

APLICAÇÃO DO MODELO DE POLÍGONOS DE VORONOI EM ESTUDOS DE ÁREAS DE INFLUÊNCIA DE ESCOLAS PÚBLICAS: ESTUDO DE CASO EM OURO PRETO – MG¹

Ana Clara Mourão Moura

Departamento de Urbanismo, Escola de Arquitetura
Universidade Federal de Minas Gerais
E-mail: anaclara@ufmg.br

RESUMO O artigo apresenta estudo de caso de aplicação do modelo de Polígono de Voronoi para áreas de influência de escolas públicas em Ouro Preto - MG como motivação para a discussão metodológica de aplicação da técnica como um apoio a estudos ambientais e urbanos que tenham como objetivo verificar a construção de potenciais espaciais e área de influência de fenômenos. Explora as técnicas de Polígonos de Voronoi, sobretudo o modelo complexo, e das Análises de Multicritérios. O estudo descreve os processos de tratamento de dados para se compor planos de informação que tornam possível a pesquisa em análises urbanas. Aborda como lidar com informações matriciais para a combinação de variáveis. Apresenta um estudo de caso de organização e montagem de Sistema de Informações Geográfico. Apresenta os procedimentos de Polígono de Voronoi e Análise de Multicritérios com o objetivo de dar apoio à construção de cenários de fenômenos.

Código JEL: C63

Palavras-chave: Análise Espacial, SIG, Modelos de área de influência.

* Artigo recebido em novembro/2008 e aceito em janeiro/2009.

¹ Trabalho apresentado inicialmente em: Moura, Ana Clara M. Discussões metodológicas para aplicação do modelo de Polígonos de Voronoi em estudos de áreas de influência fenômenos em ocupações urbanas – estudo de caso em Ouro Preto – MG. Anais VII Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos - ENABER, São Paulo, Brasil, 9-11 setembro 2009, FEA/USP.

ABSTRACT This article presents a case study of the application of Polygon of Voronoi spatial model on to area of influence from public schools at Ouro Preto – MG, in order to motivate methodological discussions of the application procedures for the urban environmental studies that use the Polygon of Voronoi and multi criteria analyses in the evaluation of potential areas and areas of influence in order to construction of predicted scenarios regarding some kind of spatial phenomenon. It explores the Polygon of Voronoi Complex spatial model and multi criteria analyses. The article describes the process of data treatment so that it can compose layers of information making the characterization and the analyses of urban environmental issues possible. It focuses on how to deal with information in matricial files to combine variables. This study presents the analyses of the assembling and construction phases in Geographic Information System.

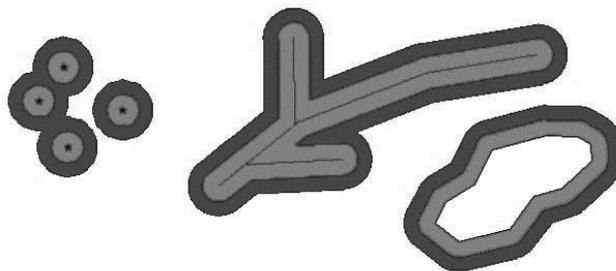
Keywords: Spatial analysis, GIS, models of area of influence.

1. Introdução

A identificação e mapeamento das áreas de influência de pontos ou ocorrências espaciais de fenômenos sempre foram de grande interesse para os estudos urbanos, uma vez que estas especializações são bases para a definição de zoneamentos e segmentações administrativas de um território. Tomando como exemplo a tarefa de definição de lugares ótimos para a instalação de postos de saúde em um município, é de interesse verificar até onde chega a influência de uma localização, para que sejam tomadas decisões sobre as áreas de abrangência em relação à distribuição do atendimento comunitário em distritos de saúde, assim como para o apoio à decisão na instalação de novas unidades. Usando um exemplo da área de geomarketing, o estudo da área de influência de cada estabelecimento de um conjunto de supermercados é de interesse para o apoio à decisão de implantação de um novo ponto comercial.

O modelo de delimitação de área de influência mais conhecido, de mais fácil aplicação e o mais utilizado é o *buffer*. A maioria dos aplicativos de geoprocessamento apresenta recursos para que sejam construídos *buffers* a partir de pontos, linhas ou polígonos. Trata-se da simples definição de uma área paralela ao elemento que a deu origem, segundo uma dimensão determinada pelo usuário. É comum, nos estudos ambientais, por exemplo, o mapeamento da faixa de domínio de rios e córregos por este procedimento, ou a definição da faixa de domínio da linha de transmissão de energia elétrica por este procedimento. A definição da área de domínio é realizada por procedimento de desenho geométrico de paralelas (figura 1).

FIGURA 1



Nota: *Buffer* (faixa de domínio) a partir de pontos, linhas e polígono

Segundo Moura (2003), embora muito usado, talvez pela facilidade de construção, o *buffer* parte do pressuposto de que se tem uma superfície homogênea na região de sua expansão, não considerando o que tem sido denominado por alguns de atrito ou rugosidades do território. Os conceitos de atrito ou rugosidade seriam as impedâncias ou características do território que fazem com que a área de influência não apresente comportamento regular. Por exemplo: se há uma linha de trem nas proximidades, ela pode ser entendida como uma impedância ou atrito ao acesso naquela direção.

A interpretação deste espaço dotado de complexidades é, na verdade, reflexo de interesses defendidos há bastante tempo, desde o início do século XX, quando se apresenta o princípio de “espaço relativo”. O conceito foi definido pelo físico Poincaré (1908) em sua publicação *Science et méthode*, no qual ele defende que a localização relativa de um ponto depende de sua posição em relação aos outros, o que pode variar com o tempo e com a abordagem. Pode-se assim ter uma distância-tempo no espaço absoluto diferente da distância-tempo no espaço relativo e se inicia aí a consciência da variabilidade dos fenômenos e da validade das análises dentro de situações pré-determinadas.

