

## PROCESSO DE DECISÃO ESPACIAL MULTICRITÉRIO E MODELO MULTIOBJETIVO PARA A LOCALIZAÇÃO DE CENTRAIS DE BIOGÁS

**Sandra Silva**

Instituto Politécnico de Viana do Castelo e INESC Coimbra  
Praça General Barbosa 4900-347 Viana do Castelo, Portugal  
sandrasilva@esa.ipv.pt

**Luís Alçada-Almeida e Luís C. Dias**

Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra e INESC Coimbra  
Av. Dias da Silva, 165, 3004-512 Coimbra, Portugal  
alcada@fe.uc.pt; lmcaldas@fe.uc.pt

### RESUMO

As infraestruturas indesejáveis, como é o caso das centrais de biogás que usam efluentes animais como fonte de biomassa, exercem um efeito desagradável sobre as populações próximas da sua localização, apesar dos seus benefícios ambientais e económicos. A localização de centrais de biogás requer uma abordagem multiobjetivo, que é desenvolvida neste trabalho com o objetivo de definir o respetivo número e localização, a afetação destas às explorações leiteiras (fornecedoras de biomassa) e a sua capacidade. Para este objetivo concorre uma outra vertente: a avaliação da aptidão do solo para a localização das centrais de biogás. Esta avaliação é desenvolvida através de um processo de decisão espacial multicritério, utilizando critérios de ordem ambiental, económica e social definidos por especialistas e aplicando o método multicritério ELECTRE TRI (de forma interativa e com a consideração de cenários distintos) e Sistemas de Informação Geográfica (recorrendo à álgebra de mapas e à criação de grelhas vetoriais).

**PALAVRAS CHAVE.** Apoio à Decisão Multicritério, Sistemas de Informação Geográfica, Localização.

**Área principal:** Apoio à Decisão Multicritério (ADM ); PO na Área de Energia (EN); PO na Agricultura e Meio Ambiente (AG&MA).

### ABSTRACT

Undesirable facilities, as is the case of biogas plants that use animal manure as a source of biomass, have an unpleasant effect on people living around its location, despite its environmental and economic benefits. The location of biogas plants requires a multiobjective approach, which is developed in this work in order to specify its number and location, the allocation of these to dairy farms (suppliers of biomass) and its capacity. For this purpose, another strand is developed: the land-use suitability assessment to locating biogas plants. These assessments are developed through multicriteria spatial decision processes using environmental, economic and social criteria defined by experts and applying the multicriteria ELECTRE TRI method (interactively and considering different scenarios) and Geographic Information Systems (GIS) (using map algebra and vector-grid analysis).

**KEYWORDS.** Multicriteria decision support. Geographic Information Systems. Location.

**Main area:** Multicriteria decision support; Operational research in the area of Energy; Operational research in Agriculture and Environment.

## 1. Introdução

Os resíduos devem cada vez mais ser encarados como recursos valorizáveis e não apenas como materiais indesejáveis. A valorização, por exemplo, dos efluentes pecuários, além de reduzir a fatura energética do setor agropecuário, é essencial para a redução do impacto destes resíduos no solo, atmosfera e recursos hídricos. Os efluentes animais podem tornar-se uma importante fonte de energia renovável (Ma et al., 2005). O tratamento e valorização por Digestão Anaeróbia (DA) apresenta um enorme contributo na otimização da utilização dos nutrientes veiculados pelos efluentes animais (Holm-Nielsen et al., 2009). Um sistema bioenergético de DA produz metano, capturando-o e convertendo-o em eletricidade e calor, e ainda fertilizantes a serem reincorporados no sistema.

A localização de infraestruturas energéticas, em particular de centrais de biogás (que se caracterizam por sistemas bionergeticos de DA), definidas como infraestruturas indesejáveis, é uma tarefa complexa pela variedade de critérios envolvidos e pelo número de decisores e interesses distintos, por vezes, conflitantes. Este tipo de decisão tem de ter em conta muitos tipos de restrições, como a proximidade às áreas protegidas e urbanas, linhas de água, rede viária, entre outras, e ainda vários fatores ambientais, económicos e sociais como legislação nacional e internacional, oposição da população, etc.

O Apoio à Decisão Multicritério (ADM) oferece uma coleção de procedimentos, técnicas e algoritmos para estruturação e análise de problemas de decisão, tendo em conta vários critérios de avaliação, e promovendo uma participação ativa dos atores envolvidos no processo de tomada de decisão (Belton e Stewart, 2002), que se adequa a este tipo de problemas. Para além disso, os problemas de localização têm uma forte dimensão espacial (Church, 2002) e, como tal, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas essenciais na representação e análise destes problemas, pelas suas capacidades de armazenamento, gestão, análise, modelação e visualização de dados espaciais. A integração destas duas ferramentas, ADM e SIG, presta um apoio efetivo na abordagem a problemas de decisão espacial multicritério pelo envolvimento de um conjunto de alternativas geograficamente definidas e de um determinado conjunto de critérios de avaliação, tendo em consideração as preferências dos decisores.

Quaisquer infraestruturas, sobretudo as indesejáveis, não podem ser localizadas em qualquer ponto do espaço Euclidiano (Captivo e Clímaco, 2004). Antes de instalar centrais de biogás é essencial proceder a uma avaliação da aptidão do solo para identificar os locais mais adequados para a sua localização. A avaliação da aptidão do solo é o processo de determinação do seu nível de adequação para um determinado uso. Para além das características inerentes ao próprio solo, outros aspetos espaciais de um local, como a sua forma, localização e relações topológicas com outros tipos de entidade, podem ser de extrema relevância para esta avaliação. Um grande número de estudos em matéria da avaliação da aptidão do solo usando ADM e GIS têm sido publicados na área do ambiente/ecologia (Passuello et al., 2011), na localização de infraestruturas indesejáveis (Ferretti e Pomarico, 2012), energia (Sánchez-Lozano et al., 2014a), entre outras áreas de aplicação.

