetorUrbano/PENSAARP2030/PENSAARP_2030_Volume2.pdf
- [72] Resolução do Conselho de Ministros n.º 130/2019, de 2 de agosto, Diário da República n.º 147/2019, Série I de 2019-08-02, páginas 10 - 45. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2019/08/14700/0001000045.pdf>
- [73] Comissão Europeia, Com 2022/C 298/01, 2022. Acedido: 23 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal->

content/EN/TXT/?toc=OJ%3AC%3A2022%3A298%3ATOC&uri=uriserv%3AOJ.C_.2022.298.0
1.0001.01.ENG

- [74] H. M. do Monte e A. Albuquerque, Guia Técnico 14 - Reutilização de águas residuais, 2010.
- [75] Comissão Europeia, «COM (2012) 673», 2012. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673&from=PT>
- [76] H. M. do Monte, «Water reuse in Portugal: Regulations and Practice», Madrid, 2010. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: http://www.lis.edu.es/uploads/f31158b4_41c1_48b3_befc_b1fa727b64f5.pdf
- [77] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2016 (Volume 1)», 2016.
- [78] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2017 (Volume 1)», 2017.
- [79] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2018 (Volume 1)», 2018.
- [80] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2019 (Volume 1)», 2019.
- [81] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2020 (Volume 1)», 2020.
- [82] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2021 (Volume 1)», 2021.
- [83] ERSAR, «RASARP - Relatório Anual dos Serviços e Resíduos em Portugal - 2022 (Volume 1)», 2022.
- [84] Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, Diário da República n.º 159/2019, Série I de 2019-08-21, páginas 21 - 44. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/119-2019-124097549>
- [85] Comissão Europeia, Com 2022/C 298/01, 2022. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?toc=OJ%3AC%3A2022%3A298%3ATOC&uri=uriserv%3AOJ.C_.2022.298.01.0001.01.ENG
- [86] Regulamento (UE) 2020/741 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2020.
- [87] APA, «Guia para a reutilização de água - usos não potáveis», Agência Portuguesa do Ambiente, 2019.
- [88] Comissão Europeia, COM (2020) 98, 2020. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0673>

- [89] N. Melo, «Dessalinização, Reciclagem e Reutilização de água: Estudo de alternativas para diferentes usos face às disponibilidades – caso de estudo ilha de Porto Santo», FCT-UNL, 2015. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/20331/1/Melo_2015.pdf
- [90] European Commission. Joint Research Centre., Technical guidance water reuse risk management for agricultural irrigation schemes in Europe. LU: Publications Office, 2022. Acedido: 22 de outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/590804>
- [91] Directiva n.º 91/271/CEE, de 21 de Maio.
- [92] «Águas residuais urbanas | Relatório do Estado do Ambiente». Acedido: 22 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/%C3%A1guas-residuais-urbanas>
- [93] «Urban Waste Water Treatment map — European Environment Agency». Acedido: 8 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-use-and-environmental-pressures/uwwtd/interactive-maps/urban-waste-water-treatment-maps-3>
- [94] «What is GIS? | Geographic Information System Mapping Technology». Acedido: 21 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>
- [95] P. M. B. Morais, «Os SIG no processo de criação de instrumentos de apoio à decisão», 2013.
- [96] M. J. C. Rosado, «A utilização dos Sistemas de Informação Geográfica no apoio à decisão em operações de proteção e socorro no distrito de Évora», 2022.
- [97] «O Contributo dos SIG na análise da rede viária com.pdf». Acedido: 23 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/33179/1/Tese_Relat%C3%B3rioDeEstagio_EricaSuzana.pdf
- [98] «Inicie utilizando o portal do ArcGIS Enterprise - Portal for ArcGIS | Documentação do ArcGIS Enterprise». Acedido: 22 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://enterprise.arcgis.com/pt-br/portal/latest/use/get-started-portal.htm>
- [99] «MagicMapsServiceTiled (FeatureServer)». Acedido: 22 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://services7.arcgis.com/WpzAKC2XMJHaW69b/arcgis/rest/services/MagicMapsServiceTiled/FeatureServer>
- [100] «UWWTD/SDI_TreatmentPlants_public_ETRS89_v1 (MapServer)». Acedido: 8 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: https://water.discomap.eea.europa.eu/arcgis/rest/services/UWWTD/SDI_TreatmentPlants_public_ETRS89_v1/MapServer

- [101] European Commission. Joint Research Centre., The potential of water reuse for agricultural irrigation in the EU: a hydro economic analysis. LU: Publications Office, 2017. Acedido: 5 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/263713>
- [102] «geoCATALOGO». Acedido: 22 de março de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://geocatalogo.icnf.pt/catalogo.html>
- [103] «Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, Diário da República nº 194/1995, Série I-B de 1995-08-23, páginas 5284 - 5319». Acedido: 26 de fevereiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-regulamentar/23-1995-431873>

ANEXOS

ANEXO I - Culturas adaptadas aos solos marginais europeus e algumas características [58].

CROPS	Cultivation under marginal land									
	Propagation	Availability of genetic material	Temp Min/Max	Cycle	Plant density	Fertilization (NPK)	Harvesting period	Harvesting method	Potential production	Main product
Switchgrass	Seed	High	10-35	Perennial	50-150	50-100 Kg N/y 80-100 kg P (only at establishment) 80-100 kg K (only at establishment)	Summer to spring	Baled straw	15 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Camelina	Seed	High	0-30	Annual	200-300	50-70 Kg N/ha 50-60 kg P/y 30-50 kg K/y	Spring to summer	Combine threshing	2.5 Mg/ha (seeds)	Oil
Sorghum	Seed	High	12-35	Annual (spring)	11-44	100-150 kg N, 60-100 kg P ₂ O ₅ and 60-100 kg K ₂ O per hectare	Summer to early fall	Chopped	20-35 Mg/ha (DM)	Lignocellulose
Crambe	Seed	High	6.8 - 30	Annual	100-200	30-75Kg N/ha (or adapted to soil reserves); 40-80kg P/ha; 60-90kg K/ha	spring to summer	Combine threshing	1.3-3 Mg/ha (seeds), ~800kg/ha (oil)	Oil
Castorbean	Seed	Medium	12-35	Annual/perennial	6-10		Summer to early fall	Combined threshing	3-5 Mg/ha/y (seeds), 6-10 Mg/ha/y (straw)	Oil
Miscanthus	Rhizome, micropropagation; seeded hybrids are under development	High	8 - 45	Perennial	1 - 2	0 - 50 kg N/y; 40 kg P/y; 80 kg K/y	Solid fuel and building material: February to March; Biogas: October	Baled straw or Chips	40 Mg DM/ha/y	Lignocellulose
Giant reed	Rhizome, cuttings	Low	10-45	Perennial	1-2.5	50-100 Kg N/y	Fall to winter	Chopped	30 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Tall wheatgrass	Seed	Medium	15-25	Perennial	400-500	55 kg N/ha	Summer	Baled straw	5-7 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Amaranth	Seed	Low	12-35	Annual	30	150 kg N; 50 kg P; 100 kg K	Late summer / early fall	Chopped	8-15 Mg DM/ha	Lignocellulose
Sunflower	Seed	High	8-34	Annual	2-3	130-90-350 (NPK)	Summer to early fall	Combine harvester	2.5 Mg DM/ha seeds	Oil
Ethiopian mustard	Seed	Medium	4-30	Annual	50-120	0-70 Kg N/ha 50-60 kg P/ha 30-50 kg K/ha	Summer	Combine threshing	1-3 Mg/ha DM	Oil
Hemp	Seed	High	10-30	Annual	30-75 (seed); 150-250 (fiber)	60-120 Kg N/ha	Summer to Fall	Double-cut combine	1.0-1.5 Mg/ha (seeds), 8-15 Mg/ha (dry stems)	Oil, fiber
Flax	Seed	High	4-30	Annual	400 (seed); 1200 (fiber)	30-40 P, 120-140 K, 30-40 N (fiber flax), 70-90 N (linseed)	Summer	Combine/specialised machines	Seeds: up to 3 Mg/ha Straw: up to 6 Mg/ha	Oil, Fibre
Reed canary grass	Seeds, Rhizomes	High	5-30	Perennial	200-300	60 Kg N/ha	Summer to Spring	Baled straw or Combine threshing	Biomass - non-fertilized 3.67 t /ha to 5.73 Mg/ha, fertilized increase by 1.93 Mg/ha (+37%); Could be increased by two cuts – annual dry matter yields ranged from: 3.93–11.44 Mg/ha in two-cut and 5.89–13.94 Mg/ha In single-cut regime; seeds 129-373 kg/ha depending of N availability	Lignocellulose

