

# ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SORDO (MILA REAL) PELO MÉTODO FUZZY-DRASTIC

## VULNERABILITY ANALYSIS TO GROUNDWATER CONTAMINATION IN THE SORDO RIVER HYDROGRAPHIC BASIN (MILA REAL) BY THE FUZZY-DRASTIC METHOD

**G. J. P. Carvalho**

Estudante do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica da UTAD // gjpcarvalho@gmail.com

**F.A.L. Pacheco**

Prof Auxiliar da UTAD e Centro de Química da UTAD // Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000 Vila Real // fpacheco@utad.pt

**RESUMO:** A bacia hidrográfica do rio Sordo foi estudada relativamente à sua vulnerabilidade face à eventual contaminação das suas águas subterrâneas, sendo para tal utilizada uma variante do modelo DRASTIC conhecida genericamente como *fuzzy*-DRASTIC. Os dados relativos à bacia, indispensáveis à avaliação da vulnerabilidade, são apresentados na forma de mapas cobrindo os temas da altimetria, litologia e fracturação, solos e ocupação da terra, geometria da superfície freática e distribuição espacial da recarga aquífera. Após descrição da metodologia *fuzzy* adoptada (modelo do padrão de reconhecimento multi-objectivos) apresentam-se os resultados da avaliação da vulnerabilidade, comparando-os com os obtidos através da aplicação do modelo DRASTIC original ao mesmo conjunto de dados. Verifica-se que a avaliação segundo o modelo *fuzzy*-DRASTIC atribui maior vulnerabilidade ao meio, em média cerca de 6,3% e com expressão cartográfica significativa.

**Palavras-chave:** recursos hídricos subterrâneos, contaminação.

**ABSTRACT:** The hydrographic basin of Sordo river was studied for its vulnerability resulting from the eventual contamination of their groundwaters, using a variant of the DRASTIC model broadly known as *fuzzy*-DRASTIC. The data pertaining to the basin, required for the evaluation of vulnerability, are presented as a series of maps covering the themes of altimetry, lithology and fracturing, soils and land occupation, geometry of the phreatic surface, and spatial distribution of the aquifer recharge. After description of the adopted *fuzzy* method (multi-objectives pattern recognition model), the results of vulnerability evaluation are presented and compared to those obtained from application of the original DRASTIC model to the same dataset. The evaluation according to the *fuzzy*-DRASTIC model attributes more vulnerability to the medium than does the original model, the difference being on average 6,3% and showing cartographic relevance.

**Keywords:** groundwater resources, contamination.

## 1. INTRODUÇÃO

A avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos à contaminação pelo método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) é determinada por sete parâmetros, com importância diversa, identificados por cada uma das letras do acrónimo DRASTIC a que correspondem a profundidade do topo do aquífero (D, peso 5), a recarga do aquífero (R, 4), a tipologia do material do aquífero (A, 3), o tipo de solo (S, 2), a topografia (T, 1), o impacto da zona não saturada ou vadosa (I, 5), e a condutividade hidráulica do aquífero (C, 3). Os modelos de avaliação ou decisão genericamente designados por *fuzzy* surgem normalmente como ferramentas de aperfeiçoamento de determinada metodologia. Aplicada ao índice DRASTIC, a modelação *fuzzy* tenta ilustrar que a rigidez dos limites e pesos aplicados aos diferentes parâmetros de avaliação da vulnerabilidade não será o fim da pesquisa, surgindo os métodos *fuzzy* como complementos a uma investigação mais profunda, que se adapta e transforma consoante as particularidades do meio que se estuda. Ligados à tradução do termo *fuzzy* aparecem os termos *indistinto*, *confusão* ou *mistura*.

Introduzidas por Zadeh (1965), a lógica *fuzzy* e a teoria *fuzzy* têm sido utilizadas em modelos de tomada de decisão ambíguos e incertos. O conceito básico da lógica *fuzzy* é simples: as afirmações não são só verdadeiras ou falsas; na teoria, ser parcialmente verdadeiro e falso em simultâneo também é possível, em proporções definidas pelas designadas funções membro (Afshar *et al.*, 2007).

Vários autores aplicaram modelos *fuzzy* com fins diversos, adaptando a sua metodologia ao caso que estavam a estudar, do que resultou a criação de novos métodos baseados nas características indistintas das propriedades físicas dos locais em investigação. Por exemplo, Zhou *et al.* (1999) verificaram o funcionamento de um padrão *fuzzy* multi-objectivos, aplicado ao índice DRASTIC, na zona nordeste da China. Chen & Fu (2003) investiram no reconhecimento da vulnerabilidade das águas subterrâneas através de um padrão indistinto baseado no DRASTIC, na Península Dalian na região nordeste da China. Dixon (2005) também propôs uma análise *fuzzy* com base no modelo DRASTIC, numa área do vale do rio Mississipi, no Arkansas, EUA. Mao *et al.* (2006) aplicaram um padrão *fuzzy* para a avaliação da vulnerabilidade à poluição na área de Zhangji (China). Afshar *et al.* (2007) estudaram a vulnerabilidade das águas subterrâneas baseadas nas regras de um sistema indistinto a uma escala regional, comparando os resultados com os do método

do DRASTIC. E, por fim, Nobre *et al.* (2007) dedicaram a sua pesquisa aos recursos aquíferos da cidade de Maceió (Estado de Alagoas, Brasil), através de um modelo de hierarquia *fuzzy* para a avaliação da sensibilidade natural de um aquífero costeiro.

Foram aqui realçados estes autores, por terem uma influência directa na pesquisa e aplicação de um modelo *fuzzy* no presente trabalho. Contudo, a aplicação desta metodologia indistinta tem muitas outras aplicações, de um leque bastante variado de contextos e disciplinas/ áreas de investigação, com bases diversas que originam resultados e conclusões diversificadas.

