

AValiação Multicritério e SIG Vectorial: Uma Alternativa para Planeamento de Transportes

Daniel Souto Rodrigues¹
Antônio Nélon Rodrigues da Silva²
José Fernando Gomes Mendes¹

¹ Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil

² Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes

RESUMO

Este trabalho tem por objectivo apresentar um modelo concebido para permitir a integração de métodos de avaliação multicritério em ambiente SIG vectorial. A avaliação da acessibilidade, aqui modelada, para além de ser um problema típico, complexo e quase permanente no planeamento de transportes, adequa-se bem ao modelo concebido pelo fato de conter alguns dos principais elementos que caracterizam os problemas de transportes (caso da análise de fluxos em rede). O modelo proposto, além de basear-se na medição de afastamento incluindo o efeito da distância, permite também o desenvolvimento de cenários de avaliação baseados na atitude de risco e compensação entre critérios, obtendo-se desta forma um espectro estratégico de avaliação. Por fim, um exemplo de aplicação que consiste na avaliação interna de um campus universitário em Portugal, aponta o potencial do modelo proposto para a avaliação da acessibilidade, abrindo perspectivas para sua aplicação em outros problemas de transportes.

ABSTRACT

The aim of this work is to present a model built to allow the integration of multicriteria evaluation methods into a vector GIS environment. The accessibility assessment, which was explored here, in addition to be a typical, complex and almost permanent problem of transport planning, fits well to the conceived model because it contains some of the main elements that characterize transport models (such as flow network analysis). The proposed modeling approach, which is more than merely a measure of separation incorporating the effect of distance, allows the development of evaluation scenarios based on different trade-off and risk attitudes, i.e., a decision strategy spectrum. Finally, an application example, which consists in the internal evaluation of a university campus in Portugal, reveals the potential of the proposed model for evaluating accessibility, therefore opening perspectives to its application to other transport problems.

1. INTRODUÇÃO

Para melhor compreender os fundamentos da técnica de avaliação multicritério, foco principal deste estudo, é preciso recorrer a diversos conceitos. No âmbito da TEORIA DA DECISÃO, por exemplo, define-se DECISÃO como a escolha entre ALTERNATIVAS. As ALTERNATIVAS podem representar diferentes localizações, planos, classificações, hipóteses sobre um fenómeno, etc. Um CRITÉRIO representa uma condição que, contribuindo para a tomada de decisão, se pode quantificar ou avaliar. Existem dois tipos de critérios: EXCLUSÕES ou FACTORES. Uma EXCLUSÃO é um critério que limita as alternativas em consideração na análise. Distinguem-se ainda dois tipos de exclusões: as que definem as alternativas não elegíveis a excluir do espaço inicial de soluções possíveis (limitações ao espaço de análise) e as que visam garantir que a solução final englobe algumas características preestabelecidas. Por seu turno, um FACTOR é um critério que acentua ou diminui a aptidão de uma determinada alternativa para o objectivo em causa. Geralmente, a medida da aptidão é efectuada adoptando uma dada escala e de forma a abranger todo o espaço de solução inicialmente definido.

O procedimento que define como combinar os critérios para obter uma determinada avaliação, inclusive como comparar as avaliações com o intuito de tomar decisões, designa-se por REGRA DE DECISÃO. Na sua forma mais comum, uma regra de decisão fornece procedimentos para normalizar e combinar diferentes critérios que resultam na obtenção de um índice composto, bem como de uma regra que rege a comparação entre alternativas com base nesse índice. Enquadradas no contexto de um objectivo específico, as regras de decisão estruturar-

se-ão de forma a respeitar, ao longo de todo o processo, as motivações do ou dos interessados na decisão. Com a finalidade de atingir um determinado objectivo, é frequentemente necessário avaliar e combinar diversos critérios. Finalmente, os procedimentos que permitem efectuar essas operações designam-se por AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO (Voogd, 1983; Carver, 1991).

É possível observar na literatura especializada que os SIG parecem ser a plataforma ideal para a aplicação da técnica de avaliação multicritério envolvendo problemas de natureza espacial, sendo por este motivo frequentemente associadas (Ewart, 1994; Bender e Simonovic, 1995; Jankowski e Ewart, 1996; Simonovic e Bender, 1996; Eastman, 1997; Jankowski *et al.*, 1997; Malczewski *et al.*, 1997; Jankowski *et al.*, 2001; Mendes, 2001). Malczewski (1999) enfatiza inclusive no prefácio de seu livro que os SIGs e a avaliação multicritério podem beneficiar mutuamente de uma combinação entre as suas áreas de investigação. Os SIGs, ao oferecer capacidades únicas na automatização, gestão e análise de dados espaciais para a tomada de decisão, têm um papel importante a desempenhar na análise de problemas de decisão multicritério. Pelo seu lado, a avaliação multicritério oferece uma vasta colecção de técnicas e procedimentos que permitem revelar as preferências de decisores e incorporá-las em tomadas de decisão baseadas num SIG.

Como muitos problemas de planeamento de transportes são multicritério e, portanto, a realidade sobre a qual incidem implica a tomada em conta de uma multiplicidade de atributos, o uso da técnica adequa-se também à análise de diversos problemas nesta área, como demonstram, por exemplo, os trabalhos de Malczewski *et al.* (1997) e Mendes (2001). O que se observa, na realidade, é que a técnica se presta bem à análise de problemas de natureza espacial em geral, condição em que muitos dos problemas de planeamento de transportes se enquadram por definição. Uma particularidade, que de certa forma diferencia os estudos que combinam a técnica de avaliação multicritério com SIG, para análises espaciais em geral, daquelas direccionadas especificamente a problemas de planeamento de transportes, é o facto de que os primeiros baseiam-se frequentemente em SIGs cujo modelo de representação de dados espaciais é do tipo *raster*, ao contrário do que se verifica na maioria dos estudos específicos de transportes.