Common reed	rhizome, cutting	Low	NA	perennial	5-8	100-150 kg/ha/y of N 100-120 kg/ha of P (establishment) 90-100 kg/ha of K (establishment)	Summer to winter	Baled straw	5-20 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Spanish broom	Seed, plantlets	NA	15-22	Perennial	1	no need N	Winter	Baled	6-10 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Safflower	Seed	Low to medium	5-35	Annual	30-70		Summer to Spring	Combine harvester	1.5 to 3 Mg/ha/y (seeds)	oil
Nettle	Seed, mostly rhizomes	Low	8-30	Perennial	4	160-240 N kg/ha	Spring to fall depending on final use	Manual or mechanical	ephemeric fiber production, leaves widely used as medicinal industry	Biologically active substances, fiber
Cardoon	Seed or suckers	Medium	20-45	Perennial	3-15	50-50-100	Summer	Baled straw (forage harvester mounted with a robust header or a biomass harvester-baler)	3.7-13.8 Mg DM/ha/y (lignocellulose biomass), 0.5-1.5 Mg DM/ha/y (seeds)	Lignocellulose, Oil
Guayule	Seed, plantlets	High	10-49.5	Perennial	<10	0-210 N kg/ha; standard 40 N kg/ha	every 2 to 3 years, all seasons	mechanical	5.5 -15 Mg/ha/y (biomass); 0.32 - 1.9Mg/ha/y (rubber)	rubber, latex
Pennycress	Seed	Medium	0-30	Annual	80-150	50-50-50 kg/ha NPK	late spring	Combine threshing	1-1.5 Mg/ha (DM)	Oil
Willow	Cuttings	High	5-35	Perennial	1.2-1.5	20-30 Kg N/ha; 3 kg P/ha; 13 kg K/ha	Winter	Cut-and-chip harvesting	20 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Poplar	Stem cuttings of different size, seedlings from seeds or tissue cultures, root cuttings.	High	1-40	Perennial	Plants per ha :800-2000 rotation up to 5 years, more plants rotation less than 5 years.	50-100 Kg N /ha y	All season usually leaveless – winter-spring-autumn	harvester, motor-manual, special self moving chippers	4-10 Mg DM/y, 250-450 m ³ /ha for 15-20 years, key factors are length of vegetation season and availability of nutrients.	energy wood, chips pellets, boards and furniture for sauna
Black locust	Invasive, seeds	Medium to high	5-40	Perennial			Winter every 3 to 5 years	Chopped and chipped		Lignocellulosic
Eucalyptus	Seeds, cuttings	High	5 - 30	Perennial	0.5-2	None to the limit of 40 kg (N)/ha; 18.8 kg (P2O5)/ha; 50 kg (K2O)/ha)	3-20 years	Mechanical harvesting: Cut-to-length	32	Lignocellulose
Siberian elm	Seed, plantlets	Medium/Low	15-25	Perennial	0.3-0.6	60 kg N/ha	Winter	Baled, chips	3-12 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Wild sugarcane	Rhizome, cuttings	Low	10-45	Perennial	1-2	50-100 Kg N/y	Fall to winter	Chopped	20 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Lupin										
Wild tobacco)	Invasive, seeds	Low		Perennial			Fall to winter			
Saltbush	Seeds	Low	0-35	Annual/perennial	0.1-0.3	112 Kg P/ha	Fall	Chopped	2-5 Mg/ha/y (straw)	Lignocellulose

Jerusalem artichoke	Tuber	Medium	10-25	perennial crop, grown as an annual	5-8	130-150 Kg N/ha; 70-80 Kg P2O5/ha; 200-250 Kg K2O/ha	fall/winter	Machine harvest: tubers with potato picker and stems with mower.	90 Mg/ha/y of tubers (= 4-5 Mg/ha/y of carbohydrate)	Fresh tubers, carbohydrates
Kenaf	Seed	Medium	12-35	Annual (spring)	15-35		fall	Cut-and-chip harvesting or the machinery used for industrial hemp (depending on the end-use)	15-25 Mg/ha/y (DM)	Lignocellulose
Sunn hemp	Seed	Medium	10 - 30	Annual	30-50	100 kg P2O5 ha-1	Late summer, fall	Shredder + baler	10 - 15 Mg DM/ha/y	fiber, lignocellulose
Caper spurge	Seed	Medium	18-22	Annual	3.6-14.3	NA	Fall to spring	Machine harvest	0.4 to 1.6 Mg/ha	Oil, plant extracts
Sugar beets	Seed	High	2-40	Annual	8-10	90-150 kgN/ha, 60-90 kgP/ha, 90-180 kgK/ha	Autumn	Combine harvesting	Root yield 90-120 Mg/ha, sugar yield 14.4-19.2 Mg/ha	Sugar
Calendula	Seed	High	feb-32	Annual	30-60	0-100 kgN/ha; 0-150kgP/ha	spring	Combine harvesting	0.7-2.8 Mg/ha (seed)	specialty Oil
True lavender	Cuttings, seeds	medium	10-30	Perennial	2	80 kg N/ha	Summer	May be mechanized	50-100 kg oil/ha	Oil

[JSON](#)

Layer: UWWTD_SDI_TreatmentPlants_public (ID: 0)

Name: UWWTD_SDI_TreatmentPlants_public

Display Field: uwwName

Type: Feature Layer

Geometry Type: esriGeometryPoint

Description:

Copyright Text:

Default Visibility: true

MaxRecordCount: 2000

Supported Query Formats: JSON, geoJSON, PBF

Min Scale: 0

Max Scale: 0

Supports Advanced Queries: true

Supports Statistics: true

Has Labels: false

Can Modify Layer: true

Can Scale Symbols: false

Use Standardized Queries: true

Supports Datum Transformation: true

Extent:

XMin: -63.15242071399996
YMin: -21.380407040999955
XMax: 55.823195563000007
YMax: 68.690780000000007
Spatial Reference: 4258 (4258)

Drawing Info:

Renderer:

Simple Renderer:

Symbol:

Style: esriSMSCircle

Color: [38, 115, 0, 255]

Size: 4.0

Angle: 0.0

XOffset: 0

YOffset: 0

Outline:

[0, 0, 0, 255] Width: 0

Label: N/A

Description: N/A

Transparency: 0

Labeling Info:

Advanced Query Capabilities:

Supports Statistics: true

Supports OrderBy: true

Supports Distinct: true

Supports Pagination: true

Supports TrueCurve: true

Supports Returning Query Extent: true

Supports Query With Distance: true
Supports Sql Expression: true
Supports Query With ResultType: false
Supports Returning Geometry Centroid: false
Supports Binning LOD: false
Supports Query With LOD Spatial Reference: false

HasZ: false

HasM: false

Has Attachments: false

HTML Popup Type: esriServerHTMLPopupTypeAsHTMLText

Type ID Field: null

Fields:

- OBJECTID (type: esriFieldTypeOID, alias: OBJECTID)
- uwwState (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwState)
- repCode (type: esriFieldTypeString, alias: repCode, length: 255)
- aggCode (type: esriFieldTypeString, alias: aggCode, length: 255)
- uwwCode (type: esriFieldTypeString, alias: uwwCode, length: 255)
- uwwName (type: esriFieldTypeString, alias: uwwName, length: 255)
- uwwCollectingSystem (type: esriFieldTypeString, alias: uwwCollectingSystem, length: 255)
- uwwDateClosing (type: esriFieldTypeString, alias: uwwDateClosing, length: 255)
- uwwHistorie (type: esriFieldTypeString, alias: uwwHistorie, length: 255)
- uwwLatitude (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwLatitude)
- uwwLongitude (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwLongitude)
- uwwNUTS (type: esriFieldTypeString, alias: uwwNUTS, length: 255)
- uwwLoadEnteringUWWTP (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwLoadEnteringUWWTP)
- uwwCapacity (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwCapacity)
- uwwPrimaryTreatment (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwPrimaryTreatment)
- uwwSecondaryTreatment (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwSecondaryTreatment)
- uwwOtherTreatment (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwOtherTreatment)
- uwwNRemoval (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwNRemoval)
- uwwPRemoval (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwPRemoval)
- uwwUV (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwUV)
- uwwChlorination (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwChlorination)
- uwwOzonation (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwOzonation)
- uwwSandFiltration (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwSandFiltration)
- uwwMicroFiltration (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwMicroFiltration)
- uwwOther (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwOther)
- uwwSpecification (type: esriFieldTypeString, alias: uwwSpecification, length: 255)
- uwwBOD5Perf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBOD5Perf, length: 255)
- uwwCODPerf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwCODPerf, length: 255)
- uwwTSSPerf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwTSSPerf, length: 255)
- uwwNTotPerf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwNTotPerf, length: 255)
- uwwPTotPerf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwPTotPerf, length: 255)
- uwwOtherPerf (type: esriFieldTypeString, alias: uwwOtherPerf, length: 255)
- uwwBadPerformance (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBadPerformance, length: 255)
- uwwAccidents (type: esriFieldTypeString, alias: uwwAccidents, length: 255)
- uwwBadDesign (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBadDesign, length: 255)
- uwwInformation (type: esriFieldTypeString, alias: uwwInformation, length: 255)
- uwwBODIncomingMeasured (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwBODIncomingMeasured)
- uwwBODIncomingCalculated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBODIncomingCalculated, length: 255)
- uwwBODIncomingEstimated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBODIncomingEstimated, length: 255)
- uwwCODIncomingMeasured (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwCODIncomingMeasured)
- uwwCODIncomingCalculated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwCODIncomingCalculated, length: 255)
- uwwCODIncomingEstimated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwCODIncomingEstimated, length: 255)
- uwwNIncomingMeasured (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwNIncomingMeasured)
- uwwNIncomingCalculated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwNIncomingCalculated, length: 255)
- uwwNIncomingEstimated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwNIncomingEstimated, length: 255)
- uwwPIncomingMeasured (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwPIncomingMeasured)
- uwwPIncomingCalculated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwPIncomingCalculated, length: 255)
- uwwPIncomingEstimated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwPIncomingEstimated, length: 255)
- uwwBODDischargeMeasured (type: esriFieldTypeDouble, alias: uwwBODDischargeMeasured)
- uwwBODDischargeCalculated (type: esriFieldTypeString, alias: uwwBODDischargeCalculated, length: 255)

- `uwwBODDischargeEstimated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwBODDischargeEstimated`, length: 255)
- `uwwCODDischargeMeasured` (type: `esriFieldTypeDouble`, alias: `uwwCODDischargeMeasured`)
- `uwwCODDischargeCalculated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwCODDischargeCalculated`, length: 255)
- `uwwCODDischargeEstimated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwCODDischargeEstimated`, length: 255)
- `uwwNDischargeMeasured` (type: `esriFieldTypeDouble`, alias: `uwwNDischargeMeasured`)
- `uwwNDischargeCalculated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwNDischargeCalculated`, length: 255)
- `uwwNDischargeEstimated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwNDischargeEstimated`, length: 255)
- `uwwPDischargeMeasured` (type: `esriFieldTypeDouble`, alias: `uwwPDischargeMeasured`)
- `uwwPDischargeCalculated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwPDischargeCalculated`, length: 255)
- `uwwPDischargeEstimated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwPDischargeEstimated`, length: 255)
- `uwwWasteWaterTreated` (type: `esriFieldTypeDouble`, alias: `uwwWasteWaterTreated`)
- `uwwMethodWasteWaterTreated` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwMethodWasteWaterTreated`, length: 255)
- `uwwBeginLife` (type: `esriFieldTypeDate`, alias: `uwwBeginLife`, length: 8)
- `uwwEndLife` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwEndLife`, length: 255)
- `uwwHyperlink` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwHyperlink`, length: 255)
- `uwwWasteWaterReuse` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwWasteWaterReuse`, length: 255)
- `uwwInspireIDFacility` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwInspireIDFacility`, length: 255)
- `uwwRemarks` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `uwwRemarks`, length: 255)
- `rptMStateKey` (type: `esriFieldTypeString`, alias: `rptMStateKey`, length: 255)
- `Shape` (type: `esriFieldTypeGeometry`, alias: `Shape`)

Supported Operations: [Query](#) [Query Attachments](#) [Query Analytic](#) [Generate Renderer](#) [Return Updates](#)