O objectivo do presente estudo é o de aplicar à bacia hidrográfica do Rio Sordo o método *fuzzy* do "Padrão de Reconhecimento Multi-Objectivos" desenvolvido por Zhou *et al.* (1999), comparando os resultados com os do modelo original aplicado à mesma bacia por Pacheco *et al.* (2004).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Sordo localiza-se no Norte de Portugal, mais precisamente no distrito de Vila Real. Integra-se na extensa bacia hidrográfica do rio Douro, ocupando uma superfície com cerca de 50 km<sup>2</sup> e sendo atravessada pelo IP4 e pelas Estradas Nacionais N15 e N304. Os núcleos da população residente encontram-se dispersos por toda a área da bacia (figura 1).

Em termos altimétricos a bacia hidrográfica varia desde os 185 até os 1300 metros (figura 2), possuindo declives por vezes superiores a 30% nas extremidades da bacia, sendo a zona central pouco inclinada.

Sob o ponto de vista geológico (figura 3), afloram na área rochas cristalinas em que dominam metassedimentos Paleozóicos intruídos por granitos Hercínicos, estes com expressão na zona mais a jusante da bacia hidrográfica. Os depósitos recentes têm uma representação significativa na zona de vale, constituindo uma mancha com cerca de 3,2 km<sup>2</sup>. Na zona de contacto entre os granitos e os metassedimentos são frequentes intrusões filonanas de aplitos cuja orientação é predominantemente NW-SE. Este dique aplítico serviu de barreira à drenagem do vale da Campeã, favorecendo a acumulação dos depósitos coluviais-aluviais provenientes dos cumes do Marão e do Alvão. São ainda frequentes filões de quartzo, de direcção variável, que surgem dispersos nas formações de rochas cristalinas. A fracturação é intensa salientando-se como dominantes o sistema com direcção NE-SW a NNE-SSW e o sistema conjugado NW-SE. A partir de fotografias aéreas à escala 1:25 000 foi feita a interpretação de lineamentos estruturais que serviu de base ao mapa de densidade de lineamentos (figura 4), no qual se representa o comprimento de lineamentos por unidade de área (Pacheco *et al.*, 2004).

---

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em Junho de 2009, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em Setembro de 2009. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 31, Nº 1, 65-76, Março de 2010.  
© APRH, ISSN 0870-1741

De acordo com Agroconsultores e COBA (1991), os tipos de solo que cobrem a maior parte da bacia hidrográfica do rio Sordo são os leptossolos (42,3 km<sup>2</sup>), surgindo com menor representação, na zona do vale da Campeã, os fluvissois (5,9 km<sup>2</sup>), e no sector mais a jusante da bacia hidrográfica os antrossolos (3,0 km<sup>2</sup>). As áreas urbanas ocupam cerca de 0,5 km<sup>2</sup> (figura 5). O mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Sordo apresenta-se na figura 6, podendo distinguir-se quatro tipos principais de ocupações: áreas agrícolas, caracterizadas por zonas destinadas a culturas de regadio ou sequeiro, por vinhas e pastagens, e por zonas onde a agricultura forma um mosaico integrado com espaços naturais; áreas florestais, constituídas essencialmente por manchas de resinosas ou mistas, por vezes sujeitas a desbastes e replantações; espaços naturais, que integram fundamentalmente os lameiros, os matagais e as zonas de vegetação esparsa ou rocha nua; espaços urbanos e industriais, dominados pelos povoados dispersos da região, por vezes numa estrutura complexa de aglomerados rodeados ou intervalados por zonas agro-florestais, e pelos equipamentos industriais da Campeã.

Os sistemas aquíferos dominantes são de tipo fissural e dependem, naturalmente, da fracturação e alteração dos afloramentos. Os depósitos de cobertura, pela elevada produtividade, poderão constituir bons sistemas aquíferos. As espessas camadas de alte-

ração, que se associam em particular às rochas metassedimentares, originam sistemas hidrogeológicos com elevado potencial de armazenamento, constituindo aquíferos subsuperficiais significativos que servem também de elementos de recarga profunda (Pacheco *et al.*, 2004). Com base na determinação da profundidade do nível hidrostático (NHE) em 41 poços, no período Maio-Julho de 2003, foi possível delinear uma representação da superfície freática de Primavera-Verão, que se apresenta com alguma reserva devido à falta de uniformidade relativamente à distribuição espacial dos poços (figura 7). Os valores medidos variam entre 0,2 e 10 metros, sendo em média de 2,3 metros. Verifica-se serem consideravelmente superiores nas zonas de montanha. O inventário de nascentes, conduzido no mesmo período, e a monitorização dos caudais em 31 das nascentes inventariadas, desenvolvida entre Julho de 2002 e Outubro de 2003, permitiram estimar a recarga representativa do ano hidrológico 2002/03 (figura 8), que se apresenta com reserva idêntica à da figura 7. Os valores associados a cada nascente são muito variados, indo desde um mínimo de 2,4 mm/ano a um máximo de 534 mm/ano, facto que se associa à enorme diversidade de condições hidrológicas que afectam as respectivas bacias de drenagem, em particular a topografia, a ocupação do solo, a condutividade hidráulica e porosidade eficaz das rochas, etc.