Após determinação de um conjunto de locais, classificados como os mais aptos, para instalação das centrais de biogás é necessário considerar o conjunto dos objetivos, por vezes conflitantes, relacionados com o custo, o risco, a segurança, a rejeição social, a equidade, entre outros, que se pretendem minimizar ou maximizar, estabelecendo restrições a respeitar. Neste trabalho estudamos o problema da localização multicritério com recurso à programação matemática multiobjetivo, em que o conjunto de soluções admissíveis é definido implicitamente por restrições analíticas e por objetivos definidos explicitamente através de funções. Nos problemas de localização multiobjetivo pretende-se decidir o número e a localização das infraestruturas a instalar e sua afetação às entidades que se pretendem satisfazer, de forma a otimizar determinados objetivos. Vários autores têm desenvolvido modelos multiobjetivo para problemas de localização multiobjetivo de

infraestruturas indesejáveis, tais como aterros sanitários (Rakas et al., 2004), instalações de gestão de resíduos sólidos urbanos (Erkut et al., 2008), instalações de incineradoras (Alçada-Almeida et al., 2009), de ecopontos (Coutinho-Rodrigues et al., 2012), entre outras.

Neste trabalho, desenvolve-se um processo de apoio à decisão espacial multicritério para a localização de infraestruturas bioenergéticas que inclui, inicialmente, a avaliação de aptidão do solo através do desenvolvimento de um processo de decisão espacial multicritério e, de seguida, a definição da sua localização entre os locais classificados como os mais aptos, considerando vários objetivos que pretendemos otimizar, como os custos e a rejeição social. De modo a ilustrar e a validar as componentes desenvolvidas, estuda-se um problema com dados reais relativo à localização de centrais de biogás para tratamento dos efluentes animais provenientes das explorações leiteiras, na Região Entre Douro e Minho (EDM), em Portugal.

## 2. Metodologia

### 2.1. Definição do Problema

Portugal debate-se com diversos problemas ambientais relacionados com os efluentes de origem animal. Tem-se verificado uma intensificação da pecuária, em áreas reduzidas, com elevada produção de efluentes cujo armazenamento, tratamento e destino final levantam problemas para o meio ambiente, para a produção animal e para o Homem.

A região EDM evidencia-se na produção nacional de leite, mas possui alguns problemas conhecidos de contaminação de águas e de solos. A necessidade de ultrapassar esta situação de desequilíbrio e a urgência em encontrar soluções para reutilização dos efluentes animais produzidos nas explorações leiteiras que, por um lado, cumpram o novo enquadramento legislativo, nacional e comunitário e, por outro, sejam soluções sustentáveis e economicamente viáveis, levou à consideração da implementação de centrais de biogás para valorizar estes recursos energéticos (renováveis).

A região em estudo caracteriza-se como a Bacia Leiteira Primária de EDM e é constituída por um conjunto de 10 concelhos: Viana do Castelo, Barcelos, Esposende, Póvoa de Varzim, Vila Nova de Famalicão, Vila do Conde, Santo Tirso, Trofa, Maia e Matosinhos, situada na região Noroeste de Portugal, com uma área de 1580 km<sup>2</sup>. As explorações leiteiras objeto de estudo são 1705 e abarcam cerca de 107 000 bovinos, que produzem cerca de 1,5 milhões de m<sup>3</sup>/ano de efluentes, o que equivale a cerca de 4017 m<sup>3</sup>/dia.

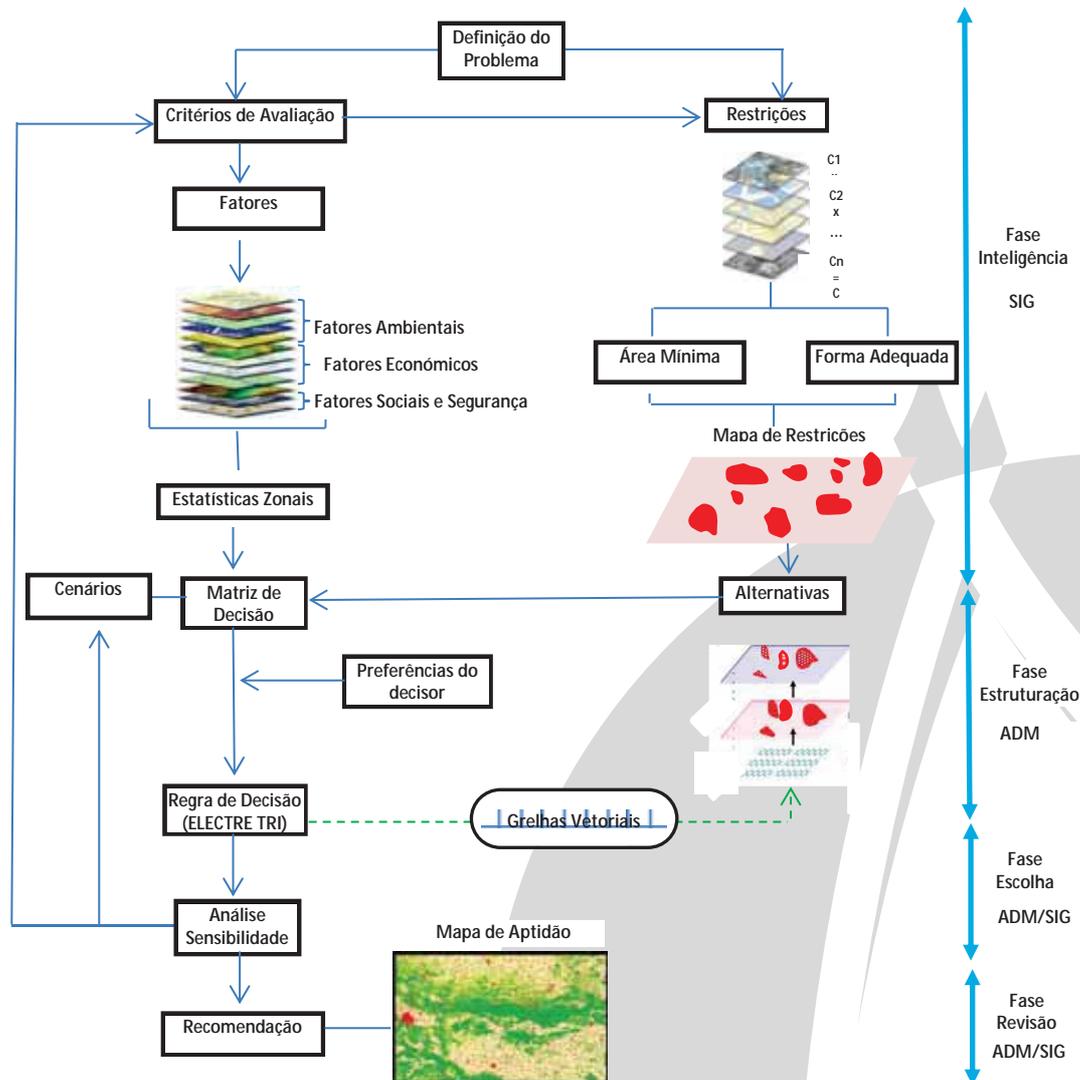
### 2.2. Processo de decisão espacial multicritério na avaliação da aptidão do solo