[Iteminfo](#) [Thumbnail](#) [Metadata](#)

ANEXO III – Excerto da informação associada à camada Solos marginais contidos no buffer de 10 km de raio, sem zonas incultiváveis exportada do software ArcGIS para folha de cálculo

Excel

OBJECTID	FID_LOL	CNT	LAU_NAME	LAU_CO	GISCO_I	LAU_G	PERC_M	KM2_A	KM2_A	KM2_M	PERC_A	uwwName	uwwCa	uwwPrim	uwwSeco	uwwOth	uwwNRe	uwwPRE	uwwChlo	uwwOzo	uwwSan	uwwMicr	rptMStat	Buffer	ORIG_	Area in	
D	AU2_M	R_C		DE	D	RID	MARG	AREA	AGRI	ARG	BAND		capacity	aryTreat	ndaryTre	erTreatm	moval	moval	uwwUV	rination	nation	dFiltratio	oFiltratio	eKey	distance	FID	Square
1	77241	PT	Formariz e Ferreira	160524	PT_16052	79717	12,5	20	16	2	22,3	Valenca	19133	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19567	7,6307211
2	77242	PT	Insalde e Porreiras	160525	PT_16052	79718	21,4	17	14	3	37,9	Valenca	19133	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19567	1,78126033
3	77599	PT	Macinhata do Vouga	010112	PT_01011	80075	33,3	31	6	2	24,8	Sul de Sever do Vouga	10976	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19819	15,7980466
4	77672	PT	Albergaria-a-Velha e Valmaior	010209	PT_01020	80148	100	47	7	7	21,8	Sul de Sever do Vouga	10976	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19819	23,8367068
5	77677	PT	Sangalhos	010309	PT_01030	80153	8,3	17	12	1	10,7	Bolho/Sepins	2750	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19754	3,97854568
6	77685	PT	Alvarenga	010402	PT_01040	80161	68,8	39	16	11	46,8	Fornos	8000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19802	0,06215858
7	77760	PT	Canelas e Espiunca	010423	PT_01042	80236	100	36	2	2	54,5	Fornos	8000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19802	4,78630605
8	77774	PT	Fornos	010602	PT_01060	80250	25	4	4	1	18,7	Fornos	8000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19802	2,8133129
9	77777	PT	STo Martinho de Sardoura	010608	PT_01060	80253	50	4	2	1	22,4	Fornos	8000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19802	4,14487619
10	77971	PT	Bustos, Troviscal e Mamarrosa	011407	PT_01140	80447	87	29	23	20	26,3	Bolho/Sepins	2750	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19754	1,62680422
11	77979	PT	Couto de Esteves	011702	PT_01170	80455	33,3	16	3	1	25,1	Sul de Sever do Vouga	10976	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19819	12,2589743
12	77981	PT	Rocas do Vouga	011705	PT_01170	80457	50	15	4	2	27,4	Sul de Sever do Vouga	10976	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19819	15,0267963
13	77986	PT	Silva Escura e Dornelas	011711	PT_01171	80462	33,3	24	3	1	15	Sul de Sever do Vouga	10976	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19819	22,5431714
14	78071	PT	Anais	160701	PT_16070	80547	40	8	5	2	13	Neiva	3092	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19805	7,51293435
15	78072	PT	STo Pedro d'Arcos	160703	PT_16070	80548	42,9	16	7	3	18,1	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	12,2567432
16	78073	PT	Arcozelo	160704	PT_16070	80549	16,7	12	6	1	13,8	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	11,2517182
17	78074	PT	Beiral do Lima	160707	PT_16070	80550	60	8	5	3	35	Neiva	3092	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19805	0,04024926
18	78076	PT	Boalhosa	160709	PT_16070	80552	50	2	2	1	34,8	Neiva	3092	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19805	2,05513296
19	78079	PT	Calheiros	160713	PT_16071	80555	20	9	5	1	18	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	0,53978899
20	78081	PT	Correlh1	160716	PT_16071	80557	12,5	8	8	1	22,3	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	3,05755945
21	78083	PT	Facha	160718	PT_16071	80559	33,3	15	9	3	23,7	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	2,48024595
22	78090	PT	Gondufe	160728	PT_16072	80566	80	5	5	4	38,3	Neiva	3092	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19805	0,67892087
23	78091	PT	Labruja	160729	PT_16072	80567	33,3	15	3	1	19,5	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	0,28109765
24	78149	PT	Ref1ios do Lima	160737	PT_16073	80625	25	16	12	3	31,1	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	0,40535104
25	78150	PT	Ribeira	160739	PT_16073	80626	25	9	8	2	25,6	Lanheses	9546	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19498	2,91661134
1660	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Quinta do Lago	27000	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	PT	10	19677	8,73606837
1661	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Vilamoura	138000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19678	8,73606837
1662	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Pinhal do Concelho	10000	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	PT	10	19685	8,73606837
1663	86207	PT	Santo Ant	110730	PT_11073	89087	11,1	9	9	1	4,3	Bucelas	15000	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	PT	10	19466	0,79269075
1664	86207	PT	Santo Ant	110730	PT_11073	89087	11,1	9	9	1	4,3	Alcantara	756000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19613	0,79269075
1665	86207	PT	Santo Ant	110730	PT_11073	89087	11,1	9	9	1	4,3	Chelas	255000	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	PT	10	19614	0,79269075
1666	86207	PT	Santo Ant	110730	PT_11073	89087	11,1	9	9	1	4,3	Beirolas	213500	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	PT	10	19620	0,79269075
1667	86207	PT	Santo Ant	110730	PT_11073	89087	11,1	9	9	1	4,3	Frielas	700000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19621	0,79269075
1668	86208	PT	Camarate, Unhos e Apelaio	110731	PT_11073	89088	50	12	6	3	10,3	Bucelas	15000	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	PT	10	19466	0,4907371
1669	86208	PT	Camarate, Unhos e Apelaio	110731	PT_11073	89088	50	12	6	3	10,3	Alcantara	756000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19613	0,4907371
1670	86208	PT	Camarate, Unhos e Apelaio	110731	PT_11073	89088	50	12	6	3	10,3	Chelas	255000	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	PT	10	19614	0,4907371
1671	86208	PT	Camarate, Unhos e Apelaio	110731	PT_11073	89088	50	12	6	3	10,3	Beirolas	213500	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	PT	10	19620	0,4907371
1672	86208	PT	Camarate, Unhos e Apelaio	110731	PT_11073	89088	50	12	6	3	10,3	Frielas	700000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19621	0,4907371
1673	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Faro-Noroeste	44530	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19674	2,92428258
1674	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Loule	25800	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19675	2,92428258
1675	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Vale de Lobo	8100	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	PT	10	19676	2,92428258
1676	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Quinta do Lago	27000	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	PT	10	19677	2,92428258
1677	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Vilamoura	138000	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	PT	10	19678	2,92428258
1678	83101	PT	Almancil	080801	PT_08080	85790	19,5	61	41	8	25,3	Pinhal do Concelho	10000	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	PT	10	19685	2,92428258