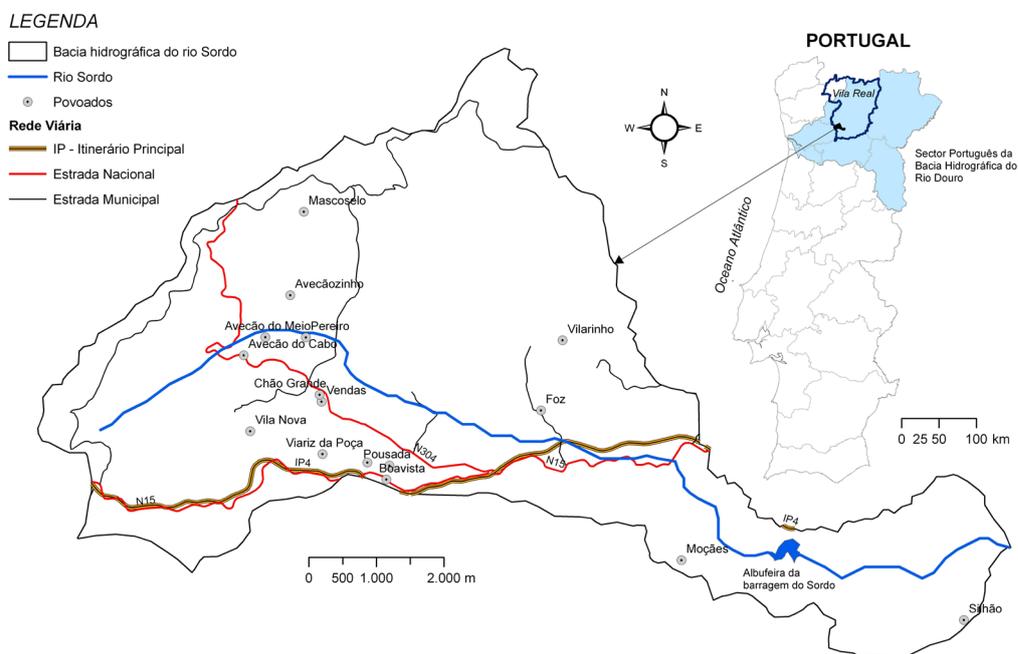


Figura 1 - Enquadramento geográfico da bacia hidrográfica do rio Sordo.

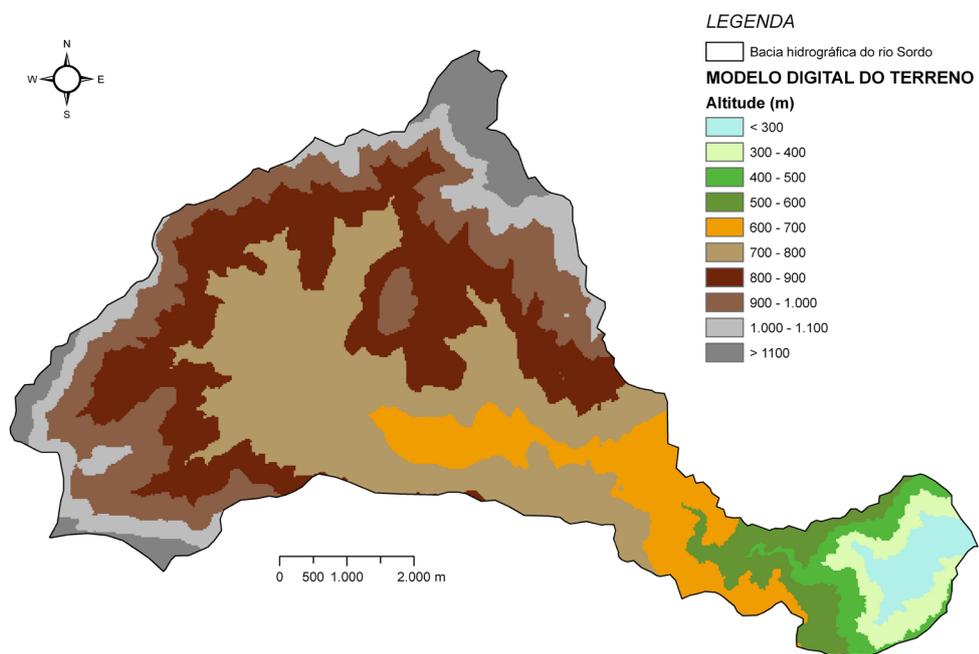


Figura 2 - Modelo digital da bacia hidrográfica do rio Sordo.

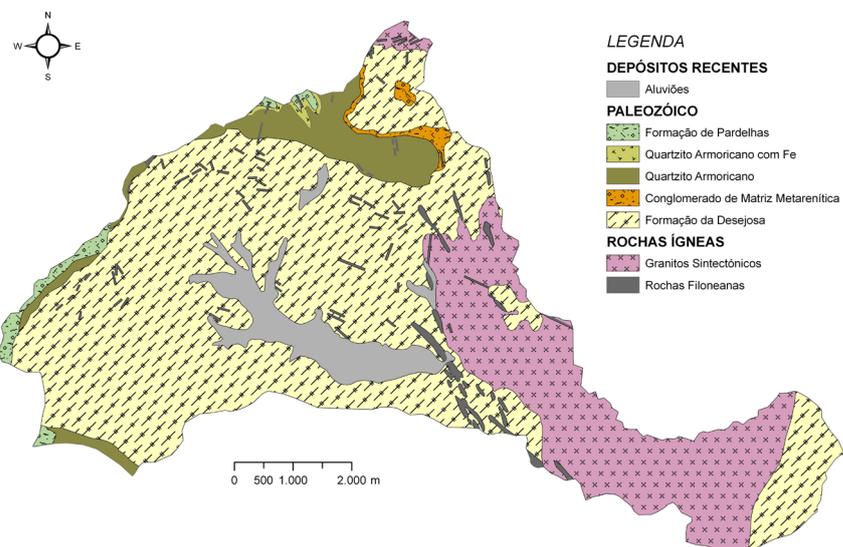


Figura 3 - Enquadramento geológico da bacia hidrográfica do rio Sordo. Adaptado de Pacheco *et al.* (2004).