Na década de 70, Hägerstrand (1973) defende a profunda relação entre tempo e espaço, que atuam de modo sistêmico, de modo a atribuir valores relativos, e não absolutos, a cada componente do sistema. As formas de ocupação da realidade espacial vão acontecer em domínios no tempo e no espaço, cuja difusão dependerá das diferenças físico-territoriais, sócio-territoriais e sócio-geográficas.

Essas diferenças territoriais foram classificadas por alguns autores, na década de 80, como *reverse salient* ou “rugosidades”, descritos por Santos (1978 e 1996) e Joerges (1988). Devido à existência de diferenças nos arranjos de variáveis que compõem a realidade espaço-temporal, a difusão das formas de ocupação e das inovações geradas pelo avanço tecnológico não se dá de modo uniforme, mas é canalizada mais rapidamente para parcelas onde há elementos catalizadores ou facilitadores. O resultado são os diferentes domínios, cada um vivendo uma escala temporal.

A difusão, segundo Moura (2003) é um processo de redistribuição de elementos simples ou complexos no tempo e no espaço, pois com o adensamento de um ponto (saturação) ocorre a distribuição para áreas vizinhas. Segundo Dauphiné (1995) as formas de difusão

espaciais podem ser ao acaso, por novas hierarquias ou por contigüidade. A complexidade está, justamente, em perceber as constantes mudanças espaço-temporais e ainda em reconhecer o valor relativo (e não absoluto) das diferentes variáveis que compõem o sistema. Assim, Kubler (1973) sugere o trabalho com três coordenadas: o lugar, a idade e a seqüência. Pela variável seqüência entende-se que os objetos estão organizados segundo uma hierarquia, uma ordem de combinações que dão sentido àquele meio:

O valor total das coisas se modifica, a cada momento, arrastando a alteração do valor de cada coisa. Tal distribuição de valores não é aleatória. Ela revela as determinações pelas quais a realidade total vai mudando para se encaixar nas formas preexistentes ou criadas. O modelo sistemas de objetos / sistemas de ações somente se entende como um modelo espaço-temporal.

O desafio está em realizar um corte espaço-temporal para as análises, mas, ao mesmo tempo, não perder a noção de que a realidade é sistêmica e que está em constante mudança. Além disto, a distribuição das ocorrências não é homogênea, mas condicionada por rugosidades da composição social e territorial. Contudo, é possível procurar a essência que caracteriza um espaço se for mapeada a hierarquia, ou ordem, que dá forma aos arranjos de variáveis.

Entre os modelos existentes para se chegar a uma aproximação de representação de realidade um pouco mais complexa, já considerando a complexa gama de variáveis, a possibilidade de hierarquizar-las segundo seus graus de pertinência para o fenômeno, e a consideração das rugosidades territoriais podem ser citados a Análise de Multicritérios e as áreas de influência segundo o Polígono de Voronoi.

A Análise de Multicritérios é um procedimento metodológico de cruzamento de variáveis amplamente aceito nas análises espaciais. Ela é também conhecida como Árvore de Decisões ou como Análise Hierárquica de Pesos. O procedimento baseia-se no mapeamento de variáveis por plano de informação e na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus componentes de legenda para a construção do resultado final. A matemática empregada é a simples Média Ponderada e há pesquisadores que utilizam a lógica Fuzzy para atribuir os pesos e notas.

O Polígono de Voronoi é um modelo de análise que permite o estudo das áreas de influência de pontos de interesse definidas por suas posições em relação ao conjunto de dados. O princípio é que estas manchas não sejam compostas pela simples distribuição euclidiana, mas sejam deformadas pela influência do meio (atrito ambiental - por exemplo, barreiras à expansão urbana) e pela massa de seus pontos geradores (por exemplo, número de vagas nas escolas).

Assim, diante do exposto, o objetivo do presente artigo é suscitar discussões sobre as aplicabilidades e as condições para se empregar dois modelos de análise espacial - de área de influência e o de geração superfície potencial resultante da combinação de variáveis - que traduzam as complexidades da questão ambiental. A geração de superfície potencial é relatada na Análise de Multicritérios e a geração de áreas de influência é relatada nos Polígonos de Voronoi, sobretudo o modelo complexo. É importante notar que se trata de um roteiro metodológico para o qual deve ser respeitada a seqüência de aplicação dos modelos. Para ilustração de seus recursos e dos cuidados necessários para suas adoções, escolhe-se como estudo de caso a distribuição de escolas públicas em Ouro Preto – MG.

2. Fundamentação Teórica

São apresentadas discussões sobre o estado da arte dos modelos de análise de multicritérios, destinados à geração de superfícies potenciais de combinação de variáveis, assim com de Polígonos de Voronoi destinados aos estudos de área de influência territorial. As discussões embasam a proposta metodológica de emprego dos procedimentos embasados por esses modelos.

2.1. Análise de Multicritérios

Segundo Moura (2007a) o procedimento de análise de multicritérios é muito utilizado em geoprocessamento, pois se baseia justamente na lógica básica da construção de um SIG: seleção das principais variáveis que caracterizam um fenômeno, já realizando um recorte metodológico de simplificação da complexidade espacial; representação da realidade segundo diferentes variáveis, organizadas em camadas de informação; discretização dos planos de análise em resoluções espaciais adequadas tanto para as fontes dos dados como para

os objetivos a serem alcançados; promoção da combinação das camadas de variáveis, integradas na forma de um sistema, que traduza a complexidade da realidade; finalmente, possibilidade de validação e calibração do sistema, mediante identificação e correção das relações construídas entre as variáveis mapeadas.

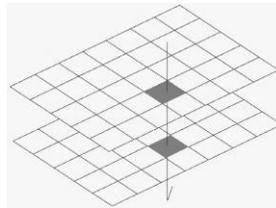
O primeiro passo é a composição de uma base de dados cartográficos, composta na forma de planos de informação e que deverão ser conjugados nas aplicações de modelos de análise espacial, pode ser realizada em formato vetorial ou matricial, mas há fortes tendências para o predomínio das operações dos modelos em formatos matriciais (*raster*). A questão se justifica pela relação de topologia implícita ao processo matricial, o que não só otimiza o cruzamento de dados, como também é condição *sine qua non* em alguns modelos.