ANEXO IV – Cenário 1 - Cálculos efetuados para avaliação do potencial de crescimento das plantas energéticas em solos marginais, regados com águas residuais tratadas

CENÁRIO 1	Necessidades hídricas				Rendimento		Geração de Energia	
Cultura Energética	Necessidades hídricas (mm/ano ou mm/época de crescimento para anuais)	Cenários de irrigação (m ³ x m ²)/ano	Área com potencial de plantação (m ²)	Área com potencial de plantação (ha)	Rendimento (t MS/ha/ano)	Rendimento para a área marginal com potencial de produção (t MS/ano)	HHV (Higher Heating Value)/PCS (MJ/Kg)	Potencial de gerar energia (MJ/ano)
Miscanthus × giganteus Greef et Deuter	600-1000 mm suitable	0,6	253 506 497,17	25 350,65	40,0	1 014 025,99	17,5	17 745 454 801,72
		1	175 894 294,63	17 589,43		703 577,18		12 312 600 623,93
Panicum virgatum L.	500-600 mm suitable 600-1000 mm very suitable	0,5	288 034 515,63	28 803,45	15,0	432 051,77	18,8	8 122 573 340,77
		0,6	253 506 497,17	25 350,65		380 259,75		7 148 883 220,12
		1	175 894 294,63	17 589,43		263 841,44		4 960 219 108,50
Phalaris arundinacea L.	800-1000 mm suitable	0,8	206 919 016,15	20 691,90	4,7	97 251,94	17,3	1 677 809 877,69
		1	175 894 294,63	17 589,43		82 670,32		1 426 244 868,39
Populus spp.	800-1000 mm suitable	0,8	206 919 016,15	20 691,90	7,0	144 843,31	19,6	2 838 928 901,57
		1	175 894 294,63	17 589,43		123 126,01		2 413 269 722,29
Saccharum spontaneum	400-500 mm suitable 500-1000 mm very suitable	0,4	335 597 657,13	33 559,77	20,0	671 195,31	17	11 410 320 342,42
		0,5	288 034 515,63	28 803,45		576 069,03		9 793 173 531,43
		1	175 894 294,63	17 589,43		351 788,59		5 980 406 017,34
Salix spp.	800-1000 mm suitable	0,8	206 919 016,15	20 691,90	20,0	413 838,03	17	7 035 246 549,08
		1	175 894 294,63	17 589,43		351 788,59		5 980 406 017,34
Ulmus pumila L.	400-500 mm suitable 500-1000 mm very suitable	0,4	335 597 657,13	33 559,77	7,5	251 698,24	18,2	4 580 908 019,83
		0,5	288 034 515,63	28 803,45		216 025,89		3 931 671 138,35
		1	175 894 294,63	17 589,43		131 920,72		2 400 957 121,67
Thinopyrum ponticum Podp. Z.-W. Liu and R.-C. Wang	300-400 mm suitable 400-1000 mm very suitable	0,3	410 276 133,19	41 027,61	9,5	389 762,33	17,9	6 985 632 225,98
		0,4	335 597 657,13	33 559,77		318 817,77		5 714 107 204,75
		1	175 894 294,63	17 589,43		167 099,58		2 994 892 350,56

ANEXO V – Cenário 2 - Cálculos efetuados para avaliação do potencial de crescimento das plantas energéticas em solos marginais, regados com águas residuais tratadas

CENÁRIO 2	Necessidades hídricas				Rendimento		Geração de Energia	
Cultura Energética	Necessidades hídricas (mm/ano ou mm/época de crescimento para anuais)	Cenários de irrigação (m ³ x m ²)/ano	Área com potencial de plantação (m ²)	Área com potencial de plantação (ha)	Rendimento (t MS/ha/ano)	Rendimento para a área marginal com potencial de produção (t MS/ano)	HHV (Higher Heating Value)/PCS (MJ/Kg)	Potencial de gerar energia (MJ/ano)
Miscanthus × giganteus Greef et Deuter	600-1000 mm suitable	0,6	479 414 138,33	47 941,41	40,0	1 917 656,55	17,5	33 558 989 683,09
		1	323 936 883,25	32 393,69		1 295 747,53		22 675 581 827,66
Panicum virgatum L.	500-600 mm suitable 600-1000 mm very suitable	0,5	548 685 221,55	54 868,52	15,0	823 027,83	18,8	15 472 923 247,61
		0,6	479 414 138,33	47 941,41		719 121,21		13 519 478 700,90
		1	323 936 883,25	32 393,69		485 905,32		9 135 020 107,72
Phalaris arundinacea L.	800-1000 mm suitable	0,8	383 415 691,49	38 341,57	4,7	180 205,37	17,3	3 108 939 170,56
		1	323 936 883,25	32 393,69		152 250,34		2 626 653 231,71
Populus spp.	800-1000 mm suitable	0,8	383 415 691,49	38 341,57	7,0	268 390,98	19,6	5 260 463 287,20
		1	323 936 883,25	32 393,69		226 755,82		4 444 414 038,22
Saccharum spontaneum	400-500 mm suitable 500-1000 mm very suitable	0,4	643 985 393,39	64 398,54	20,0	1 287 970,79	17	21 895 503 375,19
		0,5	548 685 221,55	54 868,52		1 097 370,44		18 655 297 532,58
		1	323 936 883,25	32 393,69		647 873,77		11 013 854 030,58
Salix spp.	800-1000 mm suitable	0,8	383 415 691,49	38 341,57	20,0	766 831,38	17	13 036 133 510,56
		1	323 936 883,25	32 393,69		647 873,77		11 013 854 030,58
Ulmus pumila L.	400-500 mm suitable 500-1000 mm very suitable	0,4	643 985 393,39	64 398,54	7,5	482 989,05	18,2	8 790 400 619,75
		0,5	548 685 221,55	54 868,52		411 513,92		7 489 553 274,11
		1	323 936 883,25	32 393,69		242 952,66		4 421 738 456,39
Thinopyrum ponticum Podp. Z.-W. Liu and R.-C. Wang	300-400 mm suitable 400-1000 mm very suitable	0,3	793 142 029,18	79 314,20	9,5	753 484,93	17,9	13 504 559 662,50
		0,4	643 985 393,39	64 398,54		611 786,12		10 964 920 338,18
		1	323 936 883,25	32 393,69		307 740,04		5 515 563 172,60

Marginal land irrigated with treated wastewater. An opportunity for biofuel production in Portugal?