Para promover a instalação de sistemas de DA é essencial proceder a uma avaliação da aptidão do solo para definir a sua localização considerando preocupações biofísicas, ambientais, socioeconómicas e técnicas (Ma et al., 2005).

Nesta fase recorreremos a métodos ADM em conjunto com SIG para classificar os locais em categorias de aptidão, mais concretamente ao método de prevalência ELECTRE TRI (Roy e Bouyssou, 1993) por estar associado à problemática de classificação e por se adequar à avaliação da aptidão do solo principalmente pelas seguintes razões:

- lida simultaneamente com critérios quantitativos e qualitativos, significando que os parâmetros associados ao método podem ser definidos na unidade própria do critério, o que é importante uma vez que os critérios pertencem a diversos domínios (por exemplo, económicos e ecológicos);
- lida com alternativas incomparáveis, acontecendo com frequência uma alternativa possuir, por exemplo, várias vantagens económicas mas impactes ambientais graves, enquanto uma outra pode representar o cenário inverso;
- não é um método compensatório, o que significa que a obtenção de uma boa avaliação num critério pode não compensar uma má avaliação noutra critério, sendo assim compatível com o próprio conceito de aptidão.

O método ELECTRE TRI tem sido usado por vários autores em problemas ambientais ou energéticos (e.g., Madlener et al., 2009; Brito et al., 2010; Sánchez-Lozano et al., 2014b), mas não é comumente aplicado na avaliação da aptidão do solo. O processo de decisão espacial multicritério desenvolvido, definido por várias fases, está representado na Figura 1. O fluxograma segue, como base, a arquitetura definida por Malczewski (1999), enriquecida com novas formas de abordagem em determinadas etapas do processo, sobretudo no que se refere à construção e avaliação das alternativas, à forma como o método ADM é aplicado e, ainda, à consideração de cenários na sua aplicação.



**Figura 1:** Fluxograma do processo de decisão espacial multicritério desenvolvido neste trabalho.

O processo de decisão espacial multicritério na avaliação da aptidão do solo para a localização de infraestruturas inicia-se com a definição do problema: tipos de infraestrutura, região, objetivos, e demais dados pertinentes; de seguida procede-se à definição dos critérios de avaliação. Neste tipo de problemas, os critérios podem ser divididos em duas grandes categorias: restrições e fatores. Uma restrição é um critério rígido que determina quais os locais (áreas) que devem ser excluídos (ou incluídos) na avaliação da aptidão. Um fator é um critério que contribui para a classificação de aptidão, sem excluir nenhum local. Neste trabalho os critérios foram definidos por um especialista.

Pelas características associadas às infraestruturas de DA, quer por exigências

legais, quer por preocupações ambientais e sociais que lhe estão subjacentes, estas não podem ser localizadas em determinados locais e/ou na proximidade de outros. Começa-se assim por definir critérios de exclusão, que possuem um carácter booleano, excluindo locais que não podem ser considerados no processo de avaliação, como por exemplo: áreas protegidas, áreas urbanas, industriais e comerciais, edifícios, linhas de água, rede viária e distâncias de proteção mínima a estas, definidas por legislação. Para além destas restrições, consideramos a área mínima exigida e forma adequada. Este tipo de infraestrutura exige uma área mínima necessária ao seu funcionamento, sendo neste caso considerada 1 ha (hectare). Os locais elegíveis devem ainda possuir uma forma geométrica que permita a instalação das infraestruturas. Para avaliação dessa forma recorreremos ao índice de circularidade. Após esta fase, obtem-se o mapa de restrições com as alternativas elegíveis, mais concretamente, os locais aptos.