A vantagem de adoção do sistema matricial está na necessidade de modelar o dado desde a sua representação inicial, até o seu cruzamento com outros dados. A aplicação de processos de consultas, cruzamentos e ponderações de variáveis requerem o conhecimento das características específicas do dado, o seu modo de coleta, assim como a adoção de modelos de análise. Assim, a proposta é a de representação de variáveis em planos de informação armazenados na forma de matrizes.

O trabalho em planos de informação, segundo Xavier-da-Silva (2001) é a adoção de uma matriz tridimensional $A_{i,j,k}$, na qual há um referencial geográfico (estrutura de georreferenciamento) e a latitude e a longitude definem a localização de qualquer ponto contido na base de dados. O eixo "k" define a posição do ponto nas diferentes referenciais taxonômicas, que são conjuntos de variáveis classificadoras do espaço (temas). Ex.: Um ponto apresenta posição "x" e "y" em latitude e longitude, classificação taxonômica como um tipo de solo "a", uma classe de declividade "aa", e uso da terra tipo "aaa".

É importante definir a unidade territorial de integração das análises, o que significa a escolha da resolução dos planos de informação e, conseqüentemente, a resolução ou precisão espacial das análises geradas. Para ser possível o cruzamento de dados os planos de informação deverão todos apresentar a mesma resolução de armazenamento, ainda que suas elaborações tenham sido realizadas em outras resoluções. A definição da resolução é a escolha do tamanho do pixel na composição dos mapas em formato matricial e do número de linhas e colunas na matriz de representação, conforme representado na figura 2.

FIGURA 2



Fonte: Moura, 2003, p. 70

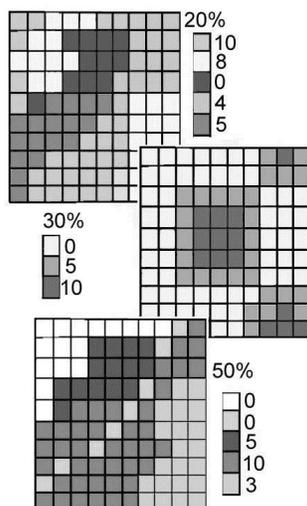
Nota: Coincidência espacial - sobreposição de planos de informação de mesma resolução.
Representação matricial em linhas e colunas, com a dimensão do pixel definindo a resolução.

É comum que em uma análise espacial as variáveis que compõem os planos de informação apresentem fontes de dados diferentes e escalas diferentes, o que resultaria em possibilidades diferentes de resoluções espaciais. O procedimento indicado é a adoção da pior resolução entre as praticadas (maior dimensão de pixel), pois não é cartograficamente correto reduzir a resolução e melhorar a representação de um dado cuja fonte era de pior qualidade.

Para exemplificar a questão da resolução comum, pode-se considerar o caso um conjunto de planos de informação seja composto pela camada de recursos hídricos (escala 1:50.000), uso do solo (escala 1:150.000 ou pixel de 30 metros) e pela camada de eixos rodoviários (escala 1:25.000). A camada de recursos hídricos poderia ser representada com a resolução ou pixel de 10 metros (0,2mm na escala da fonte, o que representa a acurácia visual ou o menor elemento que se consegue representar), a camada de uso do solo com pixel de 30 metros e a camada de eixos rodoviários com a resolução ou pixel de 5 metros. Contudo, não seria possível aplicar modelos de cruzamento das camadas devido às diferentes resoluções, o que obriga a reamostragem em uma unidade comum, que é denominada unidade territorial de integração. O correto, cartograficamente, é a adoção da pior resolução, no caso o pixel de 30 metros, por processo de generalização cartográfica. Uma vez construída a análise, o resultado final é válido para a resolução de 30 metros.

Uma vez estruturada a coleção cartográfica com as variáveis, elas são combinadas por álgebra de matrizes através da média ponderada que atribui pesos para cada camada ou variável e notas a cada componente de legenda, conforme exemplificado na figura 3.

FIGURA 3



Nota: Construção dos mapas na forma de matrizes e atribuição de pesos para as camadas (o conjunto deve somar 100%) e notas para os componentes de legenda (de 0 a 10 segundo o grau de pertinência).

As camadas de informação são combinadas pela média ponderada conforme o procedimento:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (P_k \times N_k)$$

Sendo:

A_{ij} – a posição na matriz de análise (linha/coluna), ou do pixel no mapa; n – número de mapas ou camadas de variáveis cruzadas;

P_k – pontos percentuais ou peso atribuído ao mapa ou camada de variável k;

N_k – graus de influência (de 0 a 10) da tipologia da variável para o risco final avaliado

O emprego da Média Ponderada cria um espaço classificatório, ordinal, que pode ser também entendido como uma escala de intervalo. Esse processo pode também ser utilizado em escala nominal, desde que os eventos sejam hierarquizados segundo algum critério de valor. A ponderação deve ser feita por *knowledge driven evaluation*, ou seja, por conhecedores dos fenômenos e das variáveis da situação avaliada, ou por *data-driven evaluation* que se refere ao conhecimento prévio de situações semelhantes. Nesse processo, a possibilidade de se ponderar de modo inadequado uma situação é o inverso do número de ponderações atribuídas. Para construir uma função de pertinência indica-se a aplicação do método Delphi ou a consulta direta a especialistas (*experts*).