A principal justificativa do uso de SIG vectorial em transportes é o facto dos modelos de redes, nos quais praticamente quase toda a análise de transportes se baseia, terem-se adaptado melhor a este tipo de modelo de representação de dados espaciais, sendo em geral mais eficientes nestas condições do que em estruturas *raster*. No que diz respeito à indicação de se avaliar especificamente a acessibilidade em ambiente SIG, por exemplo, Arentze *et al.* (1994a) trataram de dissipar qualquer dúvida a este respeito, afirmando que existem diversas razões pelas quais estes sistemas disponibilizam um ambiente adequado a implementação de índices de acessibilidade ou, de forma mais geral, de medidas de performance espacial. Os SIGs integram técnicas de gestão de dados que permitem gerir e manusear a informação em que se baseiam os índices. Por outro lado, oferecem também funções de apresentação que oferecem a possibilidade de representar os resultados obtidos em mapas da área em estudo. Por fim, os SIGs dispõem ainda de ferramentas de análise que permitem efectuar diversas funções que integram o processo de cálculo de índices de acessibilidade, tais como a selecção de locais relevantes, a agregação de zonas ou a determinação de distância entre objectos espaciais (não só distâncias Euclidianas, mas também através de redes).

Assim, à luz do que foi acima discutido, é objectivo deste trabalho apresentar um modelo de avaliação de acessibilidade que integra métodos de avaliação multicritério em ambiente SIG vectorial. É importante enfatizar que o modelo aqui proposto foi concebido em princípio para um problema típico, complexo e quase permanente no planeamento de transportes, que é a avaliação da acessibilidade, pelo fato deste problema conter alguns dos principais elementos que caracterizam os problemas de transportes (como é o caso da análise de fluxos em rede, por exemplo). Quer porque a avaliação multicritério da acessibilidade está ainda pouco divulgada, quer porque não existe ainda uma metodologia consolidada no que respeita à sua implementação em ambiente SIG, considera-se oportuna e relevante a elaboração deste trabalho. Desta forma, é relevante a adopção de um ambiente SIG vectorial pelo facto de, ao procurar-se medir a acessibilidade ao longo de uma rede, ser considerado este tipo de análise um domínio deste ambiente (Malczweski, 1999).

De seguida, introduzem-se os conceitos teóricos nos quais o modelo se baseou, bem como uma breve revisão bibliográfica que procura mostrar uma certa evolução ao longo da história, particularmente do conceito de acessibilidade. Na secção seguinte, é efectuada uma apresentação e descrição do modelo. Na secção 4, de forma a validar a utilidade do modelo, é sugerida uma possibilidade concreta de aplicação do modelo. Finalmente, o artigo encerra-se com a secção de conclusões, seguida da lista de referências bibliográficas utilizadas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de um modelo de avaliação multicritério visando aplicações em transportes, e mais especificamente na avaliação de acessibilidade, é importante situar estes tópicos em relação à literatura pertinente, como se verifica na sequência desta secção.

2.1. Acessibilidade

Focando apenas o conceito de acessibilidade no âmbito dos transportes – por ser esse o que se procura neste trabalho – descobre-se a existência de uma multiplicidade de definições e de uma diversidade de tipos de uso para a acessibilidade. Este facto só não é considerado uma surpresa porque, como demonstra o trabalho de Hoggart (1973) ao citar artigos sobre este tema escritos em 1826, 1903 e 1909, trata-se de um tema que é discutido e objecto de estudo há cerca de duzentos anos. Hoggart defende que a acessibilidade está associada à interpretação, implícita ou explícita, da facilidade de alcançar oportunidades espacialmente distribuídas. Interpreta-se assim que a acessibilidade depende não só da localização das oportunidades, mas igualmente na facilidade de vencer a separação espacial entre indivíduos e locais específicos (Silva, 1998; Mendes, 2001). No mesmo sentido, Ingram (1971) define acessibilidade de um local como a característica (ou vantagem) respeitante a superar alguma forma de resistência ao movimento. Por outro lado, Ingram (1971) também estabeleceu uma distinção entre acessibilidade relativa, referente ao grau de conexão entre dois pontos na mesma superfície (ou rede), e acessibilidade integral ou total, inerente ao grau de interconexão entre um ponto e todos os restantes da mesma superfície (ou rede).

Considerando que a forma como a acessibilidade é avaliada depende do objectivo a atingir, Morris *et al.* (1979) mostram uma classificação e uma formulação extensivas das medidas de acessibilidade relativa e integral. A última inclui: medidas de separação entre todos os pontos; medidas de separação incorporando a influência da distância; medidas de separação incorporando restrições de capacidade na rede; medidas compostas de separação e

oferta/procura. Encontram-se trabalhos recentes cujas medidas de acessibilidade apresentadas, de uma forma ou outra, se enquadram com a classificação de Morris *et al.* (ver Allen *et al.*, 1993; Arentze *et al.*, 1994a e 1994b; Tagore e Sikdar, 1995; Love e Lindquist, 1995; Mackiewicz e Ratajczak, 1996; Geertman e Van Eck, 1995; Shen, 1998; Bruinsma e Rietveld, 1998; Talen e Anselin, 1998; Schoon *et al.*, 1999). Trabalhos ainda mais recentes sobre o tema (como, por exemplo, Van der Waerden *et al.*, 1999; Turró *et al.*, 2000; Goto *et al.*, 2001 e Silva *et al.*, 2002), indicam que o tema ainda continua motivando o interesse para o desenvolvimento de novas pesquisas. O que se observa claramente em vários dos trabalhos acerca do tema é que, enquadrada no âmbito da análise espacial, a acessibilidade herda com naturalidade um carácter que leva a que a sua mensuração ou avaliação envolva inúmeros atributos, razão pela qual não só se justifica, mas se recomenda, o desenvolvimento de um modelo fundamentado em métodos de avaliação multicritério para a obtenção dos seus índices.