Seguidamente, o especialista definiu os fatores agupados em três dimensões: ambiental, económica, social e segurança. Uma central de biogás deve estar preferencialmente o mais afastada possível de elementos biofísicos como água e áreas de valor ecológico ou agrícola, a fim de reduzir o risco de contaminação e proteger o ambiente. O uso e a ocupação do solo também devem ser considerados por forma a minimizar os impactos com as atividades existentes e reduzir os riscos de infiltrações e consequentes contaminações. Por questões económicas, as centrais de biogás devem estar próximas da rede elétrica, das estradas e apresentar valores de declive baixos (dentro dos limites considerados nas restrições, para cada um dos casos) por forma a minimizar os custos associados, quer à injeção da energia produzida na rede elétrica para venda, quer ao transporte dos efluentes, quer à construção. Uma central de biogás tem um impacto significativo sobre a população que vive na proximidade desta, devido às preocupações associadas a este tipo de infraestrutura industrial, como questões estéticas, odores, segurança, ruído, desvalorização do valor das propriedades e riscos de saúde. Assim, as centrais devem preferencialmente ser localizadas em zonas afastadas das áreas urbanas, residenciais, comerciais e industriais. Para cada um dos fatores é então definido o seu objetivo (sentido de preferências): maximização ou minimização.

A cada um dos fatores é associada uma camada temática (*layer*) contendo os dados geográficos a ele associados. As características (valores) associadas a cada um dos fatores podem variar consideravelmente dentro da área limitada por cada local apto (em especial nos de maior dimensão).

A fim de se obter uma matriz de decisão com os dados associados a cada alternativa (área) para cada fator, de modo a ultrapassar a variação de valores num mesmo local associado, consideram-se os valores mínimo e máximo para cada fator. Tal permite definir dois cenários para cada alternativa, que designaremos de Piór e Melhor. Cada um destes cenários possui os valores mais baixos ou mais altos relativos a cada fator, dependendo do objetivo associado ser a maximizar ou a minimizar. As duas matrizes de decisão (uma por cada cenário) resultantes são dados de entrada para aplicação do método ELECTRE TRI. O objetivo é conseguir definir uma categorização de aptidão para os locais aptos em três categorias de aptidão que foram consideradas: Baixa, Média e Elevada. Caso a classificação da aptidão num determinado local coincida em ambos os cenários, esse local apto é classificado nessa categoria em particular. É importante notar que em alguns locais pode haver mais do que uma localização possível para a central. Para lidar com o facto de não obtermos uma classificação de aptidão única em alguns locais (caso em que os locais não são classificados na mesma categoria nos dois cenários) e para conseguir analisar mais pormenorizadamente esses locais, estes são subdivididos em zonas mais pequenas.

O processo de subdivisão dos locais é realizado através da geração de grelhas vetoriais no ArcGIS. O processo de geração de grelhas vetoriais subdivide locais de grande dimensão em células poligonais regulares de menor dimensão, mas obedecendo à área mínima exigida. Estas grelhas intersectam apenas os locais que, após aplicação do método

ELECTRE TRI, não foram ainda univocamente classificados em ambos os cenários, ou seja, a classificação varia entre categorias de aptidão. O objetivo é conseguir definir uma categorização mais precisa de aptidão das grelhas, dado que, sendo zonas mais pequenas, espera-se que as características dos fatores não difiram tanto, havendo uma maior homogeneidade. Para cada uma dessas grelhas, que passam a ser as alternativas nesta etapa, são determinados novamente os valores mínimo e máximo. Seguidamente são construídas as duas matrizes de decisão associadas a cada um dos cenários Melhor e Pior e é novamente aplicado o método ELECTRE TRI, obtendo-se a classificação de aptidão de cada uma das grelhas. No final, obtém-se uma classificação, tanto dos locais iniciais, como das grelhas, de acordo com as categorias definidas, cuja distribuição pode ser visualizada através do mapa de aptidão.

Para mais pormenores do processo espacial multicritério desenvolvido pode-se consultar Silva et al. (2014).

### **2.3. Modelo multiobjetivo para a localização de centrais de biogás**

As centrais baseadas em DA usando os efluentes animais como fonte de biomassa podem ser consideradas infraestruturas indesejáveis, porquanto existe uma oposição à sua instalação sobretudo pela população próxima da sua localização, pelos riscos ambientais, de saúde, odores, entre outros. Para além da rejeição social, a localização de centrais de biogás envolve custos de investimento, manutenção e operação, e os custos de transporte, que se pretende minimizar.

Neste trabalho recorremos a um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo (PLIMMO) para definir o número e a localização das centrais de biogás, a dimensão (capacidade de tratamento) e a afetação destas às explorações leiteiras. O modelo PLIMMO para o problema de localização-afetação de centrais de biogás desenvolvido, cujos detalhes podem ser consultados em Silva (2015), contém três funções objetivo de cariz económico e social.

Consideramos dois objetivos económicos: os custos de investimento inicial, operação e manutenção, e os custos de transporte. Estes dois objetivos, que representam custos associados à instalação e funcionamento das centrais, foram considerados em separado por se definirem como conflituosos neste problema: a minimização do custo de investimento inicial, operação e manutenção favorece um menor número de centrais, com maiores dimensões (economia de escala), ao passo que a minimização dos custos de transporte favorece um maior número de centrais e com menor dimensão. Caso fossem agregados num único objetivo esse efeito seria diluído ou mesmo anulado. Para além disso, a instalação e o funcionamento deste tipo de infraestruturas pode ser da responsabilidade de entidades distintas, por exemplo, uma entidade de capital associada ao investimento inicial e à manutenção, e uma empresa de transportes associada à recolha dos efluentes. A análise dos custos em separado permite assim avaliar a qualidade das soluções segundo as duas perspetivas.

Consideramos como objetivo de cariz social a rejeição social, que considera a oposição que este tipo de infraestrutura causa junto da população próxima da sua localização. Os objetivos económicos e sociais, em análise, são conflituosos: a rejeição social está em conflito com os custos de transporte, pois quanto mais afastadas estão as centrais das populações, menor a rejeição social, aumentando no entanto o custo de transporte por se afastarem simultaneamente da maioria das explorações (dado que no caso estudado as explorações situam-se em zonas muito próximas de áreas urbanas); por sua vez, a rejeição social está em conflito com os custos de investimento inicial, operação e manutenção pois as centrais mais pequenas lidam com menor rejeição social por parte das populações próximas, mas isso implica aumentar o número de centrais e logo os custos associados, degradando a economia de escala.