O método Delphi na obtenção dos pesos e notas baseia-se na escolha de um grupo multidisciplinar de especialistas, que conheçam bem o fenômeno e melhor ainda se conhecerem bem a realidade espacial onde ele se localiza. A esses especialistas é solicitado que hierarquizem ou coloquem as variáveis (ou planos de informação) em ordem de importância para a manifestação ou ocorrência de fenômeno estudado. Exemplo: para a geração do mapa de Potencial de Riscos, qual é a ordem de importância das variáveis escolhidas? Uma vez recebidas respostas do grupo, realiza-se a seleção da média e a indicação do predomínio nas manifestações. O especialista então recebe o resultado da consulta e é solicitado a rever suas posições – caso ele tenha firmeza das suas escolhas, mantém suas respostas, mas caso ele decida ajustar suas avaliações diante da resposta do grupo, ele manifesta nova opinião. Assim é feito por 2 rodadas, mas há situações em que se aplicam 3 rodadas.

O resultado, uma vez combinadas as camadas, é uma superfície potencial, com resultados por unidade territorial de integração (ou pixel) da investigação que se propôs a realizar. Por exemplo, pode ser o potencial de expansão urbana, resultante da combinação de vasta gama de variáveis organizadas na forma de camadas de informação, entre as quais podemos citar a infra-estrutura, a acessibilidade, o valor da terra, a distribuição de comércio e prestação de serviços, entre muitas outras.

O objetivo em apresentar o referido modelo de análise espacial neste artigo é defender a idéia de que ele seja usado para gerar uma superfície de atrito, ou rugosidade, que se incorpore aos estudos de área de influência dos polígonos de Voronoi. Muitas vezes o que torna uma área mais ou menor acessível não é uma única variável, mas um conjunto

delas, o que justifica a adoção de um modelo de combinação de variáveis. Se objetivo for, por exemplo, o estudo da área de influência de escolas em um município, o atrito ambiental pode ser composto pelas variáveis de declividade nas vias, tipo de via (devido ao nível de fluxo de veículos), a presença de áreas de risco social, entre outras, que devem ser combinadas para a composição do mapa de atrito ambiental.

A análise de multicritérios tem sido amplamente aceita para estudos que exigem a combinação de complexa gama de variáveis para a geração de ma superfície potencial que seja a síntese deste conjunto. Entre as muitas aplicações que já conduzimos deste modelo, citamos os estudos relatados em 2003 (Moura, 2003), e o complexo estudo de recuperação de vilas e favelas em Belo Horizonte, o caso do Programa Vila Viva (Moura, 2007b). No Programa Vila Viva coube à nossa equipe a definição de uma escala hierárquica de prioridade de intervenção nas vilas e favelas, uma vez que elas são quase 300 e não haveria como empreender o programa em todas elas. Assim, a partir da combinação de expressiva quantidade de variáveis das condições antrópicas (sócio econômicas, demográficas, entre muitas outras), ambientais e de risco (geotecnia, entre outras), foi gerada uma classificação entre as áreas foco do projeto.

2.2. Polígono de Voronoi

Segundo Moura (2003), o princípio do Polígono de Voronoi ou de Thiessen é de que, considerando um território, há pontos que estão mais próximos de uma fonte geradora do que de outra fonte, e o resultado é um polígono cujas distâncias entre fonte e ponto são os menores possíveis. Os polígonos resultantes podem ir além da simples divisão de áreas, e serem deformados por características ambientais, que são o atrito e a influência das massas de seus pontos geradores, que devem ter poder de organizar o espaço e definir a área de influência do ponto. Na situação aqui proposta será utilizado o modelo de Voronoi com massa, definida pelo número de vagas nas escolas, fator determinante na conformação de suas áreas de influência.

Xavier-da-Silva (1999) assim explica a construção do modelo:

Em termos computacionais, pode ser mensurada a distância de cada ponto da matriz $A_{m \times n}$ até cada ponto gerador,

sendo sua pertinência definida pela menor destas distancias. Esta relação pode ser considerada inversa, uma vez que o cotejo das distâncias computadas definirá, pela menor distância encontrada, conforme declarado acima, a pertinência a um dos polígonos em construção. Em consequência, ao final da verificação das pertinências (por varredura), todos os pontos A_{ij} serão alocados a polígonos de Voronoi. Fica assim subdividido o plano discretizado em "k" polígonos irregulares, que o integram.

Marino e Xavier-da-Silva (2005) explicam que o modelo trabalha sobre uma matriz de células, composta por "n" pontos geradores, ao qual se aplica a álgebra:

$$Pol(g_i) = \{x \in R^2 \mid \text{dist}(x, g_i) < \text{dist}(x, g_j), \forall g_j \in G - g_i\}$$

Onde:

$Pol(g_i)$ = polígono referente ao ponto gerador "g_i";

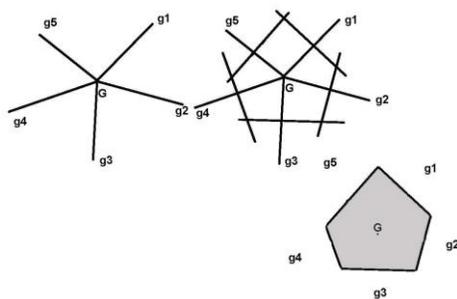
x = ponto pertencente a uma região do espaço R^2 ;

$\text{dist}(x, g_i)$ ou $\text{dist}(x, g_j)$ = distância entre dois pontos pertencentes à região, o segundo sendo ponto gerador de polígono;

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ = (conjunto de pontos geradores);

O procedimento de construção do Voronoi simples é explicado pela figura 4.

FIGURA 4



Nota: A partir do ponto G são traçadas linhas que o unem aos pontos mais próximos. Depois são traçadas mediatrizes e, finalmente, definido o polígono de influência de G.

Os autores (op. cit.) continuam:

Considerando que a característica fundamental de um polígono de Voronoi é a de ser constituído por pontos que estão mais próximos de seu ponto gerador do que de qualquer outro ponto gerador, para sua criação, em termos computacionais, pode ser mensurada a distância de cada célula da matriz até cada ponto gerador, sendo sua pertinência a um polígono definida pela menor destas distâncias. Esta relação pode ser considerada inversa, uma vez que o cotejo das distâncias computadas definirá, pela menor distância encontrada, a pertinência a um dos polígonos em construção, conforme declarado acima. Em conseqüência, ao final da verificação das pertinências (por varredura), todas as células da matriz serão alocadas aos diversos pontos geradores de polígonos de Voronoi. Por este critério reproduzível, fraciona-se toda a região analisada em "n" polígonos irregulares, os quais, rigorosamente, a integram.

É possível modificar o cômputo de um polígono de Voronoi para que passe a considerar outros parâmetros além da distância euclidiana para a definição de pertinência de um ponto a um polígono. Pode-se, assim, deformar ordenadamente o espaço geográfico para que passe a representar, em sua estruturação, as duas tendências que normalmente ocorrem neste processo: a) a organização do espaço segundo a ocorrência de centros de influência - a polarização do território; e b) a presença de características ambientais dominantes, indicadoras das possibilidades da ocupação humana e definidoras de uma certa regularidade paisagística - o conceito de região, zona ou área homogênea.

A simples distribuição geométrica de área de influência, conhecida como Polígono de Thiessen ou Polígono de Voronoi, pode adquirir maior robustez e se aproximar da representação da complexidade da realidade. O Polígono de Voronoi complexo é capaz de considerar o poder da massa do ponto (a força de propagação da influência de um ponto), como também os atritos do ambiente à difusão desta influência. A massa de um ponto pode ser, por exemplo, no caso de escolas o número de vagas, no caso de postos de saúde o número de leitos e no caso de um supermercado algum índice composto por uma coleção de variáveis. O

atrito ambiental pode ser, por exemplo, a acessibilidade, a pavimentação e tipo de vias, a declividade, tipologias de ocupação, entre outras.

Para considerar massa e atrito a equação de Polígono de Voronoi continua calculando a distância entre o ponto irradiador e todos os outros pertencentes à matriz, ponderado pela massa e tendo sua influência reduzida pelo atrito:

$$(FZ)G_i = M G_i / [(Dx \ G_i) A_x \ G_i]$$

Onde:

(FZ)G_i = Força de Zoneamento do pólo

G_i; M G_i = Medida de massa do pólo G_i ;

Dx G_i = distância euclidiana entre cada ponto examinado e o pólo G_i; e

A_x G_i = C_k onde,

por sua vez:

n = número de células encontrado na trajetória de x G_i;

C_k = valor do atrito ambiental estimado para cada célula da mesma trajetória.

3. Proposta Metodológica: Aplicação do Polígono de Voronoi para estudo das áreas de influência de escolas públicas em Ouro Preto-MG

O objetivo é a demarcação da área de influência das escolas públicas de Ouro Preto, com vista a verificar se as localizações e os números de vagas estão adequados para cobrir espacialmente a ocupação urbana a cidade. Para que o estudo também apresente o caráter didático a que se propõe, apresentamos a aplicação do modelo de Polígono de Voronoi simples e complexo. O modelo simples visa à compreensão do que é simplificada distribuição geometria das áreas de influência. O Polígono de Voronoi complexo ponderado pela massa, considerado massa o número de vagas em cada escola, e finalmente o Polígono de Voronoi complexo considerando tanto a massa como o atrito, sendo o atrito um conjunto de variáveis espaciais que dificultam ou alteram as condições de acesso às escolas.

Para a elaboração do mapa de atrito ambiental forma consideradas as variáveis de declividade das vias, tipo de pavimentação, tipo de via (local, coletora, arterial) e as tipologias de uso do solo. Estas

variáveis foram combinadas por análise de multicritérios, através da qual foi aplicada a média ponderada para a geração da síntese de atrito.

3.1. Procedimentos metodológicos

O roteiro metodológico da prática pode ser explicado através das etapas:

3.1.1. Definição dos objetivos e aplicações no uso do sistema

Definição de que iria se trabalhar com as escolas públicas, para comparar condições semelhantes, pois não seria o caso de colocar para comparação as escolas particulares também. Definição das variáveis que devem ser consideradas para a composição do grau de atrito.

3.1.2. Organização da base de dados alfanumérica e cartográfica

Coleta de dados sobre a posição das escolas e os respectivos números de vagas. Composição dos mapas de vias, declividade nas vias, tipo de via, pavimentação nas vias e uso do solo urbano.

3.1.3. Tratamento dos dados para trabalho matricial (álgebra de mapas)

Composição dos mapas em formato vetorial e conversão para o formato matricial com definição da matriz – número de linhas e colunas e célula (pixel) que corresponde à unidade territorial de integração.

3.1.4. Definição de pesos e notas das variáveis

Atribuição de pesos e notas para as camadas que compoariam o mapa de atrito Decidiu-se por atribuir maior valor à declividade nas vias (40%), seguido de tipo de pavimentação (25%) e uso do solo (25%) e, por último, a classificação da via (10%). A decisão se baseou no conhecimento especialista das condições e características próprias de Ouro Preto. Caso o nível de complexidade fosse maior, poderíamos ter aplicado um Delphi para consulta a maior grupo de especialistas. As notas de cada componente de legenda das variáveis citadas foram atribuídas em função da maior influência como fator dificultador de acesso, distribuídas de 0 a 10.

3.1.5. Análise de multicritérios

Aplicação da média ponderada nas matrizes das variáveis, gerando a matriz contendo as informações sintetizadas sobre o atrito. É uma

superfície potencial do atrito.

3.1.6. Cotejo com a realidade existente - calibração do sistema

A partir do nosso conhecimento sobre a área verificamos a sustentabilidade do resultado. Caso não o aprovássemos, retornaríamos à etapa de análise revendo variáveis, pesos e notas.

3.1.7. Aplicação do Polígono de Voronoi simples e complexo

O simples para elucidação de suas limitações. O complexo considerando como massa o número de vagas e depois incorporando a camada de atrito.

3.1.8. Construção de cenários (if-then)

Uma vez elaborado o estudo, é possível simular as conseqüências de instalação de uma nova escola em uma região pouco atendida, ou mesmo simular mudanças nas alocações de vagas.

4. Análise dos Resultados

O modelo de Voronoi foi aplicado no estudo de área de influência das escolas em Ouro Preto, cujo resultado foi comparado com a distribuição da população por faixa etária, para verificação da adequabilidade da distribuição geográfica e do número de vagas ofertadas nas escolas. O objetivo era verificar o grau de atendimento à população, sobretudo nos setores caracterizados por alta densidade populacional e alto índice de população em faixa etária escolar. O resultado pode dar apoio à decisão de novas localizações de futuras escolas ou na alocação de vagas.

O Voronoi simples realiza distribuição geométrica da área considerando a posição dos pontos, segundo procedimento descrito na figura 4. O Voronoi composto por massa e por massa e atrito apresenta como resultado superfícies recortadas resultantes da influência de umas escolas sobre as outras. Assim, quando uma escola apresenta uma superfície de influência muito recortada, isso significa que, apesar de sua posição e seu número de vagas, outras escolas, de acordo também com suas posições e número de vagas, "venceram" na disputa por área de influência.

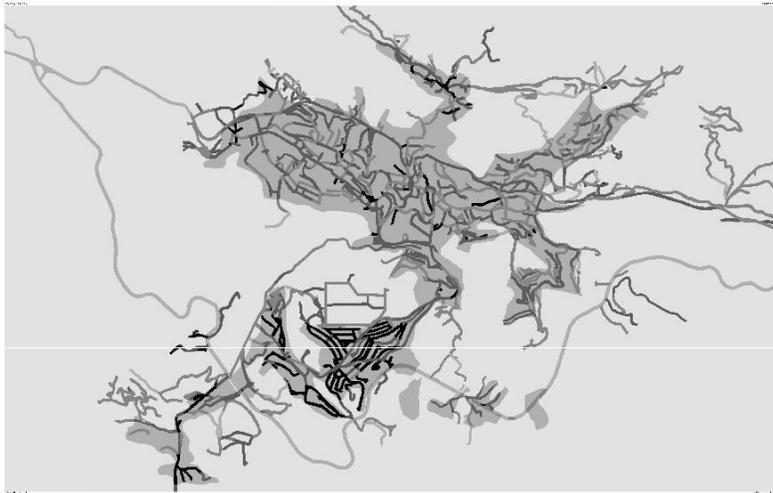
É necessário destacar que quando uma escola apresenta área de influência muito grande, isso não significa, necessariamente, que ela

apresente um serviço tão bem colocado e de grande alcance, mas sim que não há outras escolas que provoquem a subdivisão da área de influência. No caso em estudo, superfícies caracterizadas por grandes manchas são fatores negativos, pois deveriam existir outras escolas na região, para que a demanda fosse dividida e atendida por um maior número de estabelecimentos. Por outro lado, quando há escolas que apresentam áreas de influência reduzidas e se encontram em regiões com alta concentração de escolares, é o caso de simular a ampliação de vagas (no modelo fator de massa) e verificar o efeito da decisão.

Inicialmente, cabe apresentar o mapa de atrito ambiental que é produto do modelo de análise de multicritérios na combinação das variáveis declividades das vias, pavimentação das vias, tipo de via e uso do solo urbano. O mapa resulta na classificação do grau de atrito ambiental, de 0 a 10.

Com o objetivo de facilitar a compreensão e transformar os valores numéricos em resultado qualitativo, a legenda foi agrupada em 5 classes: alto, médio a alto, médio, médio a baixo e baixo índice de atrito ambiental. Na figura 5 é apresentado este mapa de interpretação qualitativa, sendo as cores claras as áreas de maior atrito e as cores mais escuras as de menor atrito.

FIGURA 5



Nota: Mapa de atrito ambiental, com valores em classificação qualitativa.

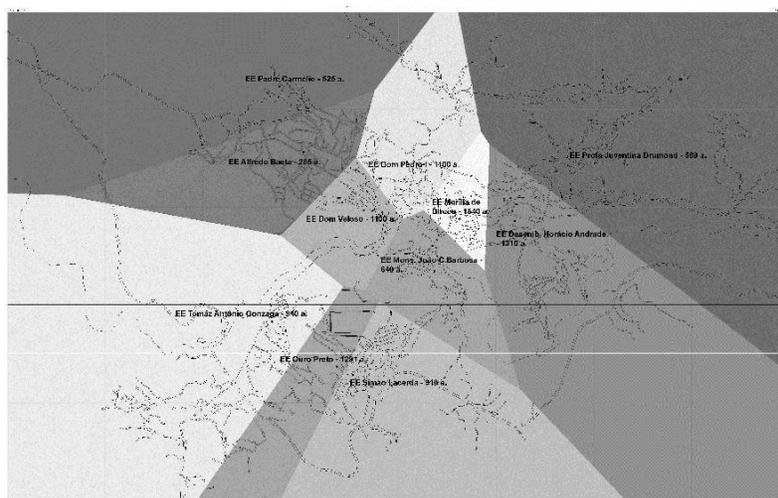
É mais fácil fazer a interpretação deste mapa. Observa-se que as áreas desocupadas, de meio de quadra ou as vias arteriais são as de maior atrito, justamente pelas dificuldades de deslocamento ou cruzamentos. As linhas de médio atrito são na maioria em vias locais, de fácil cruzamento, mas apresentam restrições quanto à pavimentação e/ou declividade. As vias locais que não apresentam problemas de declividade ou pavimentação não apresentam atrito (atrito médio a abaixo ou baixo). A região de menor atrito é um núcleo ao sul do mapa, no bairro de Bauxita, onde a declividade é baixa, vias asfaltadas e ruas locais de fácil deslocamento.

O programa de geoprocessamento escolhido tanto para a elaboração da análise de multicritérios como para o Polígono de Voronoi foi o SAGA – Sistema de Análise Geo-Ambiental, desenvolvido pelo Prof. Jorge Xavier, do Lageop – UFRJ. O motivo da escolha foi relacionado ao caráter didático de seus aplicativos, que facilitam a compreensão da lógica metodológica.

Com o objetivo de promover a interpretação das variações e potencialidade do Polígono de Voronoi, inicialmente foi elaborado o mapa de Voronoi Simples, que faz apenas a divisão geométrica do espaço

entre os pontos componentes do arranjo, sendo o resultado determinado pelo fator de localização (Figura 6). Observa-se que a escola que apresenta o maior número de vagas (1540 vagas) e que está mais centralmente localizada é a que apresenta menor área de influência. Por outro lado, escolas com menor número de vagas e localizadas mais periféricas têm suas manchas ampliadas. A redução da mancha se explica pelo fato de existirem outras escolas nas suas imediações, o que provoca uma “concorrência” espacial e a sua área de influência é reduzida. O mesmo motivo explica o fato das 3 escolas na região mais a sul concorrerem pelo espaço e escola que se encontra no meio entre as 3 ter sua influência reduzida pelas vizinhas.

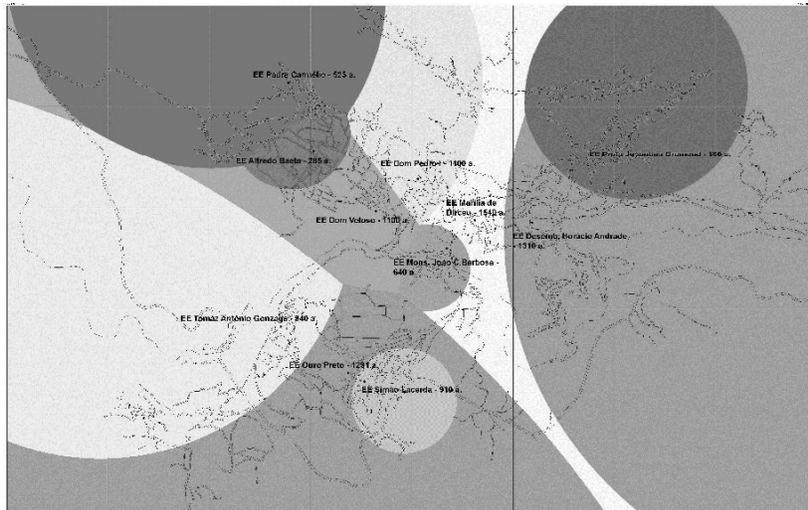
FIGURA 6



Nota: Voronoi Simplex – divisão geométrica da área de influência das escolas

O segundo mapa elaborado com o modelo foi resultado do Voronoi Complexo, incorporando o fator de massa, representada no modelo pelo número de vagas em cada escola (Figura 7). O resultado demonstra que escolas com o número de vagas semelhante, mas colocadas da rede de distribuição espacial de modo diferenciado têm suas áreas de influência ampliadas ou reduzidas. Por outro lado, escolas como a da mancha central, por exemplo, que têm muita concorrência espacial, mas o fator de massa é forte, têm a área de influência ampliada.

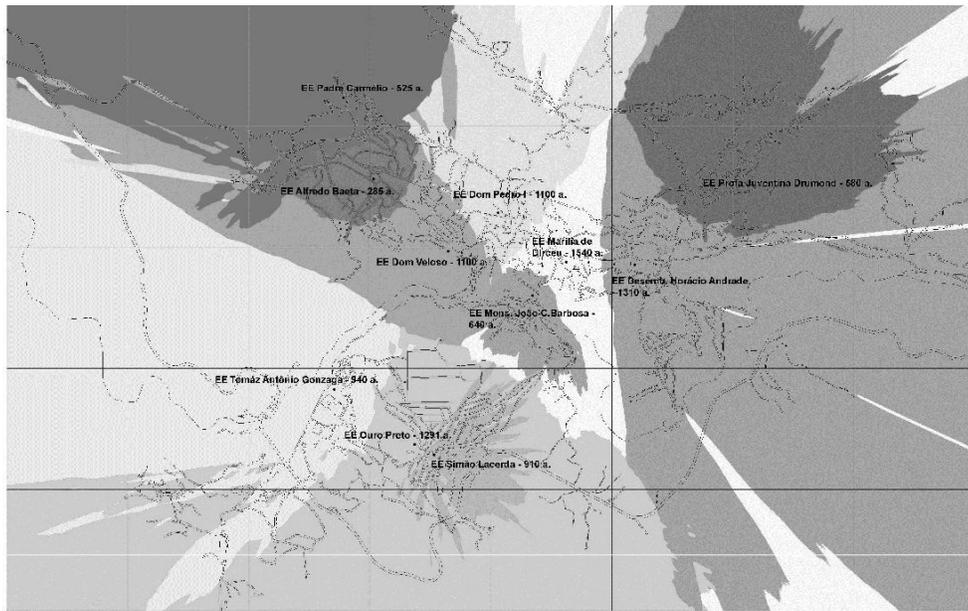
FIGURA 7



Nota: Voronoi Complexo, considerando o fator de massa em cada ponto, representada pelo número de vagas em cada escola.

Finalmente, é mapeada a área de influência de escolas cm o Polígono de Voronoi Complexo, utilizando tanto o fator de massa (número de vagas em cada escola) como a superfície de atrito (resultante da análise de multicritérios que combinou declividade nas vias, pavimentação, tipo de via e uso do solo) (Figura 8). As manchas se ampliam ou reduzem, em comparação com o mapa anterior, em função das dificuldades de acesso a determinadas porções o território. Observando, por exemplo, a mancha central, ela teve parte de sua área no norte tomada pela mancha à sua esquerda, que não encontro obstáculos em sua ampliação, mas também apareceu em regiões onde eram de domínio das escolas da esquerda, por serem de difícil acesso e então a massa de maior influência fez a diferença.

FIGURA 8



Nota: Voronoi Complexo, considerando o fator de massa em cada ponto, representada pelo número de vagas em cada escola e o atrito ambiental, representado pela dificuldade de acesso.

5. Conclusões

O objetivo do presente artigo era o de apresentar discussões sobre as possibilidades de aplicação da análise de multicritérios e dos polígonos de Voronoi nos estudos urbanos.

A análise de multicritérios tem sido muito empregada em estudos que exigem a combinação de complexa gama de variáveis para a geração de ma superfície potencial. Em eventos científicos de apresentação de estudos de caso de análise espacial apoiados por geoprocessamento ele é modelo mais aplicado. Não obstante sua difusão, questiona-se a correta aplicação de seus procedimentos metodológicos, sobretudo no que diz respeito à escolha da base de dados que será combinada (escala das fontes dos mapas e resolução espacial para as matrizes) e à definição de pesos e notas para a estruturação da álgebra de mapas. Temos visto, infelizmente,

mapas que denominamos, com a liberdade da palavra, “mapas de liquidificador”, pois são produtos de combinação de camadas sem os cuidados necessários expostos no presente artigo. Assim, uma das expectativas desta reflexão é suscitar a discussão sobre os cuidados metodológicos na aplicação do recurso.

Uma vez realizados os necessários cuidados de correta aplicação do modelo da Análise de Multicritérios, o procedimento é eficaz instrumento de apoio à decisão, pois é uma maneira de codificar e quantificar o procedimento decisório de síntese de opiniões, de caráter qualitativo. Outra questão importante é que o modelo é facilmente compreensível por quem participa de sua estruturação, de modo a facilitar calibrações e validações dos resultados. A sua lógica é de fácil compreensão e aplicação, e ele permite a consideração da opinião dos especialistas, através de consultas pelo método Delphi, o que resulta na maximização de consenso sobre as ponderações em uma tomada de decisão.

Outro aspecto interesse do modelo é que ele pode produzir diferentes cenários a partir de diferentes objetivos. Por exemplo, no estudo de caso do presente trabalho, ele forneceu a combinação de variáveis para a composição do atrito ambiental, ou seja: as dificuldades de deslocamento espacial. Contudo, ele poderia ter sido utilizado para compor as áreas prioritárias de instalação de novas escolas, segundo a síntese de variáveis sócio-econômicas, assim como a síntese de áreas mais favoráveis para a instalação de novas escolas, levando em consideração a existência de infra-estrutura instalada. Enfim: diferentes cenários, segundo diferentes objetivos, e segundo diferentes olhares conformados por diferentes atores da sociedade.

O modelo de Polígono de Voronoi, por sua vez, não se limita à simplificação reducionista de uma divisão geométrica de território, mas pode acompanhar a complexidade inerente à realidade espacial através de suas variações compostas pelos fatores de massa e atrito. Tanto os fatores de massa com de atrito podem ter a sua complexidade ampliada, sendo representados por índices que sejam as combinações de outras variáveis, buscando assim visão menos reducionista da realidade.

O caráter didático do procedimento metodológico permite que um pesquisador construa a sua compreensão através da interpretação de cada etapa de mapeamento. Com isto, aplica-se uma visão heurística para a investigação, ou seja, um método intuitivo de tentativas para abordar um problema e chegar a uma solução final mediante aproximações

sucessivas.

A heurística é uma forma de contemplar a visão qualitativa na combinação de variáveis que respondem por um determinado fenômeno, uma vez que ela permite que diferentes profissionais opinem sobre uma situação ambiental e ajustem suas opiniões a partir da compreensão do grau de pertinência de cada componente ambiental de acordo com o contexto onde ele está inserido. Assim como do grau de pertinência de suas observações frente ao pensamento do grupo de outros especialistas.

Trata-se de mais uma tentativa de trazer para a lógica da informática e, sobretudo, do geoprocessamento, uma forma de reproduzir no universo controlado e reducionista de um modelo, situações mais próximas da realidade.

Referências Bibliográficas

- Dauphiné, A. 1995, "Chaos, fractales et dynamiques en géographie." *Montpellier*, GIP Reclus.
- Hägerstrand, T. "The domain of human geography." In: Chorley, R J. *Directions in Geography*. London: Methuen, 1973, p.65-87.
- Joerges, B. "Large technical systems: concepts and issues." 1988, In: Maynz, R. *The development of large technical systems*. Frankfurt: Campus Verlag.
- Kubler, G. 1973, "Formes du temps, remarques sur l'histoire des choses." Paris: Champ Libre.
- Marino, TB, Xavier-da-Silva, J. 2005, "Vista saga 2005 – Sistema de análise geoambiental." Monografia (Graduação). Rio de Janeiro: Lageop.
- Moura, ACM. 2003, *Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano*. Belo Horizonte: Ed. da Autora.
- Moura, ACM. 2007, "Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise Multicritérios." *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis: Brasil, 21-26 abril, INPE, p. 2899-2906.
- Moura, ACM. 2007, "Geoprocessamento no apoio a políticas do programa Vila Vila em Belo Horizonte-MG: Intervenções em assentamentos urbanos precários." *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia*. Rio de Janeiro: Brasil, 21-24 out, SBC, p. 1544-1553.
- Poincaré, H. 1908, "Science et méthode." Paris: Flammarion. 162 p.
Acesso em: 08 de fevereiro de 2010, disponível em:
<<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/philo/textesph/default.htm>>
- Santos, M. 1996, *A natureza do espaço*. São Paulo: Hucitec.

Santos, M. 1978, *Por uma nova geografia*. São Paulo: Hucitec.

Xavier-da-Silva, J. 1999, *SGL's: uma proposta metodológica*. Rio de Janeiro: Lageop. (Apostila do Curso de Especialização em Geoprocessamento, Mídia CD-ROM).

Xavier-da-Silva, J. 2001, *Geoprocessamento e análise ambiental*. Rio de Janeiro, p. 227.