2.2. Avaliação multicritério

A tomada de decisão de âmbito espacial e multicritério requer uma articulação entre os objectivos do ou dos decisores e a identificação dos atributos necessários na determinação do grau em que esses objectivos serão atingidos. Um atributo é utilizado na medida da performance em relação a um objectivo. O objectivo e os respectivos atributos formam uma estrutura hierárquica de critérios de avaliação para um determinado problema de decisão. Neste sentido, a atribuição de um peso a cada critério permitirá quantificar a importância relativa de cada um, em relação ao seu contributo na obtenção de um índice global. De um conjunto de procedimentos para a definição de pesos estabelecidos e utilizados por diversos autores, alguns dos mais usuais são (Malczewski, 1999, Mendes, 2001): escala de n pontos (originalmente apenas de sete pontos, como introduzido por Osgood *et al.*, 1957); distribuição de pontos e sua variante, estimativa de rácios (ou razões, no português empregado no Brasil) (Easton, 1973); *Analytic Hierarchy Process* (Saaty, 1977, 1980, 1987); e *rank sum* e *rank reciprocal* (Stillwell *et al.*, 1981), baseados na ordenação de critérios.

Quer os critérios individualmente, quer os conjuntos de critérios deverão possuir propriedades de forma a representar adequadamente a vertente multicritério de um problema de decisão. Uma vez estabelecida a estrutura hierárquica dos objectivos e dos atributos, deverá existir uma preocupação relativamente a existência de uma diversidade de escalas em que os diversos critérios são medidos. Dado que as análises multicritério visam a comparação entre critérios, é necessário que as unidades destes possam ser convertidas em unidades comparáveis, isto é, devem ser normalizadas. Segundo Eastman (1997) e Eastman *et al.* (1998), o processo de normalização é na sua essência idêntico ao processo de *fuzzification*, introduzido pela lógica *fuzzy* (expressão original apresentada por Zadeh, 1965, para a qual não se adoptou qualquer tradução neste texto). O objectivo consiste em transformar qualquer escala noutra comparável e medida num intervalo normalizado (por exemplo [0;1]). Uma vez normalizados para um intervalo fixado, os *scores* dos critérios podem ser agregados de acordo com a regra de decisão (Ramos, 2000). Para que tal possa suceder, existem diversas classes de operadores para a combinação de critérios (para uma descrição extensiva, ver Malczewski, 1999). Dois procedimentos considerados mais relevantes no âmbito dos processos de decisão de natureza espacial são a Combinação Linear Pesada (WLC, de *Weighted Linear Combination*, conforme Voogd, 1983) e a Média Pesada Ordenada (OWA, de *Ordered Weighted Average*, conforme Yager, 1988). A estrutura conceptual do modelo, que é apresentada na sequência, foi toda elaborada tendo por base o objecto de estudo definido a

priori, que neste caso foi a acessibilidade, por ser este, conforme já mencionado, um elemento cuja avaliação envolve inúmeros atributos.

3. MODELO

O modelo desenvolvido neste trabalho, alicerçado no modelo apresentado e aplicado à avaliação da acessibilidade para a localização industrial por Mendes (2001), baseia-se em princípio na medição de afastamento incluindo o efeito da distância. Enumeram-se de seguida os principais pontos teóricos para a avaliação da acessibilidade que se procuraram englobar no modelo:

- i) A acessibilidade avalia-se em relação a um determinado objectivo; a título de exemplo, o objectivo pode ser a localização industrial, ou a identificação dos níveis de acessibilidade no interior dum *campus* universitário;
- ii) O índice de acessibilidade a calcular resulta da combinação das distâncias a um conjunto de destinos-chave, que podem ser pontos (por exemplo, paragens de transporte público), linhas (por exemplo, estradas) ou áreas (por exemplo, centros de serviços);
- iii) Os destinos-chave estão relacionados com o objectivo e podem possuir importâncias diferentes (pesos);
- iv) Os meios que permitem alcançar os destinos-chave podem apresentar diferentes níveis de resistência ao movimento (fricção). A título de exemplo, e do ponto de vista pedonal (relativo ao modo a pé), a fricção advirá das “dificuldades” encontradas no percurso (por exemplo, escadas ou rampas);
- v) As distâncias-custo aos destinos-chave resultam da combinação das distâncias reais com a fricção da superfície;
- vi) As distâncias-custo aos destinos-chave podem ser normalizadas através de funções *fuzzy* que, após a aplicação dos pesos, representam a sua contribuição no índice de acessibilidade;

Sendo i uma localização, a sua acessibilidade A_i é dada pela equação (1) (Mendes, 2001).

$$A_i = \sum_j f(c_{ij}) \cdot w_j \quad (1)$$

Onde $f(c_{ij})$: função *fuzzy* aplicada à distância-custo entre o local i e o destino-chave j ;

w_j : peso do destino-chave j .