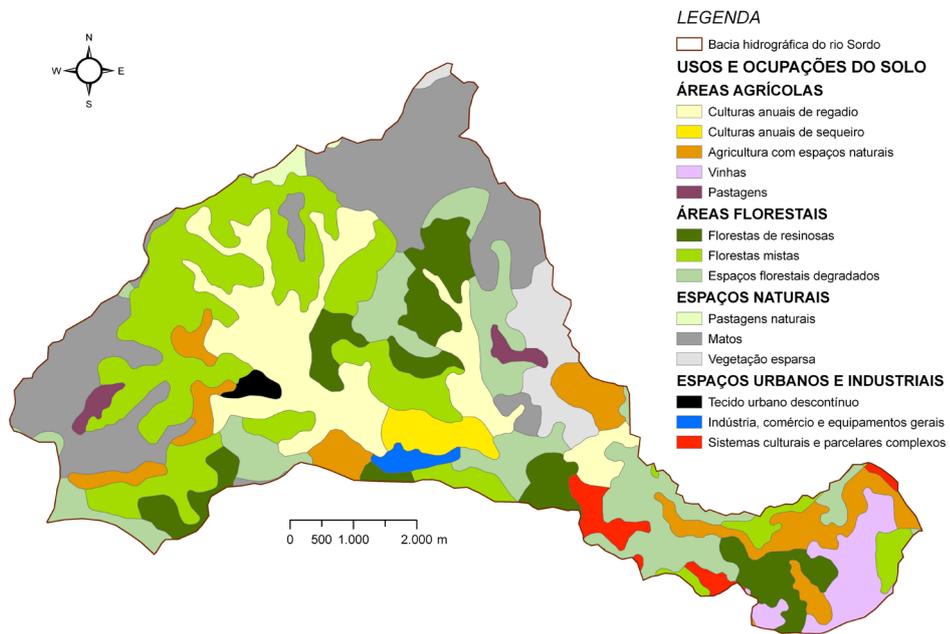


Figura 6 - Mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Sordo.

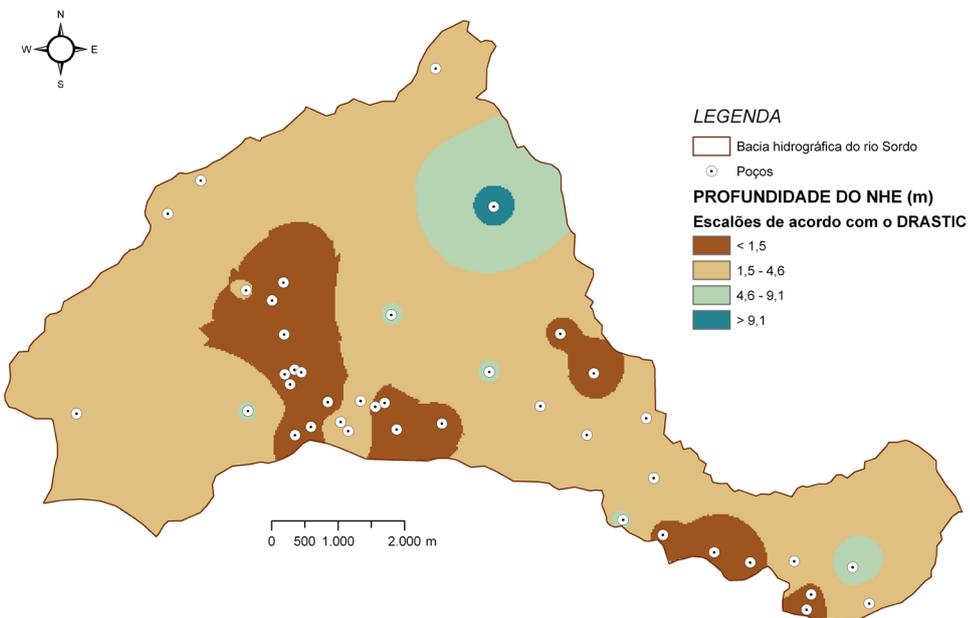


Figura 7 - Profundidade do nível hidrostático representativa do período Maio - Julho de 2002.

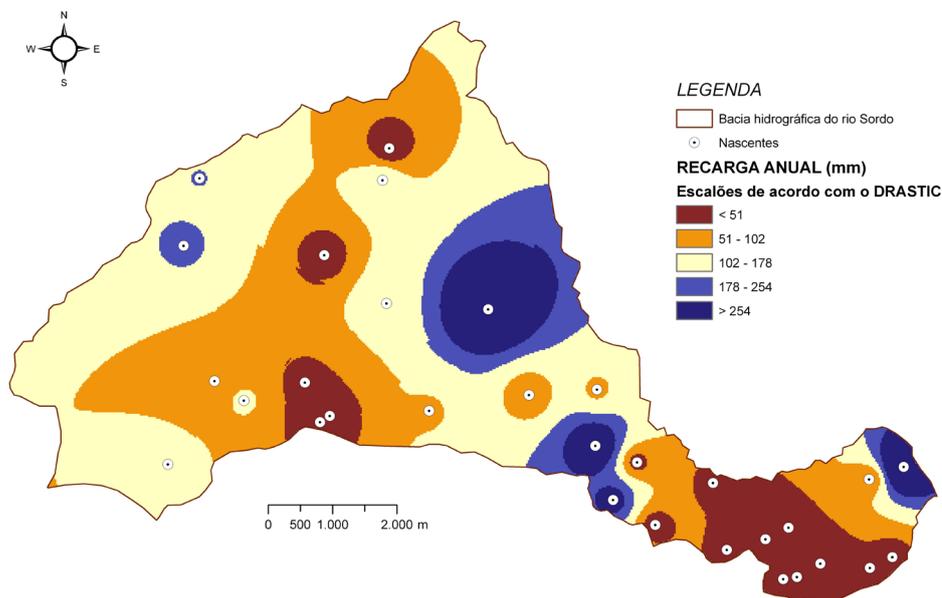


Figura 8 - Recarga anual representativa do ano hidrológico 2002/2003.