O problema de localização discreta tratado utiliza como candidatos os vários locais

classificados como mais aptos através da avaliação da aptidão do solo (descrita na secção anterior). Consideramos tratarem-se de unidades de biogás centralizadas, que se caracterizam como centrais que tratam os efluentes oriundos de várias explorações leiteiras, localizadas em diferentes locais da área de recolha. Assumimos que a totalidade de efluentes produzidos nas explorações leiteiras é tratada e que a quantidade de efluentes produzida em cada exploração pode ser afeta a mais do que uma central de biogás. Consideramos três tipos de central: Pequena (200 kWe), Média (500 kWe) e Grande (1000 kWe), de acordo com a quantidade de efluentes processados e quantidade de energia elétrica produzida. Foi definida para cada tipo de central, com base na literatura consultada, a quantidade mínima e máxima de efluentes a tratar diariamente para que a central seja económica e tecnicamente viável. Assumimos também que os custos de investimento inicial, operação e manutenção dependem das diferentes dimensões das centrais, ou seja, estes custos estão sujeitos a economias de escala. No cálculo dos custos de operação e manutenção é considerado o tempo médio de vida de uma central de biogás. O custo de transporte de efluentes das explorações para as centrais é baseado na quantidade transportada, na distância (euclidiana) percorrida (ida e volta) e no custo por km. Neste trabalho é ainda exigido que a central se encontre abaixo de uma certa distância máxima das explorações associadas, por forma a manter as propriedades da biomassa (os efluentes).

De seguida, apresentamos a notação utilizada na formulação do modelo:

**Índices:**

$i$  - explorações leiteiras ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $j$  - locais aptos ( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $k$  - tipo de central de biogás ( $k = 1, \dots, l$ );  $h$  - freguesias ( $h = 1, \dots, p$ ) na região em estudo

**Parâmetros necessários:**

$m_i$  quantidade de efluentes ( $m^3$ /dia) produzida na exploração leiteira  $i$ ;  
 $c_k^{min}$  quantidade mínima de efluentes ( $m^3$ /dia) a processar diariamente numa central de biogás do tipo  $k$  que justifica, e possibilita, a sua abertura;  
 $c_k^{max}$  quantidade máxima de efluentes ( $m^3$ /dia) que uma central de biogás do tipo  $k$  consegue processar diariamente;  
 $a_j$  área (em ha) do local apto  $j$ ;  
 $a_k^{min}$  área mínima (em ha) exigida para instalação de uma central de biogás do tipo  $k$ ;  
 $d_{ij}$  distância Euclidiana (em km) entre a exploração leiteira  $i$  e o (centro do) local apto  $j$ ;  
 $d$  distância máxima permitida (em km) entre as explorações leiteiras e as centrais de biogás associadas;  
 $v$  tempo (médio) de vida de uma central de biogás (em anos);  
 $t$  custo de transporte (em €) de  $1 m^3$  de efluentes por km;  
 $f_k$  custo de investimento inicial (em €) de uma central de biogás do tipo  $k$ ;  
 $g_k$  custo de operação e manutenção (em €), por ano, de uma central de biogás do tipo  $k$ ;  
 $\theta$  *buffer* (ou raio), em km, para qualquer local apto, que envolve a população que manifesta preocupação com a proximidade da central de biogás (distância fixa);  
 $r_{hjk}$  rejeição social da população da freguesia  $h$ , que está no *buffer* de  $\theta$  km do local apto  $j$  relativamente à localização de uma central do tipo  $k$ ;  
 $p_h$  população da freguesia  $h$ ;  
 $a_h$  área (em ha) da freguesia  $h$ ;  
 $a_{hj}^\theta$  área (em ha) da freguesia  $h$ , que está contida no *buffer* de  $\theta$  km do local apto  $j$ ;  
 $p_j^\theta$  número de pessoas que estão até uma distância de  $\theta$  km do local apto  $j$ ;  
 $s_k$  penalização social para as centrais de biogás do tipo  $k$

*Variáveis de decisão:*

- $q_{ij}$  quantidade de efluentes (em  $m^3$ ) da exploração leiteira  $i$  afeta ao local apto  $j$  por dia. Esta variável só está definida para os pares  $(i, j)$  tais que  $d_{ij} \leq d$  (isto é, a distância entre as explorações e centrais tem de ser menor ou igual a uma distância fixa para que possa existir transporte de efluentes).
- $y_{jk}$  1, se a central de biogás do tipo  $k$  é localizada no local apto  $j$ ; 0, caso contrário (variável binária). Esta variável só está definida para os pares  $(j, k)$  tais que  $a_j \geq a_k^{min}$  (isto é, a área do local apto  $j$  tem de ser maior ou igual à área exigida pelo tipo  $k$  da central a instalar).