A definição dos pontos i , para os quais é medida a acessibilidade, depende da forma como o espaço é modelado. No caso de uma rede, são considerados todos os nós existentes na sua definição, enquanto que num espaço contínuo (superfície), cada ponto numa grelha é avaliado. Neste caso, quando é empregue um modelo raster, os pontos considerados não são mais do que as células da imagem raster e dependem da resolução adoptada.

A equação (1) é essencialmente uma Combinação Linear Pesada (WLC) que permite aos critérios compensar entre eles as suas qualidades (*trade-off*). Acontece assim que uma qualidade muito pobre pode ser compensada pela existência de um número de fortes qualidades. Uma outra abordagem, como a Média Ordenada Pesada (OWA), oferece algum controlo sobre a compensação de critérios e inclui o efeito de uma atitude de risco no processo de avaliação, podendo sempre o analista escolher em que zona do espaço estratégico de solução se pretende situar.

Uma componente muito importante do modelo de avaliação multicritério diz respeito às prioridades/importâncias associadas aos diversos critérios intervenientes (neste caso distância aos destinos-chave), isto é, os valores dos pesos w_j da equação (1). O objectivo de envolver pesos na avaliação é o de quantificar a importância relativa de cada um dos critérios no conjunto de destinos-chave considerado. Desta forma é possível reflectir a sua importância na contribuição que tem para o índice de acessibilidade global.

Outra componente importante é o processo de normalização a adoptar. Neste caso e por ser o mais adequado para variáveis contínuas (distâncias), optou-se pelo recurso ao procedimento de *fuzzification*, isto é, a aplicação de uma função *fuzzy*, devidamente escolhida e criteriosamente calibrada (ver Figura 1). O objectivo é, para todos os destinos-chave, transformar qualquer escala de avaliação numa comparável onde os valores se enquadrem num intervalo normalizado. Neste trabalho, os resultados expressam o grau de pertença a um intervalo de valores entre 0,0 e 1,0, delineando uma variação contínua desde a não pertença (nenhuma acessibilidade) até à completa pertença (acessibilidade total). Os pontos de controlo das curvas *fuzzy* constituem pontos críticos que, consoante os casos, deverão ser escolhidos tendo em conta o seu significado.

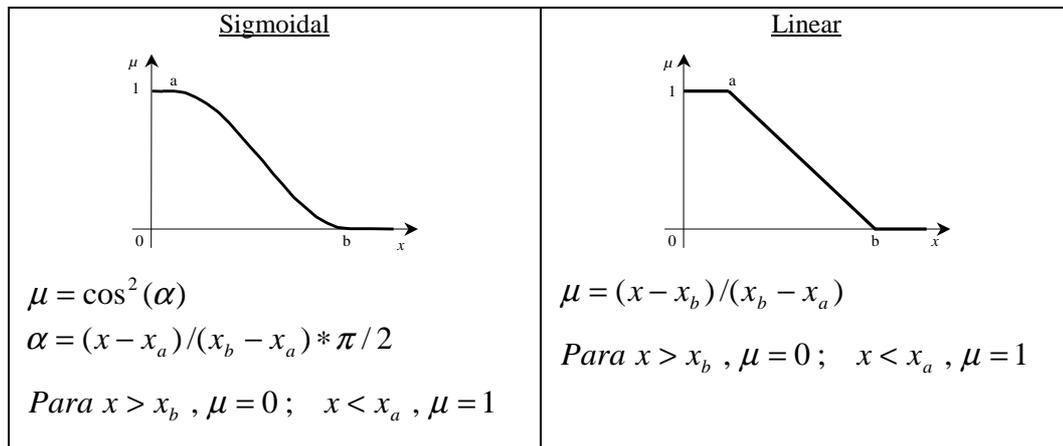


Figura 1: Funções *Fuzzy*

No sentido de introduzir cenários de avaliação no processo, propõe-se uma avaliação da acessibilidade em duas etapas. Numa primeira etapa e sendo os destinos-chave agrupados em função de uma determinada característica comum (por exemplo funcionalidade), passa-se a avaliar a acessibilidade de cada local em relação a cada grupo, e não em relação a todos os destinos-chave existentes na área em estudo, através da equação (2), de agregação pelo método WLC. Ao considerarem-se os grupos de destinos-chave, os respectivos pesos são agora definidos em relação ao grupo em que estão inseridos, isto é, o somatório dos pesos será sempre a unidade dentro de cada grupo.

$$A_i^g = \sum_j^{n_g} f(c_{ij}) \cdot w_j^g \quad (2)$$

Onde A_i^g : índice de acessibilidade do local i em relação ao grupo g ;

$f(c_{ij})$: função *fuzzy* aplicada à distância-custo entre o local i e o destino-chave j incluído no grupo g ;

w_j^g : peso do destino-chave j incluído no grupo g ;

n_g : número de destinos-chave do grupo g .

A segunda etapa destina-se ao cálculo do índice de acessibilidade global, através da combinação OWA dos valores da acessibilidade em relação aos grupos de destinos-chave A_i^g . Impõe-se, então, a consideração de dois conjuntos de pesos: um primeiro relativo à importância dos próprios grupos de destinos-chave (p_g); um segundo constituído pelos *order weights* (O), o qual permitirá aplicar o procedimento OWA e, considerando diferentes combinações de valores, definir cenários de avaliação. O índice de acessibilidade global do local i será dado então pela equação (3).

$$A_i = A^i \times O \quad (3)$$

Onde A^i : vector $[A_i^1 \cdot p_1 \ A_i^2 \cdot p_2 \ \dots \ A_i^{n_g} \cdot p_{n_g}]$ ordenado (em ordem crescente),

sendo que A_i^g : índice de acessibilidade do local i em relação ao grupo de destinos-chave g ;

n_g : número de grupos de destinos-chave;

p_g : peso do grupo g ;

O : vector dos *order weights*.