### 3. METODOLOGIA

Zhou *et al.* [1999] desenvolveram um modelo de avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos à poluição, assente na lógica DRASTIC, que designaram *padrão de reconhecimento multi-objectivos*. O mesmo método foi também utilizado por Mao *et al.* [2006]. O referido método tem por base a noção de que pode definir-se um local ideal como sendo o mais susceptível de ser contaminado e um outro como sendo o menos susceptível de ser contaminado, e que todos os locais se podem referir relativamente a estes dois extremos.

Se o número de locais relativamente aos quais se pretende avaliar a vulnerabilidade for  $n$  e o número de parâmetros que reflectem essa mesma vulnerabilidade for  $m$ , então  $x_{ij}$  representa o valor do parâmetro  $j$  no local  $i$ . No seu conjunto, os valores  $x_{ij}$  constituem a matriz de dados  $\mathbf{X}$ . Porém, os valores que  $\mathbf{X}$  assume diferem consoante a natureza do parâmetro: quando este é definido quantitativamente (D, R, T, C),  $\mathbf{X}$  assume os valores da variável de base (profundidade do NHE, recarga, declive, condutividade hidráulica); caso contrário (A, S, I)  $\mathbf{X}$  assume os valores dos índices atribuídos a cada parâmetro. Além disso, os parâmetros do DRASTIC são agrupados do seguinte modo: no grupo

A a vulnerabilidade aumenta com o incremento nos valores de  $\mathbf{X}$  enquanto que no grupo B ocorre exactamente o contrário. Ao grupo A pertencem os parâmetros R, A, S, C e I, ao grupo B os parâmetros D e T.

Os valores  $x_{ij}$  são de seguida normalizados relativamente aos máximos e mínimos definidos para cada uma das escalas do DRASTIC, obtendo-se os valores  $r_{ij}$ :

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_{minj}}{x_{maxj} - x_{minj}} & x_{ij} \in \text{grupo A} \\ 1 - \frac{x_{ij} - x_{minj}}{x_{maxj} - x_{minj}} & x_{ij} \in \text{grupo B} \end{cases} \quad [1]$$

Se  $r_{ij} = 1$  então o local  $i$  é o mais susceptível de ser contaminado no parâmetro  $j$  enquanto que se  $r_{ij} = 0$  o local  $i$  é o menos susceptível de ser contaminado nesse mesmo parâmetro. Admita-se que existe um local relativamente ao qual  $r_{ij} = 1$  e um outro relativamente ao qual  $r_{ij} = 0$ , para qualquer  $j$ , e designem-se esses locais por  $\mathbf{g}$  e  $\mathbf{b}$ , respectivamente. Nestas circunstâncias, o estudo da proximidade dos locais em estudo relativamente a estes dois extremos converte-se num problema de lógica *fuzzy*.

As distâncias Euclidianas entre um local  $i$  e os locais  $\mathbf{g}$  e  $\mathbf{b}$  são dadas por:

$$d_{ig} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j (g_i - r_{ij})]^2} \quad (2a)$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j (r_{ij} - b_i)]^2} \quad (2b)$$

em que  $d_{ig}$  e  $d_{ib}$  são as referidas distâncias e  $w_j$  é o peso atribuído ao parâmetro  $j$  de acordo com as regras do DRASTIC. A projecção gráfica da relação entre o local  $i$  e os locais  $g$  e  $b$  apresenta-se na figura 9.

Se a posição óptima do local  $i$  relativamente ao local ideal  $g$  for designada por  $u_i$ , então a posição óptima relativamente ao local  $b$  é  $1-u_i$ . Na lógica *fuzzy*,  $u_i$  e  $1-u_i$  podem ser encarados como pesos, de modo que  $D_{ig} = u_i d_{ig}$  e  $D_{ib} = (1-u_i) d_{ib}$  são as distâncias ponderadas de  $i$  a  $g$  e a  $b$ . A determinação de  $u_i$  passa pela minimização da função objectiva  $D_{ig}^2 + D_{ib}^2$  que graficamente corresponde à projecção de  $i$  sobre a recta que une os pontos  $g$  e  $b$  (figura 9) e analiticamente à resolução da equação:

$$\frac{d(D_{ig}^2 + D_{ib}^2)}{du_i} = 0 \quad (3a)$$

do que resulta:

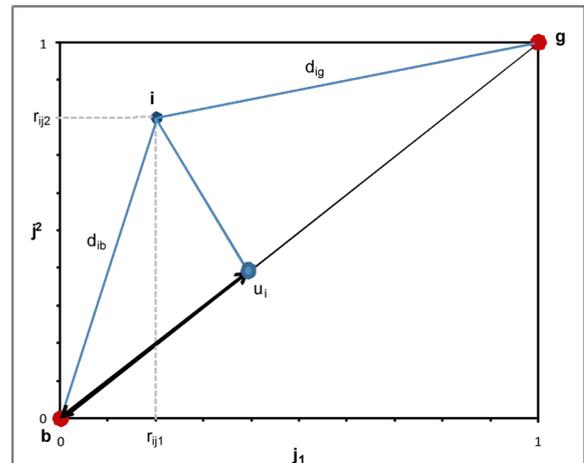
$$u_i = \left[ 1 + \frac{\sum_{j=1}^m (w_j (r_{ij} - 1))^2}{\sum_{j=1}^m (w_j r_{ij})^2} \right]^{-1} \quad (3b)$$