Tânia Pires¹ and Ana Maria Barreiros^{1,2} [0000-0003-4343-6798]

¹Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - ISEL, Polytechnic University of Lisbon. Rua
Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisbon, Portugal

²UniRE - Unit for Innovation and Research in Engineering, Instituto Superior de Engenharia de
Lisboa - ISEL, Polytechnic University of Lisbon. Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-
007 Lisbon, Portugal
tania.icpires@gmail.com

Abstract. The cultivation of industrial crops stands out as an alternative strategy for fossil fuels. However, it is important to ensure that the production of energy crops is not a threat to the production of food and feed, competing for land or water. This work was based on a bibliographical review of studies and projects that studied the potential for growing energy crops in marginal soils and the hypothesis of them being irrigated with wastewater. In fact, the use of land that no longer has the capacity for agriculture results in not only economic benefits but also environmental and economic ones. On the other hand, irrigation through the reuse of treated wastewater reduces pressure on water resources and adds the advantage of being able to deliver nutrients to energy crops. Irrigating energy plants with treated wastewater, from a proximity perspective with a defined area of 10 km in radius, allows some places to overcome the water needs of plants, leaving water for purposes other than energy generation.

Keywords: Biofuels, Marginal Soils, Treated wastewater.

1 Introduction

Energy issues have been widely discussed, however the problem of energy security is far from resolved and tends to intensify with the imminent depletion of fossil energy sources; the increase in energy demand driven by population growth and purchasing power; security and lack of energy independence following global geopolitical instability and, among other concerns, the worsening of greenhouse gas (GHG) emissions and the respective consequences for climate change [1].

The energy sector, which includes transport, assumes important relevance, both economically and environmentally. This sector therefore faced with a complex challenge, that of guaranteeing access to energy in a sustainable way, without compromising the planet. In fact, transport, together with the production and transformation of energy, are characterized as the most representative sources of greenhouse gas emissions in Portugal [2]. Biofuels are considered carbon neutral with high potential for the decarbonization of the transport sector [3, 4]. That is one of the reasons why biofuels can be seen as an alternative source of energy.

In fact, international strategies and policies invoke the production and promotion of second-generation biofuels as a promising alternative to fossil fuels [1], representing an important contribution to meeting the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda [5].

Despite the positive role of biofuels in mitigating climate change and achieving the SDGs, they can simultaneously represent a threat, namely for food security [6]. In fact, first-generation biofuels use biomass from food crops, which is why it is necessary to promote production and consumption of next-generation biofuels, which do not compete with the production of food or animal feed, as second-generation biofuels. Second generation biofuels, also known as advanced biofuels, are produced from the biomass of energy crops, such as lignocellulosic species. Another issue associated with biofuels is the need of extensive areas for the growth of energy crops, the amount of water required for irrigation and possible use of fertilizers [7, 8].

This paradigm often leads to a trade-off mechanism, which imposes the choice and favor of one factor over another that will be penalized. The water-energy-food nexus approach argues that these resources must be viewed and managed in an integrated manner, highlighting the interconnection between water, energy and food, and aims to promote policies that consider the three sectors in an interdependent way [9]. The elements of the Water-Energy-Food Nexus are intrinsically related to each other, since the use of one of these resources requires and influences the others. In this context, the production of biofuels can be an alternative form of energy, without compromising food production and guaranteeing the preservation of the resources involved, it is essential to establish sustainable and efficient management of the means involved in their production, enhancing synergies and avoiding trade-offs [3, 10-12]. It is therefore important to carry out an analysis that allows efficient management of resources, particularly with regard to the location of cultivated land, which crops are most suitable for these locations, as well as the use of water, so that they do not represent threats between them, or for other resources.

In this context, much research has been done on the idea of using land without agricultural potential, generally known as marginal land, for the growth of energy crops aimed at producing biofuels or other forms of bioenergy without compromising food security, feed production or existing ecosystems [13, 14]. This approach also contributes to improving soil quality, and brings notable social, environmental and economic benefits [14]. In reality, the scientific community has produced a large number of studies on the production of energy crops on marginal soils, identifying and mapping marginal areas in European territory and selecting the crops most adapted to biophysical constraints, namely the MAGIC project - Marginal lands for Growing Industrial Crops (2017-2021) financed by the European Union [14-16].

MAGIC defined marginal lands as lands located in areas that once had agricultural potential, and that do not assume different functions such as urban uses, nature conservation, forestry or others. For that project, marginal soils were defined as "land with limitations that, as a whole, are severe for the sustained application of a given use and/or are sensitive to soil degradation as a result of inadequate human intervention, and/or already have lost some or all of their productive capacity as a result of inadequate human intervention and also include contaminated and potentially contam-

inated sites that constitute a potential risk to humans, water, ecosystems or other receptors". According to MAGIC, 29% of the European territory, which once had agricultural potential, is characterized as marginal land and, in mainland Portugal there is an area of 13,726 km² with biophysical restrictions, that is, 26% of the national territory, classified as agricultural between 1990 and 2012, it is considered marginal [17].

Regarding energy crops, the same project studied the most promising plant species for the production of biofuels, having initially addressed 67 industrial crops, based on databases and/or scientific projects. The consortium obtained the final list of 20 energy crops most suitable for the marginal soils under study through a multi-criteria analysis in which five criteria, with a pre-determined weight, were scored from 1 to 5 by the entire consortium. The criteria analyzed consisted of a) experience with agricultural management of proposed industrial crops; b) crop productivity for industrial applications (according to main uses); c) expected performance of crops on marginal land; d) industry needs and e) market opportunities [18].

Finally, it is necessary to guarantee the efficient use of water in the irrigation of energy crops, not only due to competition with the irrigation of food, but also due to the increasingly accentuated water scarcity. In this context, the reuse of treated wastewater from WWTPs to irrigate energy crops presents itself as an opportunity with several associated benefits: reducing pressure on water resources, both in saving fresh water and in reducing discharges carried out in the receiving environment; reduction of fertilizers and also contributing to the recharge of aquifers with a lower load of contaminants. The reuse of wastewater playing an important role for the circular economy, in the sense that, in addition to the water itself, the nutrients present in these, such as nitrogen and phosphorus, are reused to fertilize the soil when reused in agricultural activity. Simultaneously, with the advantage of preventing the risk of environmental impacts such as pollution and eutrophication of the receiving environment where they are rejected.

Decree-Law No. 119/2019 [19] defines the legal framework for the production of water, originating from treated wastewater, for reuse through a "fit for purpose" approach. The mentioned approach says that the quality standards of water and reuse rules must be suitable for the purposes for which they are intended. In this case, the irrigation of energy crops falls into "Class D - Irrigation with restricted access (agricultural uses): seed production, including seeds for industrial use or energy production" and requires a "level of conventional secondary treatment and disinfection that includes UV radiation, ozonation, membrane processes, chlorination (only permissible for maintaining the disinfectant residual content) or other advanced oxidation processes" [20].

2 Methodology and data processing

The methodology adopted combined literature review and collection of information regarding the three components under study – marginal soils, energy crops and treated wastewater –, and data processing in ArcGIS software.

The information regarding marginal soils in Portugal was based on the work developed by the European project MAGIC, which identified, classified, and mapped marginal soils in Europe based on natural soil constraints, climate, and other topographic restrictions. The project made available information on marginal soils in a layer of geographic features, polygons that represent NUTS 2, that is, parishes, classified according to the percentage of soil marginality. The layer referring to marginal soils was added to ArcGIS and, using the Filter tool, only soils located in Portugal (CNTR_CODE is PT) and with a marginal land area other than 0 (KM2 is not 0) were selected (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).