Para introduzir um risco mínimo no processo de avaliação da acessibilidade, isto é, próximo de AND (mínimo – ver Figura 2) no intervalo de variação da variável *ANDness*, dever-se-á atribuir *order weights* aos factores com os *scores* mais baixos. No caso mais extremo, a adopção do vector de *order weights* $[1 \ 0 \ \dots \ 0]$ resulta numa avaliação pessimista ou conservadora (vértice inferior esquerdo), caracterizada por risco mínimo e *trade-off* nulo. Ao invés, se o risco máximo for o que se pretende no processo de avaliação de acessibilidade, dever-se-á considerar o vector de *order weights* $[0 \ \dots \ 0 \ 1]$, ao qual corresponde um cenário de avaliação optimista (vértice inferior direito), caracterizado pela assunção de risco máximo e ausência de *trade-off*. Outro vector de *order weights* típico é aquele que possui valores todos iguais, que corresponde à agregação WLC (vértice superior). Esta seria uma avaliação neutra, relativamente ao risco, permitindo *trade-off* total.

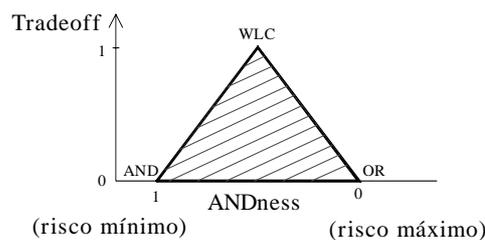


Figura 2: Espaço estratégico de decisão (OWA)

4. UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO

As próximas subsecções são dedicadas à apresentação de requisitos necessários à implementação do modelo acima descrito, de uma orientação para que essa implementação seja bem sucedida e de uma possível aplicação para o modelo desenvolvido.

4.1. Dados de base

Para aplicar o modelo é necessário que sejam conhecidos os seguintes dados: a rede, os destinos-chave (incluindo, quando aplicável, o critério de agrupamento), os pesos a aplicar, a

função ou funções a empregar na normalização dos critérios de avaliação (distância-custo) e respectivos pontos de controlo. Caso a rede não exista em suporte digital, deve-se providenciar à sua digitalização, de forma a tornar possível o processamento da sua representação pelo SIG adoptado. Definidos quais os destinos-chave da área em estudo e qual o critério de agrupamento dos mesmos, procede-se à elaboração de um inquérito à comunidade utilizadora da área em estudo com o intuito de determinar os restantes dados (pesos, funções *fuzzy* e pontos de controlo), incluindo desta forma o seu ponto de vista.

4.2. Implementação em SIG vectorial

De seguida, apresenta-se e descreve-se o fluxograma da Figura 3, que pretende ser uma orientação para uma implementação em SIG vectorial bem sucedida.