A primeira função objetivo,  $Z_1$ , é expressa em euros e consiste na minimização dos custos de investimento inicial, operação e manutenção, suportados durante a vida útil das centrais de biogás a instalar:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ a_j \geq a_k^{min}}}^l (f_k + v g_k) y_{jk} \quad (1)$$

A função objetivo  $Z_2$ , também em euros, representa a minimização dos custos de transporte diários inerentes a cada configuração (solução) de centrais e afetações de explorações:

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ d_{ij} \leq d}}^n 2t d_{ij} q_{ij} \quad (2)$$

A função objetivo  $Z_3$  representa a minimização da rejeição social da população afetada pela localização de infraestruturas a menos de uma determinada distância (*buffer*):

$$\text{Min } Z_3 = \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ a_j \geq a_k^{min}}}^l r_{hjk} y_{jk} = \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ a_j \geq a_k^{min}}}^l p_j^\theta s_k y_{jk} \quad (3)$$

A rejeição social é avaliada considerando a população (homogeneamente distribuída) incluída num *buffer* de  $\theta$  km a partir dos locais aptos  $j$  ( $p_j^\theta$ ), determinada através do quociente entre a área da freguesia contida no *buffer* ( $a_{hj}^\theta$ ) e a área total dessa freguesia ( $a_h$ ), considerando ainda a população total dessa freguesia ( $p_h$ ), da seguinte forma:  $p_j^\theta = \sum_{h=1}^p p_h \times \frac{a_{hj}^\theta}{a_h}$ . Para além disso, na determinação da rejeição social é ainda considerado um fator penalizante ( $s_k$ ) que é um fator de agravamento considerado em função da área ocupada por cada tipo de central. Consideramos que o impacto da instalação de uma central de um determinado tipo é determinado em função da área ocupada pela central, ou seja,  $s_k = a_k^{min}, \forall k = \{1, 2, 3\}$ .

As restrições consideradas asseguram que (v. formulação detalhada em Silva, 2015):

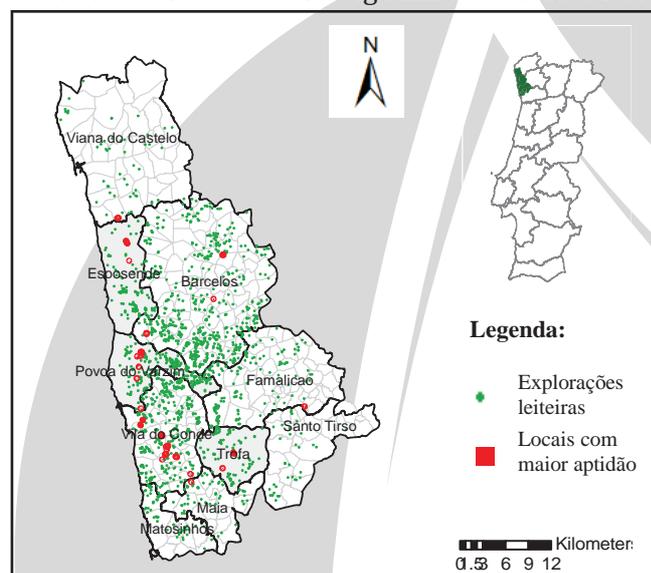
- a quantidade total transportada, por dia, de uma qualquer exploração para o conjunto de centrais de biogás associado, é igual à produção diária da exploração;
- em cada local apto é instalada, no máximo, uma central de biogás (de qualquer dos tipos);
- a quantidade de efluentes tratados por dia em cada central tem de ser superior à capacidade mínima exigida, e inferior à capacidade máxima (em  $m^3$ ) associada a cada tipo de central (aberta);
- a quantidade transportada de uma exploração para uma central tem de ser positiva (ou nula).

### 3. Resultados

O processo de decisão espacial multicritério na avaliação da aptidão do solo para localização de centrais de biogás inicia-se com a consideração de três restrições (critérios exclusão, área mínima e forma adequada) obtendo-se 318 locais aptos para a implementação de uma central de biogás, com áreas que variam entre 1 ha e 35,4 ha. Seguidamente, é aplicado o método ELECTRE TRI considerando estes locais aptos como alternativas, para cada cenário (Pior e Melhor) e considera-se os valores definidos pelo especialista para os parâmetros associados ao método ELECTRE TRI: perfis de referência, limiares de indiferença e preferência, veto, coeficientes de importância e nível de corte (ver em Silva et al., 2014 os valores definidos pelo especialista). O método é aplicado duas vezes, tendo como base duas matrizes de decisão distintas associadas aos diferentes cenários, por forma a obter uma classificação de aptidão para os locais aptos. Das 318 alternativas (locais aptos), 255 são classificados na mesma categoria em ambos os cenários (245 na categoria Baixa Aptidão, 9 na categoria Média Aptidão e 1 na categoria Aptidão Elevada) e 63 alternativas não são classificadas de forma definitiva (22 Baixa-Média Aptidão, 20 Baixa-Elevada Aptidão e 21 Média-Elevada Aptidão).

Para uma classificação mais precisa dos 63 locais (polígonos) ainda não definitivamente classificados numa determinada categoria é realizada uma subdivisão destes recorrendo-se à geração de grelhas, a fim de obter uma classificação mais específica. Neste estudo, construíram-se grelhas quadrangulares com 2 ha de área. Intersectaram-se as grelhas com os 63 locais em análise obtendo-se 513 grelhas. Tal como na fase anterior, também é necessário exigir que cada uma das alternativas (que nesta fase são as grelhas) tenha a área mínima de 1 ha e forma adequada, obtendo-se 109 grelhas, que são as alternativas para a nova aplicação do método ELECTRE TRI. São igualmente considerados

os cenários Pior e Melhor, através da definição de duas novas matrizes de decisão, obtidas considerando os valores mínimos e máximos das grelhas relativamente aos fatores em estudo, obtendo-se 43 classificadas na mesma categoria e 66 em categorias distintas. Considerando o resultado da classificação da aplicação do método ELECTRE TRI para os dois tipos de alternativas obtiveram-se 41 locais (8 locais aptos e 33 grelhas) classificados com maior aptidão, sendo que alguns destes locais são contíguos decidiu-se agregar esses locais, obtendo-se assim um total de 27 locais com maior aptidão ( $n = 27$ ) cujas áreas variam entre 1,038 e 6,674 ha (Figura 2).