Os valores  $u_i$  representam o grau de vulnerabilidade do meio relativamente à contaminação das águas subterrâneas, de acordo com o modelo *fuzzy* do padrão de reconhecimento multi-objectivos. Esse grau varia desde os extremos  $g$  (o local mais fácil de ser contaminado) e  $b$  (local mais difícil de ser contaminado), de acordo com os escalões apresentados na tabela 1.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Modelo DRASTIC Original

A avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, na bacia hidrográfica do rio Sordo, pelo método DRASTIC na sua versão original, foi realizada pela primeira vez por Pacheco *et al.* (2004). No presente estudo repete-se a análise, embora com algumas diferenças relativamente a dados utilizados e às abordagens efectuadas a alguns dos parâmetros. A informação de base para o presente trabalho é essencialmente a que consta das figuras 2 a 8, que foi processada de modo ser convertida em mapas de



**Figura 9** - Ilustração da determinação da posição óptima do local  $i$  relativamente aos locais  $g$  e  $b$ , designada por  $u_i$ , considerando somente duas variáveis do DRASTIC.

**Tabela 1** – Avaliação da vulnerabilidade de acordo com o modelo *fuzzy* do padrão de reconhecimento multi-objectivos (Zhou *et al.*, 1999).

Grau de vulnerabilidade de $u_i$	Decisão
< 0,2	Muito difícil de ser contaminado
0,2 – 0,4	Difícil de ser contaminado
0,4 – 0,6	Pode ser contaminado
0,6 – 0,8	Fácil de ser contaminado
0,8 – 1,0	Muito fácil de ser contaminado

parâmetros (D, R, etc.), com base nos critérios do DRASTIC, por vezes adaptados, e integrada na forma de um mapa DRASTIC final.

Como pode depreender-se da análise das figuras 2 a 8, os dados utilizados para a produção dos mapas dos diversos parâmetros foram muito diversificados, de acordo com a sua origem. Por exemplo, relativamente ao parâmetro D utilizaram-se como dados de base medições da profundidade do nível hidrostático em poços, ou seja dados pontuais (figura 7). Situação

semelhante ocorreu na avaliação do parâmetro R em que se utilizaram como dados de base caudais medidos em nascentes a partir dos quais se estimaram recargas anuais utilizando o método do hidrograma descrito em Pacheco e Alencão (2006) (figura 8). Já relativamente aos parâmetros A e S recorreu-se a mapas geológicos, de fracturação e solos, ou seja a dados representados por polígonos (figuras 3 e 5) e linhas (figura 4). A avaliação do parâmetro T recorreu a um modelo digital do terreno, em formato *raster* (imagem de pixéis, figura 2) e, finalmente, os parâmetros I e C foram avaliados pelo índice típico ou com base em estimativas da condutividade hidráulica obtidas por Pacheco e Alencão (2006), respectivamente: para o I adoptou-se o valor 4 referente a “rocha ígnea e metamórfica alterada” e para o C o valor 1 já que as condutividades hidráulicas estimadas por Pacheco e Alencão (2006) rondaram em média 0,29 m/dia, valor bastante inferior ao limite máximo do escalão 1 para este parâmetro do DRASTIC (4,1 m/dia). A conversão dos mapas das figuras 2 a 8 em mapas de parâmetros DRASTIC, no que se refere aos parâmetros D, R e T, seguiu os pressupostos estabelecidos no modelo original, ou seja considerou os escalões descritos em Aller *et al.* (1987) para cada parâmetro. Relativamente à aplicação feita por Pacheco *et al.* (2004), destaca-se a alteração na determinação do índice R, que então foi avaliado com base na recarga média estimada para o Rio Corgo (153 mm/ano, de que resultou um  $R = 6$ ), do qual o Rio Sordo é afluente, e que no presente recorreu aos caudais medidos em nascentes. Relativamente aos parâmetros A e S, utilizaram-se as adaptações descritas em Pacheco *et al.* (2004), com ligeiras modificações no caso do parâmetro A: o mapa relativo a este parâmetro combinou o factor litológico com o factor estrutural. Por outras palavras, o índice relativo a este parâmetro foi determinado com base no mapa geológico (figura 3) e no mapa de densidade de lineamentos (figura 4). A definição de categorias de vulnerabilidade a partir do mapa geológico foi feita considerando que os depósitos aluvionares se integram numa categoria 1 e as rochas ígneas e metassedimentares numa categoria 2. Aos locais da bacia do Sordo abrangidos por terrenos da categoria 1 foi atribuído o índice 6 correspondente no modelo original ao índice típico da “Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila”. Relativamente aos terrenos da categoria 2 foram atribuídos os índices 2 a 6, consistentes no modelo original com a categoria “Rochas ígneas e metamórficas”, tomando em consideração os escalões de densidade de lineamentos definidos na figura 4. Esta distribuição difere ligeiramente da adoptada por Pacheco *et al.* (2004) que atribuíram índices 4 ou 5 consoante a densidade de lineamentos era inferior ou superior a 16 km de line-

mentos/km<sup>2</sup>. No que respeita ao parâmetro S não se registou qualquer alteração face ao estabelecido por Pacheco *et al.* (2004), tendo-se novamente recorrido à caracterização textural dos diferentes tipos de solo na atribuição dos respectivos índices (tabela 2).