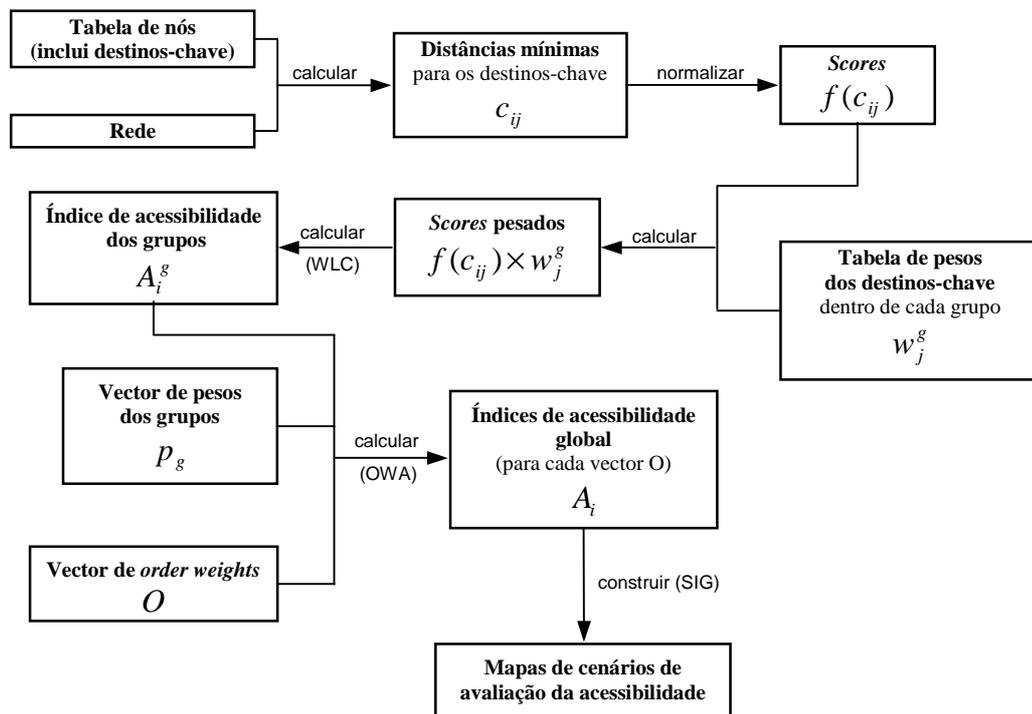


Figura 3: Implementação em SIG vectorial

Uma vez conhecidos os nós (incluindo os destinos-chaves) e a rede sobre a qual efectuar-se-ão os deslocamentos, o primeiro passo da Figura 3 consiste em calcular as distâncias mais curtas (c_{ij}) através da rede, de cada nó para todos os destinos-chave. Procede-se então à sua normalização recorrendo à ou às funções *fuzzy* adoptadas e devidamente calibradas (pontos de controlo), obtendo-se os *scores* $f(c_{ij})$. Uma tabela onde previamente foram armazenados os pesos de cada destino-chave e o recurso à equação (1) permitem calcular os *scores* ponderados de cada nó relativamente a cada destino-chave. De seguida, é calculado o índice de acessibilidade (A_i^g) relativamente a cada um dos grupos de destinos-chave definidos, correspondendo ao somatório dos respectivos *scores* pesados. Finalmente, agregam-se os índices de acessibilidade dos grupos segundo o método OWA (equação 3), resultando os índices de acessibilidade globais (A_i), os quais servem de base à construção dos mapas de cenários de avaliação da acessibilidade. Este passo pressupõe a construção de um vector ordenado (em ordem crescente) cujos valores advêm do produto entre os índices de acessibilidade e os pesos respectivos de cada grupo, para, de seguida,

calcular-se o produto entre esse vector e o vector de *order weights*.

4.3. Aplicação a um *campus* universitário.

De forma geral, os *campi* universitários em Portugal têm sido alvos de expansões com o intuito de melhorar, qualitativa e quantitativamente, a oferta de instalações e serviços para as comunidades utentes (ou de usuários, no português empregado no Brasil). Sabendo-se que o meio de locomoção dominante é o modo pedonal e que, como refere Aultman-Hall *et al.* (1997, p.12), um percurso de 400 metros a pé é frequentemente considerado como aceitável, as dimensões que tomaram os *campi* já justificam uma avaliação da acessibilidade interna. Esta avaliação poderá ajudar a descortinar zonas com défice de acessibilidade e procurar soluções para as mesmas (por exemplo, relocalizar serviços), ou também servir de apoio no planeamento de expansões futuras.

De forma a implementar o modelo, é imperativo dispor da rede de vias (neste caso particular, talvez fosse melhor chamá-la de rede pedonal) em formato digital, bem como escolher e identificar os pontos a avaliar e os destinos-chave. Para estes últimos podem ser usados serviços, recursos e actividades fundamentais no quotidiano da comunidade utente (por exemplo, biblioteca, cantina, complexos pedagógicos, pavilhão desportivo, paragem de transporte público, entradas do *campus*, etc.). Analisando a lista obtida, muito provavelmente tornar-se-á possível agrupar os destinos-chave segundo uma funcionalidade comum (serviços, acessos, leccionação, investigação, etc.). De forma a contemplar o ponto de vista da comunidade utente, poder-se-á realizar um inquérito com o intuito de determinar os pesos, escolher as funções *fuzzy* a adoptar na normalização e os respectivos pontos críticos. A preparação do inquérito pressupõe a escolha do modo de realização (abordagem directa, *email*, correio, etc.), do processo de avaliação dos pesos, do leque de funções a apresentar e dos pontos de controlo a determinar. Caso se identifiquem elementos geradores de resistência ao movimento ao longo dos percursos, a saber, escadas ou rampas de forte inclinação, dever-se-á ponderar a inclusão de impedâncias nos arcos da rede. Decidir-se-á ainda quais os pontos do espaço estratégico serão incluídos na avaliação.

Aplicando o modelo com os dados obtidos, efectua-se uma avaliação dos pontos seleccionados ao longo da rede. Com base nos mesmos, gerar-se-ão mapas de acessibilidade, efectuando-se modelações de superfícies irregulares de triângulos, de forma a tornar a visualização dos resultados mais intuitiva. Um exemplo detalhado de uma aplicação desta natureza pode ser encontrado em Rodrigues (2001), que aplicou a técnica para um dos *campi* da Universidade do Minho, em Braga, Portugal. Um dos cenários encontrados é apresentado a título de exemplo na Figura 4. Comparando os cenários encontrados e confrontando-os com a análise do risco de avaliação, pode-se concluir que as áreas de maior acessibilidade encontradas para a solução de risco mínimo (vértice inferior direito na Figura 2) são aquelas empregadas por todos os utilizadores do *campus*, independentemente do seu local preferencial de trabalho no mesmo, isto é, as portas de acesso, parques de estacionamento e entradas.

5. CONCLUSÕES

O modelo de avaliação da acessibilidade aqui apresentado baseia-se na medição da distância entre um ponto de partida (a avaliar) e os destinos-chave. O índice de acessibilidade global é obtido através do uso de técnicas de análise multicritério, em cada nó da rede e em relação aos destinos-chave. Dado que os pontos avaliados são discretos, propõe-se o ajuste aos mesmos de superfícies contínuas com a finalidade de permitir visualizar a distribuição da

acessibilidade para toda a área em estudo. Desta forma, procura-se suprir uma das deficiências dos sistemas tradicionais (baseados em quadros e tabelas) que consiste numa comunicação pouco eficaz dos resultados e das alternativas aos decisores (Malczewski *et al.*, 1997; Malczewski, 1999).