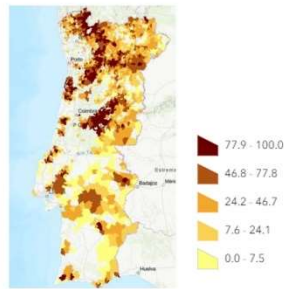


Fig 1. Marginal Soil Layer edited in ArcGIS (% marginality by NUT 2).

The study of the most promising energy crops for marginal soils was also part of the MAGIC project, information that was also used in the present study. However, of the twenty crops selected by MAGIC [18], for this work, energy crops that could somehow compete with the production of food and feed, for example sorghum, were not considered; are identified as invasive in Portugal, namely acacias; or present legal plantation constraints, such as hemp [21]. Thus, the species under analysis were eight, whose characteristics are shown in **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Table 1. Main characteristics of energy crops under study (adapted from [18, 22, 23]).

Energy Culture	Water requirement (mm/year or mm/growing season for annuals)	Productivity (t DM/ha/y)	Higher calorific value (MJ/kg)
Miscanthus	600-1000 - adapted	40	17.5
Switchgrass	500-600 - adapted	15	18.8
Reed canary	600-1000 - very adapted	4.7	17.3
Poplar	800-1000 - adapted	7	19.6
Wild sugarcane	400-500 - adapted	20	17
Willow	500-1000 - very adapted	20	17
Siberian Elm	800-1000 - adapted	7.5	18.2
	400-500 - adapted		
	500-1000 - verv adapted		

Tall wheat grass	300-400 - adapted	9.5	17.9
	400-1000 - very adapted		

Regarding the treated wastewater component, the necessary data on the location, type of treatment and capacity of the WWTP (p.e.) were obtained from the European Environment Agency website [24], based on mandatory reporting for population clusters with more of 2,000 inhabitants, within the scope of Directive 91/271/EEC of the European Council, of May 21, 1991 [25]. However, data were also collected from two WWTPs with population clusters, which reported even though it was not mandatory. The information, referring to 2020, was reported in 2022 by the EU-28 countries plus Iceland and Norway and awaits validation from the European Commission.

The European Environment Agency [24] provides interactive access to member states' reports and the feature layer has been added to the ArcGIS software. Once again, the Filter tool was used to select WWTPs located in the national territory with the potential to irrigate energy crops on marginal soils. In this phase, two scenarios were established: i) first scenario in which only WWTPs with more advanced treatment than secondary were considered, as required in Decree-Law 119/2019 [19] ; ii) second scenario in which, in addition to WWTPs with more advanced than secondary treatment, WWTPs with only secondary treatment were additionally considered.

Thus, for Scenario 1, conditions were imposed that allowed the selection of WWTPs located in national territory with secondary treatment and with at least one advanced treatment (Fig. 2 Left). For Scenario 2, only the conditions relating to the location of the WWTP in the national territory and with secondary treatment were imposed (Fig.2 Right).



Fig. 1. Left – Scenario 1 – ArcGIS map WWTP with more advanced treatment than secondary treatment; **Right** – Scenario 2 - ArcGIS map WWTP with secondary treatment.

In order to map the areas of marginal soil with the potential to be irrigated with effluents from the identified WWTP, a buffer was created in ArcGIS with a radius of 10 km centered on each WWTP. The 10 km radius was defined based on the study on the potential for water reuse for irrigation in the European Union, which assumes that the transport of treated wastewater over distances greater than 10 km is not viable as it requires excessively high pumping efforts [26]. To this goal, through a proximity

analysis, with the Create Buffer tool, the area of marginal soils with the potential to be irrigated with treated wastewater was obtained (Fig. 2).



Fig. 2. ArcGIS layer - Marginal soils contained in the buffer 10km of WWTP without uncultivable **Left** – Scenario 1; **Right** - Scenario 2.

The layers containing the buffers were superimposed on the marginal soil layers and, using the Intersect tool available in the Overlay Layers module, a new layer was obtained with the marginal soil areas that coincide with the perimeter of 10 km radius from each WWTP. In order to give greater rigor to the area of marginal soils eligible for the cultivation of industrial species, layers of areas where it is not possible to cultivate were added, such as ZPE, SIC, RAMSAR, RNAC, Biosfera, bodies of water and built-up areas. These layers were intersected with the layer previously obtained, marginal soils within the perimeter of 10 km of the WWTP, and then these areas were eliminated using the Erase function of the Overlay Layers module. This procedure was carried out for both scenarios, obtaining the layers presented in Fig.

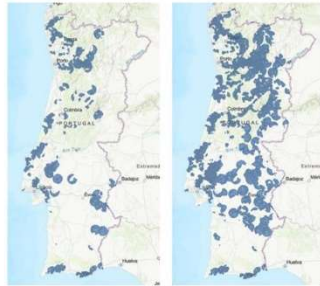


Fig. 4. ArcGIS layer - Marginal soils contained in the buffer 10km of WWTP without uncultivable zones **Left** - Scenario 1; **Right** - Scenario 2.

Through the ArcGIS software, 2 layers were obtained with the areas eligible for the cultivation of energetic species, according to the type of treatment of the WWTP, with all the information relating to the soils in question and eligible WWTP, associated with the imported layers and edited in ArcGIS, they were exported to an excel table.

In the excel file, for each of the scenarios under study, firstly, the amount of wastewater treated from each WWTP was estimated based on the capacity in p.e. and based on the capabilities defined in Regulatory Decree No. 23/95, of August 23 [27]. Then, knowing the capacity of treated wastewater available and the amount of water that one hectare of energy crops needs, the area that could be irrigated was calculated, imposing the logical condition that if the potentially irrigated area was greater than the area available, then the available area would be worth. Depending on this calculated value, knowing the productivity per hectare, the yield of each species was determined and therefore the energy value that the determined areas could potentially generate if planted with the species under study.

3 Results and discussion

The assessment of the potential for reuse of treated wastewater on marginal soils for irrigation of energy crops was based on 3 aspects: water needs, productivity and energy generation.

Regarding the water needs of industrial species, the Magic project characterized the water needs of plants into classes, and for this study we analyzed the amounts of water that allow plants to fall into the “suitable” and “very suitable” classes. The greater the need for crop irrigation, the smaller the area that could be irrigated would be, however, the analysis carried out allowed us to verify that the water made available by some WWTP would respond not only to the intermediate needs of industrial species, but also to the optimal needs and there is still water left for other activities or services. **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** represents area of eligible marginal soil with cultivation according to the water needs of the crops.

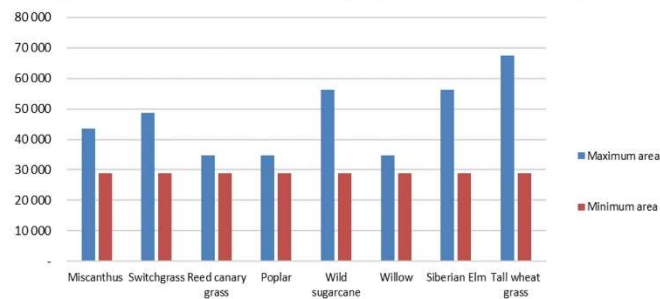


Fig. 5. Area of eligible marginal soil with cultivation potential, based on crop water needs.