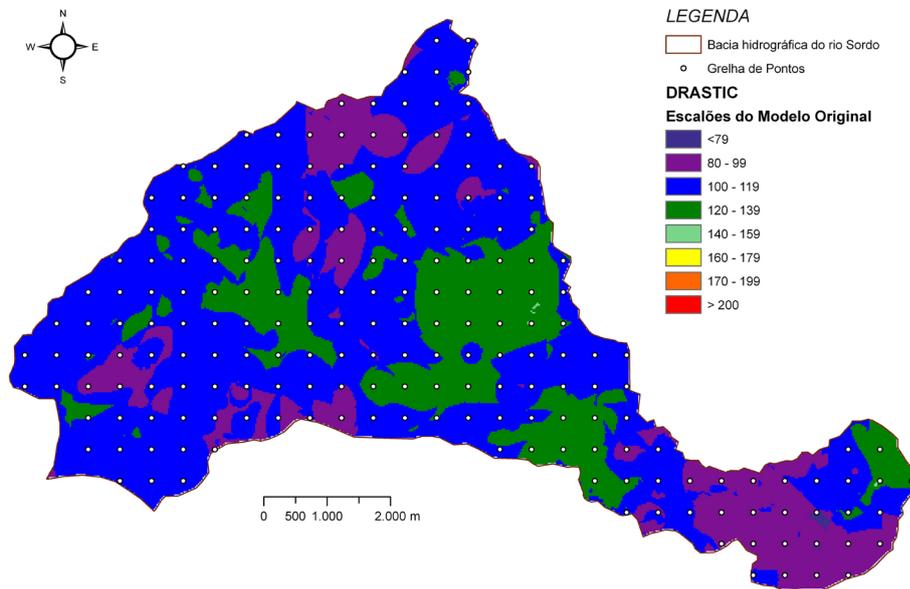
O mapa DRASTIC resultante da aplicação do modelo original aos dados disponíveis apresenta-se na figura 10.

**Tabela 2** - Índices S relativos aos diferentes tipos de solos. Descrição das unidades de acordo com o apresentado na figura 5. Adaptado de Pacheco et al. (2004).

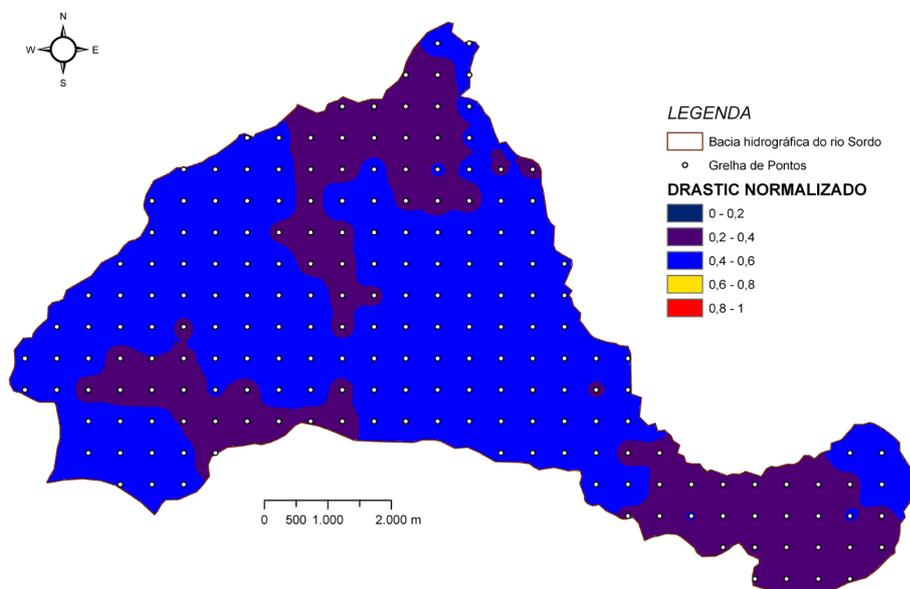
Unidade	Areia (%)	Argila (%)	Limo (%)	S
Lux	62	27	11	5
Lug	71	18	11	5
Idox	63	25	12	5
lsg	86	8	6	8
Jua	63	19	17	4
Jdoa	66	19	14	7
Tatug	75	15	10	8
Tasdx	66	27	8	7

#### 4.2. Modelo Fuzzy-DRASTIC

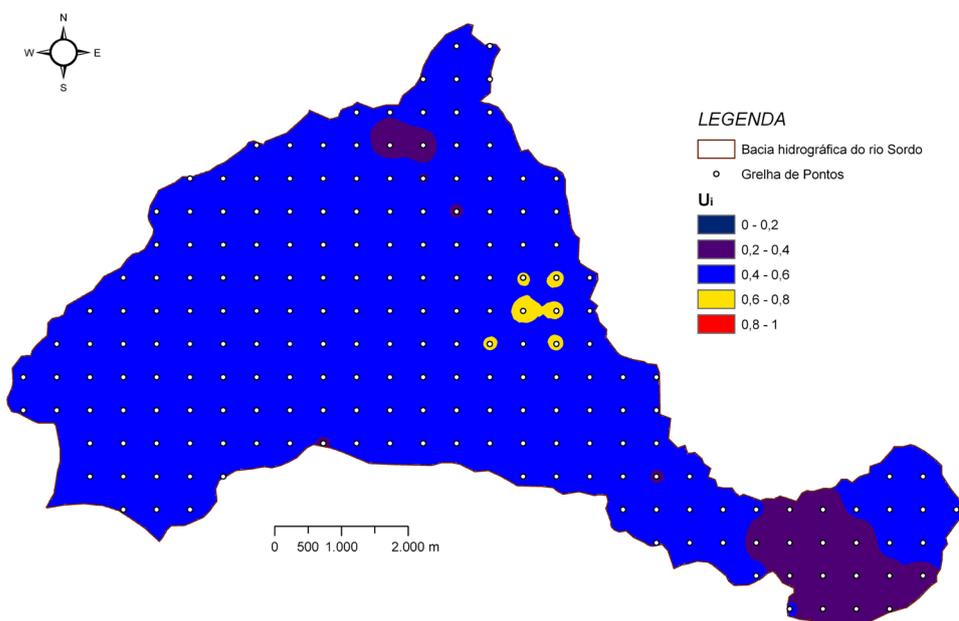
A avaliação da vulnerabilidade DRASTIC tendo por base o modelo *fuzzy* do padrão de reconhecimento multi-objectivos (*fuzzy*-DRASTIC) passou numa primeira fase pela definição de uma grelha de amostragem que permitisse a avaliação das variáveis de natureza quantitativa (profundidade do NHE, recarga, topografia) e dos parâmetros de natureza categórica (A, S) em pontos distribuídos uniformemente por toda a bacia. Tomando em consideração a dimensão da bacia em estudo (cerca de 50 km<sup>2</sup>), optou-se por uma grelha de 208 pontos regularmente espaçados 500 x 500 m (figura 10). A grelha de pontos foi sobreposta ao mapa de cada variável ou parâmetro tendo o valor dos mesmos sido determinado em cada ponto utilizando uma ferramenta de amostragem do software ArcMap (ESRI, 2006), designadamente a ferramenta *ArcToolBox>SpatialAnalyst Tools>Extraction>Sample*. O resultado obtido corresponde à matriz X que serviu de base à aplicação do modelo *fuzzy*-DRASTIC. Usando a matriz X calcularam-se os valores de  $u_i$ . De modo a compararem-se os resultados do modelo *fuzzy*-DRASTIC com os resultados do modelo original, normalizaram-se os últimos tomando em consideração o valor mínimo (26) e o valor máximo (226) do DRASTIC, isto é: DRASTIC normalizado = (DRASTIC original - 26)/(226 - 26). Os resultados da normalização apresentam-se na figura 11, os do modelo *fuzzy*-DRASTIC na figura 12.