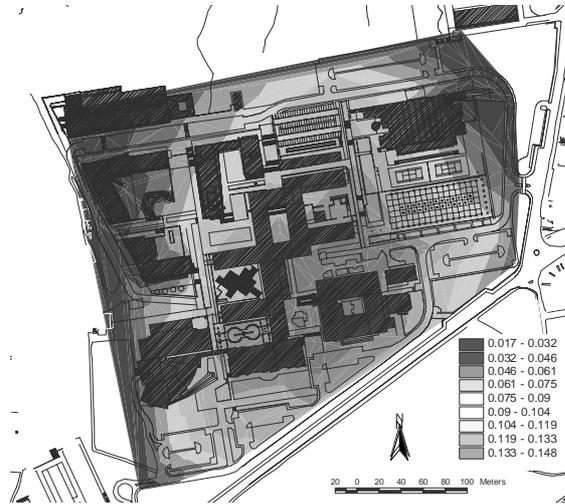


Figura 4: Cenário de avaliação de risco mínimo

Por recorrer ao operador de agregação OWA (*Order Weighted Average*), aponta-se como maior potencial do modelo a possibilidade de desenvolver cenários de avaliação baseados na atitude de risco (*ANDness*) e compensação entre critérios (*trade-off*), obtendo-se desta forma um espectro estratégico de avaliação. Na base do modelo encontram-se os grupos de destinos-chave e respectivas ponderações (pesos), que se recomenda obter a partir dum inquérito à comunidade utente de forma a reflectir o ponto de vista da mesma. É de salientar ainda, que se preconiza a integração directa no ambiente SIG dos métodos de avaliação multicritério. Esta orientação leva a uma potenciação e a um aumento da utilidade dos SIGs em tarefas de avaliação (Carver, 1991; Arentze *et al.*, 1994a), como demonstrou ainda o trabalho de Rodrigues (2001), apontado como exemplo de aplicação neste artigo. Além disso, este exemplo de avaliação de acessibilidade, realizado com a técnica de avaliação multicritério integrada a um SIG vectorial, abre ainda perspectivas de aplicação do modelo proposto para outros problemas de planeamento de transportes.

Apesar de apontar o potencial do modelo proposto para a avaliação da acessibilidade, o exemplo apresentado, no entanto, não esgota suas possibilidades analíticas. A sua exploração pode assumir ainda, na prática, formatos diversos, tais como: (1) a identificação de destinos-chave que justifiquem, pela sua relevância e taxa de frequência, a sua realocação por se encontrarem em zonas com baixa acessibilidade; (2) a identificação de localizações preferenciais de novos edifícios (para a implantação dos quais, geralmente, só existem, à partida, zonas com baixa acessibilidade); podendo-se ainda definir os ajustes a implementar na rede de acessos de forma a aumentar a acessibilidade das futuras edificações, em função da importância dos serviços que irão albergar. Em termos futuros, sugere-se que, noutros estudos que utilizem este modelo de avaliação da acessibilidade, a resistência ao movimento possa contemplar aspectos como o conforto e/ou a mobilidade. Nesse sentido, poderá ter-se em conta factores como a segurança, o volume de tráfego, a topografia, a qualidade dos passeios

ou a facilidade em atravessar as ruas, mediante a sua adequação ou não ao tipo de estudo pretendido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao ICCTI (Instituto de Cooperação Científica e Tecnológica Internacional) e à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), agências de fomento à pesquisa em Portugal e no Brasil, respectivamente, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, W. B., D. Liu e S. Singer (1993) Accessibility Measures of U.S. Metropolitan Areas. *Transportation Research, Part B, Methodological*, v. 27, n. 6, p. 439-450.
- Arentze, T. A.; A. W. J. Borgers, H. J. P. Timmermans (1994a) Geographical Information Systems in the Context of Multipurpose Travel: A New Approach. *Geographical Systems*, v. 1, n. 4, p. 87-102.
- Arentze, T. A.; A. W. J. Borgers e H. J. P. Timmermans (1994b) Multistop-based Measurements of Accessibility in a GIS Environment. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 8, n. 4, p. 343-356.
- Aultman-Hall, L.; M. Roorda e B. W. Baetz (1997) Using GIS for Evaluation of Neighborhood Pedestrian Accessibility. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 123, n. 1, ASCE, p. 10-17.
- Bender, M. J. e S. P. Simonovic (1995) *On the Use of GRASS for Preparation of Water Resources Planning and Management: Case Studies*. Water Resources Research Report 34. The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Bruinsma, F. e P. Rietveld (1998) The Accessibility of European Cities: Theoretical Framework and Comparison of Approaches. *Environment and Planning A*, v. 30, p. 499-521.
- Carver, S. J. (1991) Integrating Multi-criteria Evaluation with Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 5, n. 3, p. 321-339.
- Eastman, J. R. (1997) *IDRISI for Windows: User's Guide. Version 2.0*. Clark University - Graduate School of Geography, Worcester, MA, USA.
- Eastman, J. R.; H. Jiang e J. Toledano (1998) Multi-criteria and Multi-objective Decision Making for Land Allocation Using GIS. In: Beinat, E. e P. Nijkamp (eds.) *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 227-251.
- Easton, A. (1973) *Complex Managerial Decision Involving Multiple Objectives*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Ewart, G. M. (1994) *Integrating Geographic Information Systems and Multicriteria Decision Making to Develop a Prototype Decision Support System for Health Professionals*. Tese de Mestrado, Universidade de Idaho, Moscow, ID, USA.
- Geertman, S. C. M. e J. R. R. Van Eck (1995) GIS and Models of Accessibility Potential: An Application in Planning. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 1, p. 67-80.
- Goto, M.; A. N. R. Silva e J. F. G. Mendes (2001) Uma Análise de Acessibilidade sob a Ótica da Equidade – O Caso da Região Metropolitana de Belém, Brasil. *Engenharia Civil/Civil Engineering*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, n. 10, p. 55-66.
- Hogart, K. (1973) *Transportation Accessibility: Some References Concerning Applications, Definitions, Importance and Index Construction*. Council of Planning Librarians: Exchange Bibliography 482, Monticello, IL, USA.
- Ingram, D. R. (1971) The Concept of Accessibility: A Search for an Operational Form. *Regional Studies*, v. 5, n. 2, p. 101-107.
- Jankowski, P. e G. Ewart (1996) Spatial Decision Support System for Health Practitioners: Selecting a Location for Rural Health Practice. *Geographical Systems*, v. 3, n. 2, p. 279-299.
- Jankowski, P.; N. Andrienko e G. Andrienko (2001) Map-centred Exploratory Approach to Multiple Criteria Spatial Decision Making. *International Journal of Information Science*, v. 15, n. 2, p. 101-127.
- Jankowski, P.; T. L. Nyerges, A. Smith, T. J. Moore e E. Horwath (1997) Spatial Group Choice: A SDSS Tool for Collaborative Spatial Decision-Making. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 11, n. 6, p. 566-602.
- Love, D. e P. Linquist (1995) The Geographical Accessibility of Hospitals to the Aged: A Geographic Information Systems Analysis within Illinois. *Health Services Research*, v. 29, n. 6, p. 629-652.
- Mackiewicz, A. e W. Ratajczak (1996) Towards of New Definition of Topological Accessibility. *Transportation Research, Part B, Methodological*, v. 30, n. 1, p. 47-79.
- Malczewski, J. (1999) *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Malczewski, J.; M. Pazner e M. Zaliwska (1997) Visualization of Multicriteria Location Analysis Using Raster