**Figura 2:** Mapa da distribuição espacial das explorações leiteiras e dos locais com maior aptidão.

Definimos três tipos de centrais de biogás centralizadas ( $l = 3$ ) com dimensões distintas e baseando-nos em vários trabalhos definimos o número de animais associado a cada tipo, a quantidade mínima de efluentes a tratar em cada tipo de central, o custo de investimento inicial, o custo de operação e manutenção para um tempo média de vida da central de 20 anos ( $v = 20$ ), a área mínima exigida para cada tipo de central, o custo de transporte e a distância máxima a considerar na recolha dos efluentes.

O problema PLIMMO desenvolvido contém 1786 restrições e 37 396 variáveis, das quais 49 são binárias. Para obter um subconjunto de soluções eficientes usamos as

seguintes duas abordagens: (1) Otimização da soma ponderada das  $p$  funções objetivo; (2) Minimização da distância a um ponto de referência. Os resultados são obtidos usando o CPLEX 12.5.

Na abordagem (1), numa primeira etapa, cada função objetivo é minimizada individualmente, considerando pesos infinitesimais ( $\varepsilon$ ) para as outras funções objetivo (para não se obterem soluções dominadas). Obtêm-se assim as soluções designadas por Opt1, Opt2 e Opt3, representando os ótimos individuais de cada função objetivo apresentados na Tabela 1. Através das soluções Opt1, Opt2 e Opt3 é determinada a solução ideal  $z^* = (46\ 032, 5234, 263\ 909)$ . Também é determinada a solução nadir, que é constituída pelos piores valores obtidos para cada uma das funções objetivo, sendo  $z^{nad} = (55\ 748, 7492, 536\ 812)$ .

A outra forma de abordagem (2) minimiza a distância à solução ideal (que foi o ponto de referência definido) considerando duas métricas: na solução 4 usamos a métrica  $L_\infty$  (Chebyshev) e na solução 5 a métrica  $L_1$  (Manhattan). Os valores da função objetivo obtidos para essas soluções estão representados nas linhas “ $L_\infty$  (Norm)” e “ $L_1$  (Norm)”, respetivamente, na Tabela 1. Note-se que, em diálogo com os decisores finais, poderão ser atribuídos diferentes pesos às diferentes funções objetivo para formar uma função escalarizante, seja para maximizar uma soma ponderada, seja para minimizar uma distância de Chebyshev ponderada (Clímaco et. al, 2003).

Soluções	Objetivos				Tipo de Central de Biogás			Iterações		
	Designação	Z <sub>1</sub> – Custos de Inst., Oper. e Manut. (milhares €)	Z <sub>2</sub> – Custos de Transp. (€)	Z <sub>3</sub> – Rejeição Social (n.º de pessoas)	N.º de Centrais de Biogás	Pequena	Média	Grande	Tempo de execução (seg.)	N.º
#1	Opt 1 ( $1 - 2\varepsilon; \varepsilon; \varepsilon$ )	46 032	6 242	285 679	13	1	5	7	0,8	4 388
#2	Opt 2 ( $\varepsilon; 1 - 2\varepsilon; \varepsilon$ )	55 748	5 235	536 812	25	14	7	4	0,6	1 815
#3	Opt 3 ( $\varepsilon; \varepsilon; 1 - 2\varepsilon$ )	46 956	7 492	263 909	15	3	6	6	0,8	4 388
#4	$L_\infty$ (Norm)	46 872	6 007	302 938	14	1	7	6	4,0	9 805
#5	$L_1$ (Norm)	46 032	6 242	285 679	13	1	5	7	7,5	13 680
	Ideal	46 032	5 235	263 909						
	Nadir	55 748	7 492	536 812						

Tabela 1: Sumário de cinco soluções eficientes.

Considerando este subconjunto de soluções eficientes verifica-se que, para processar a quantidade diária de efluentes ( $4017\ m^3$ ) proveniente das 1705 explorações, tendo em consideração a capacidade associada a cada tipo de central de biogás definido, é necessário abrir pelo menos 13 centrais. Minimizando apenas a função objetivo (1) (custos de investimento inicial, manutenção e operação) abrem-se 13 centrais de biogás. Neste caso, é favorecida a abertura de centrais com maior dimensão dado que os custos das centrais do tipo Médio e Grande são menores por  $m^3$  processado. Minimizando os custos de transporte o número de centrais aumenta, atingindo o seu valor máximo (25 centrais, apenas dois locais candidatos não são considerados), sendo a sua maioria do tipo Pequeno. Tal provoca, necessariamente, um aumento dos custos de investimento inicial, manutenção e operação e um aumento da rejeição social por implicar um maior número de pessoas afetadas. Quando se minimiza a rejeição social obtém-se uma configuração com 15 centrais abertas, sendo favorecida a instalação de centrais do tipo Média e Grande para albergar a maior quantidade de efluentes, de forma a não abrir em outros locais de maior impacte social, o que provoca sobretudo um aumento nos custos de transporte.

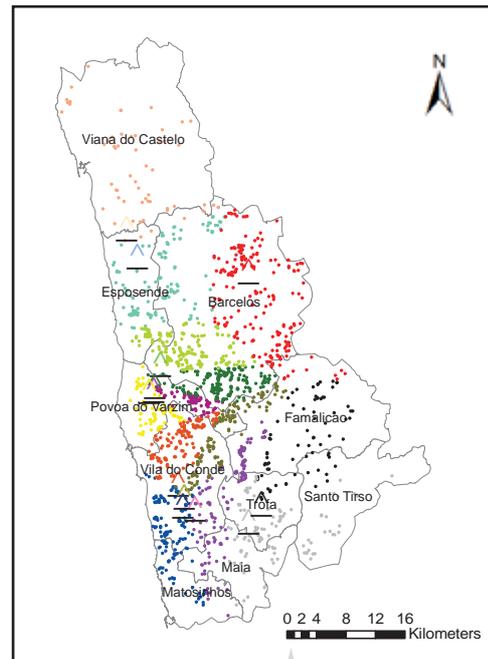
Por forma a visualizar a localização das centrais de biogás na região EDM e as explorações que lhes estão afetas, é possível representar qualquer solução através de um mapa (v. exemplo na Figura 3) recorrendo ao ArcGIS.