**Figura 10** - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC (modelo original) da bacia hidrográfica do rio Sordo.



**Figura 11** - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC (modelo original normalizado) da bacia hidrográfica do rio Sordo.



**Figura 12** - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC (modelo *fuzzy*-DRASTIC) da bacia hidrográfica do rio Sordo.

Comparando os mapas das figuras 10, 11 e 12, pode concluir-se que: 1) as vulnerabilidades normalizadas enquadram-se com os escalões “difícil de ser contaminado” e “pode ser contaminado” (tabela 1), basicamente reproduzindo os escalões “80-99” e “100-119” + “120-139” do modelo DRASTIC original; 2) as vulnerabilidades calculadas pelo modelo *fuzzy*-DRASTIC são sistematicamente superiores às estimadas pelo DRASTIC normalizado, em média 6,3%. Nesse contexto, grande parte da área passa a ser classificada como área que pode ser contaminada, persistindo duas pequenas manchas classificadas como zonas difíceis de ser contaminadas, mas surgindo na zona de contacto entre os xistos e os granitos pequenas manchas de zonas classificadas como fáceis de ser contaminadas.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados do modelo DRASTIC, na versão original, atribuem uma vulnerabilidade intrínseca reduzida a moderada à bacia hidrográfica do rio Sordo. O modelo *fuzzy*-DRASTIC incrementa os valores da vulnerabilidade em cerca de 6,3%, valor aparentemente reduzido mas com expressão cartográfica relevante.

## BIBLIOGRAFIA

- AFSHAR, A.; MARIÑO, M. A.; ASCE, H. M.; EBTEHAJ, M.; MOOSAVI, J. (2007) – Rule-based *fuzzy* system for assessing groundwater vulnerability. In: Journal of Environmental Engineering, 133(5), 532-540.
- Agroconsultores & Coba (1991). Carta de solos, carta do uso actual da terra e carta de aptidão da terra do nordeste de Portugal. Relatório Técnico, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 311p.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R.; HACKETT, G. (1987) – DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency (EPA Number: 600287035), USA, 643p.
- CHEN, S. & FU, G. (2003) – A DRASTIC-based *fuzzy* pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation. In: Hydrological Sciences Journal, 48, 211-220.
- DIXON, B. (2005) – Groundwater vulnerability mapping: A GIS and *fuzzy* rule based integrated tool. Applied Geography, 25, 327-347.
- ESRI (2006). ArcMap (version 9.2) manual. New York St., Redlands, USA, 131p.

- MAO, Y.; ZHANG, X.; WANG, L. (2006) – *Fuzzy* pattern recognition method for assessing groundwater vulnerability to pollution in the Zhangji area. *Journal of Zhejiang University Science A. China*, 11, 1917-1922.
- NOBRE, R.C.M.; CONSENZA, C.A.N.; FILHO, O.C.R.; MANSUR, W.J. (2003) – Modelo de hierarquia *fuzzy* para avaliação da sensibilidade natural de um aquífero costeiro. *Revista Recursos Hídricos*, 28(3), 55-64.
- PACHECO, F.A.L. & ALENCOÃO, A.M.P. (2006). Role of fractures in weathering of solid rocks: narrowing the gap between experimental and natural weathering rates. *Journal of Hydrology*, 316, 248-265.
- PACHECO, F. A. L.; SOUSA OLIVEIRA, A.; ALENCOÃO, A. M. P.; RIBEIRO, I. C.; FARIA, M. J. (2004) – Avaliação da vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas pelo método DRASTIC na bacia hidrográfica do rio Sordo. In: 7º Congresso da Água: Água – Qualidade de Toda a Vida, 8-12 de Março, Lisboa. Resumos de Comunicações, p. 31 (comunicação alargada em CD, 12p.).
- ZADEH, L.A. (1965). *Fuzzy* sets. *Inf. Control*, 8, 338-353.
- ZHOU, H.; Wang, G.; Yang, Q. (1999) – A multi-objective *fuzzy* pattern recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 44, 611-618.