- GIS: A Case Study. *Cartography and Geographic Information Systems*, v. 24, n. 2, p.80-90.
- Mendes, J. F. G (2001) Multicriteria Accessibility Evaluation using GIS as Applied to Industrial Location in Portugal. *Earth Observation Magazine*, v. 10, n. 2, p. 31-35.
- Morris, J. M.; P. L. Dumble e M. R. Wigan (1979) Accessibility Indicators for Transport Planning. *Transportation Research, Part A, Policy and Practice*, v. 13, n. 2, p. 91-109.
- Osgood, C. E.; G. J. Suci e P. H. Tannenbaum (1957) *The Measurement of Meaning*. Universidade of Illinois Press, Urbana, IL, USA.
- Ramos, R. A. R. (2000) *Localização Industrial. Um Modelo Espacial para o Noroeste de Portugal*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Rodrigues, D. S. (2001) *Avaliação Multicritério da Acessibilidade em Ambiente SIG*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Saaty, T. L. (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p.234-281.
- Saaty, T. L. (1980) *The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Saaty, T. L. (1987) Concepts, Theory, and Techniques: Rank Generation, Preservation, and Reversal in the Analytic Hierarchy Decision Process. *Decision Sciences*, v. 18, n. 2, p. 157-177.
- Schoon, J. G., M. MacDonald e A. Lee (1999) Accessibility Indices: Pilot Study and Potential Use in Strategic Planning. *Proceedings of the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (em CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Shen, Q. (1998) Location Characteristics of Inner-city Neighborhoods and Employment Accessibility of Low-wage Workers. *Environment and Planning B*, v.25, p. 345-365.
- Silva, A. N. R. (1998) *Sistemas de Informações Geográficas para o Planejamento de Transportes*. Tese de Livre-docência. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Silva, A. N. R.; A. A. Raia Jr. e C. W. R. Bocanegra (2002) Exploring an ANN Modeling Approach that Combines Accessibility and Mobility into a Single Trip Potential Index for Strategic Planning. *Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board* (em CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Simonovic, S. P. e M. J. Bender (1996) Collaborative Planning-Support System: An Approach for Determining Evaluation Criteria. *Journal of Hydrology*, v. 177, n. 3-4, p. 237-251.
- Stillwell, W. G., D. A. Seaver e W. Edwards (1981) A Comparison of Weight Approximation Techniques in Multiattribute Utility Decision Making. *Organizational Behavior and Human Performance*, v. 28, n. 1, p. 62-77.
- Tagore, M. R. e P. K. Sikdar (1995) A New Accessibility Measure Accounting Mobility Parameters. *Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research*, The University of New South Wales, Sydney, Austrália, v. 1, p. 305-315.
- Talen, E. e L. Anselin (1998) Assessing Spatial Equity: An Evaluation of Measures of Accessibility to Public Playgrounds. *Environment and Planning A*, v. 30, p. 595-613.
- Turró, M.; A. Ulied, A. Esquius e E. Cañas (2000) Definición del Indicador de Conectividad ICON. *Memorias del IV Congreso de Ingeniería del Transporte*, Valencia, Espanha, v.1, p. 21-29.
- Van der Waerden, P.; H. Timmermans, J. Smeets e A. N. R. Silva (1999) The Validity of Conventional Accessibility Measures: Objective Scores versus Subjective Evaluations. *Anais do XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Carlos, v. 1, p. 40-49.
- Voogd, H. (1983) *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Pion, London.
- Yager, R. R. (1988) On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 8, n. 1, p.183-190.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353.

Endereço dos autores:

Daniel Souto Rodrigues, Assistente Email: dsr@civil.uminho.pt	UNIVERSIDADE DO MINHO Esc. de Engenharia – Depart. de Eng. Civil
José Fernando Gomes Mendes, Prof. Assoc. c/ Agreg. Email: jmendes@civil.uminho.pt	Campus de Gualtar 4710-057 Braga, PORTUGAL
Antônio Néilson Rodrigues da Silva, Prof. Assoc. Email: anelson@sc.usp.br	UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO Esc. de Engenharia de São Carlos – Depart. Transportes Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro 13566-590, São Carlos/SP, Brasil