The second aspect studied is the productivity of industrial species. A single species could be grown on all the marginal soil that is suitable for irrigation using WWTP water; Miscanthus would yield the highest yield while Reed canary grass would yield the lowest (Fig. 6).

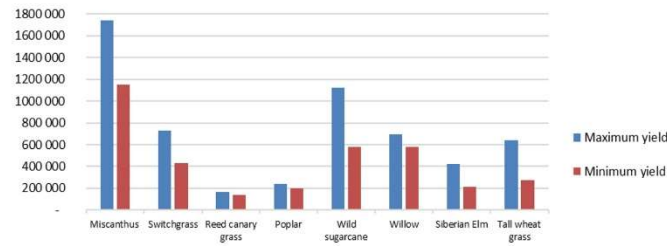


Fig. 6. Yield for the marginal area with production potential (t DM/y).

Finally, the potential to generate energy in the area where each of the species could be cultivated was analyzed. Miscanthus and wild sugarcane are the crops that have the potential to generate more energy and reed canary grass and poplar are the plants that can generate less energy (Fig.7).

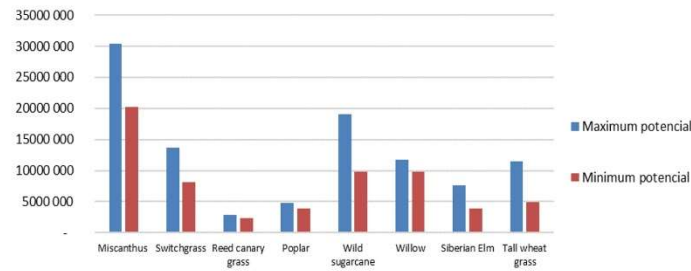


Fig. 7. Potential to generate energy (GJ/kg/y).

4 Conclusions

Energy crops for biofuel production can be grown on marginal soils due to their low requirements. Their cultivation on marginal soils irrigated with treated wastewater is particularly advantageous because they grow more if they are irrigated. The crop with the highest yield and most potential for energy production among the eight plants examined in this study was miscanthus. Despite WWTPs that produce more treated wastewater are near the cities and thus cover less marginal land area, this approach could be an opportunity for biofuels, especially if the issue of smaller WWTPs lacking treatment is overcome.

References

1. WBCSD: Biocombustíveis - Resumo Temático -Energia e Clima. <https://bcspportugal.org/wp-content/uploads/2013/11/publ-2008-Biocombustiveis.pdf>, last accessed 2023/09/04.
2. APA: Emissões de Gases com Efeito de Estufa. in Relatório do Estado do Ambiente. <https://rea.apambiente.pt/content/emiss%C3%B5es-de-gases-com-efeito-de-estufa>, last accessed 2023/05/27.
3. Wang J. et al.: Benefit analysis of multi-approach biomass energy utilization toward carbon neutrality. *The Innovation*, 4 (3), 100423 (2023).
4. Ashokkumar V. et al.: Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts - A critical review. *Bioresour. Technol.* 344, 126195 (2022)
5. UN, «Agenda 2030 - ODS». Acedido: 27 de fevereiro de 2023.
6. Nazari, M. T., Mazutti, J., Basso, L. G., Colla, L. M. Brandli, L.: Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review», *Environ. Dev. Sustain.* 23(8), 11139–11156 (2021).
7. Alesso, S. P., Tapias, R., Alaejos, J., Fernández, M.: Biomass Yield and Economic, Energy and Carbon Balances of *Ulmus pumila* L., *Robinia pseudoacacia* L. and *Populus* × *euramericana* (Dode) Guinier Short-Rotation Coppices on Degraded Lands under Mediterranean Climate. *Forests*, 12, (10) 1337 (2021).
8. Fernando, A. L., Costa, J., Barbosa, B., Monti, A., Rettenmaier N.: Environmental impact assessment of perennial crops cultivation on marginal soils in the Mediterranean Region. *Biomass Bioenergy*, 111, 174–186 (2018).
9. Hoff, H.: The Water, Energy and Food Security Nexus, Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm. <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf>, last accessed 2023/06/23.
10. Lazaro, L. L. B., Giatti, L. L., Bermann, C., Giarolla, A. Ometto, J. Policy and governance dynamics in the water-energy-food-land nexus of biofuels: Proposing a qualitative analysis model. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 149, 111384 (2021).
11. FAO: The Water-Energy-Food Nexus A new approach in support of food security and sustainable agriculture. <http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf>, last accessed 2024/03/18.
12. Foong, S. Y. et al.: The nexus between biofuels and pesticides in agroforestry: Pathways toward United Nations sustainable development goals. *Environ. Res.*, 214, 113751 (2022).
13. Abreu, M. et al.: Evaluation of the Potential of Biomass to Energy in Portugal—Conclusions from the CONVERTE Project, *Energies*, 13(4) 937, (2020).
14. Khanna, M. et al.: Redefining marginal land for bioenergy crop production. *GCB Bioenergy*, 13 (10) 1590–1609 (2021).
15. Elbersen, B. et al., «Mapping Marginal land potentially available for industrial crops in Europe», mar. 2019, doi: 10.5281/ZENODO.2586947.
16. Abreu, M. et al.: Evaluation of the Potential of Biomass to Energy in Portugal—Conclusions from the CONVERTE Project, *Energies*, 13(4) 937, (2020).
17. Elbersen, B. et al.: D2.6 Methodological approaches to identify and map marginal land suitable for industrial crops in Europe. doi: 10.5281/ZENODO.3539311 (2018).
18. Alexopoulou, E.: D1.3- List with the selected most promising industrial crops for marginal lands. doi: 10.5281/ZENODO.3539150 (2018).
19. Decreto-Lei n.º 119/2019 de 21 de agosto.
20. APA: Guia para a reutilização de água - usos não potáveis: Agência Port. Ambiente (2019).

21. DGAV: Enquadramento Legal de Cânhamo (*Cannabis sativa* L.) e Produtos à Base de Cânhamo enquanto Alimentos para Animais. (2023).
22. Alexopoulou, E.: D1.5 – Handbook with fact sheets of the existing resource-efficient industrial crops. doi: 10.5281/ZENODO.3539165 (2018).
23. Cossel, M., et al.: D4.1 Low-input agricultural practices for industrial crops on marginal land. doi: 10.5281/ZENODO.3539368 (2019).
24. Urban Waste Water Treatment map — European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-use-and-environmental-pressures/uwwtd/interactive-maps/urban-waste-water-treatment-maps-3>
25. Directive n° 91/271/CEE, mai. 1991.
26. European Commission. Joint Research Centre: The potential of water reuse for agricultural irrigation in the EU: a hydro economic analysis. LU: Publications Office, 2017.
27. Decreto Regulamentar n° 23/95