### 3. Conclusões

Neste trabalho contribuímos para a obtenção de resposta às seguintes duas questões, relacionadas com o desenvolvimento do sistema de decisão espacial multicritério: “Como desenvolver um processo de apoio à decisão espacial multicritério na análise de aptidão do solo para implementação de uma infraestrutura bioenergética?” e “Como otimizar a localização, número e dimensão das infraestruturas, considerando diferentes objetivos?”. Para responder a estas duas questões desenvolvemos um processo de decisão espacial multicritério e um modelo de programação linear inteira-mista multiobjetivo e, deste modo, reforçamos o uso de diferentes técnicas multicritério na análise do problema de localização, interligando-as com os SIG, contribuindo deste modo para a literatura dos problemas de localização.

Na classificação da aptidão do solo recorreremos a um método multicritério, o ELECTRE TRI, que em conjunto com ferramentas SIG consegue reduzir o número de alternativas, obtendo os locais com maior aptidão para a implementação de um determinado tipo de infraestrutura. Os resultados obtidos mostram que o processo de decisão espacial multicritério desenvolvido fornece uma abordagem ampla, multidimensional e adequada ao problema de avaliação da aptidão de solos para implementação de centrais de biogás (ou outro tipo de infraestruturas).

Para otimizar a localização destas infraestruturas bioenergéticas, entre os locais mais aptos obtidos, recorreremos a um modelo multiobjetivo para a definição do seu número, dimensão e afetação destas às fontes de biomassa, tendo em consideração diferentes objetivos como a minimização dos custos de investimento inicial, manutenção e operação, dos custos de transporte e, ainda, a minimização da rejeição social. Na análise efetuada foram geradas soluções diversas, usando dois procedimentos distintos, por forma a dar a conhecer ao decisor um conjunto distinto de possíveis soluções e ajudá-lo a perceber as repercussões distintas de optar por cada uma delas, quer quanto ao valor das funções objetivo obtido, quer ao número de centrais abertas e ao seu tipo, quer ainda quanto à quantidade de efluentes das explorações afetas a cada central. O conhecimento destas soluções é um ponto de partida para o estudo compromissos interessantes através da variação do peso de cada objetivo, por forma a melhorar o desempenho social, os custos de investimento, operação e manutenção ou os custos de transporte, consoante as preferências dos decisores. A escolha da solução final deve ser feita por um painel de especialistas, grupos interessados e decisores, devendo estes representar as diferentes perspetivas envolvidas neste tipo de problemas.



**Figura 3:** Explorações leiteiras afetas a cada central de biogás relativamente à solução “L1 (Norm)”.

## Referências

- Alçada-Almeida L., Coutinho-Rodrigues J., Current J.** (2009). A multiobjective modeling approach to locating incinerators. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43, 111–120.
- Belton, V., Stewart, T.** (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic, Dordrecht.
- Brito, A. J., Almeida, A. T., Mota, C. M.M.** (2010). A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 812-821.
- Captivo, M. E., Clímaco, J. N.** (2004). Problemas de localização multicritério: discussão de alguns casos. Atas XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Church, R. L.** (2002). Geographical information systems and location science. *Computers. Operations Research*, 29, 541-562.
- Clímaco, J.N, Hengeller Antunes, C., Alves, M.J.G.** (2003). *Programação Linear Multiobjetivo*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L., Alçada-Almeida, L.** (2012). A bi-objective modeling approach applied to an urban semi-desirable facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 223(1), 203-213.
- Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., Tjandra, S.A.** (2008). A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. *European Journal of Operational Research*, 187, 1402-1421.
- Ferretti, V., Pomarico S.** (2012). Integrated sustainability assessments: a spatial multicriteria evaluation for siting a waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy). *Environment, Development and Sustainability*, 14(5), 843-867.
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., Oleskowicz-Popiel, P.** (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100, 5478-5484.
- Ma, J., Scott, N. R., DeGloria, S., Lembo, A. J. L.** (2005), Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. *Biomass and Bioenergy*, 28: 591-600.
- Madlener, R., Hengeller Antunes, C., Dias, L. C.** (2009). Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 197, 1084-1094.
- Malczewski, J.** (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Wiley, New York.
- Passuello, A., Cadiach, O., Perez, Y., Schuhmacher M.** (2011). A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. *Environment International*, 38(1), 1-9.
- Rakas, J., Teodorović, D., Kim, T.** (2004). Multi-objective modeling for determining location of undesirable facilities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(2): 125–138.
- Roy B., Bouyssou, D.** (1993). Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. *Economica*, Paris.
- Sánchez-Lozano, J.M., García-Cascales, M.S., Lamata, M.T.** (2014a). Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region of Murcia, Spain. *Energy*, 73, 311–324.
- Sánchez-Lozano, J. M., Hengeller Antunes, C., García-Cascales, M.S., Dias, L.C.** (2014b). GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66, 478-494.
- Silva, S., Alçada-Almeida, L., Dias, L.C.** (2014). Biogas plants site selection integrating Multicriteria Decision Aid methods and GIS techniques: A case study in a Portuguese region. *Biomass and Bioenergy*, 71, 58-68.
- Silva, S.** (2015). Sistema de Apoio à Decisão Espacial Multicritério na Localização de Centrais de Biogás. Tese de Doutoramento em Gestão-Ciência Aplicada à Decisão, Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra.