

# FERRAMENTAS DE TOMADA DE DECISÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE DE RSU

Luciana Maria Gasparelo Spigolon, EESC/USP São Carlos, [luspigolon@usp.br](mailto:luspigolon@usp.br)

Ana Paula Larocca, EESCUSP São Carlos, [larocca.ana@usp.br](mailto:larocca.ana@usp.br)

Mariana Abrantes Giannotti, EPUSP, [mariana.giannotti@usp.br](mailto:mariana.giannotti@usp.br)

Mario Augusto Tavares Russo, ESTG/IPVC, [mariorussso@estg.ipvc.pt](mailto:mariorussso@estg.ipvc.pt)

## RESUMO

Este artigo apresenta o estado da arte das ferramentas de uso integrado de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Decisão Multicritério (MCDA) para o problema de seleção de áreas adequadas para o gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e; ferramentas de uso integrado de SIG e problemas de localização para minimizar a distância de transporte dos RSU. Os resultados apontam que a integração de MCDA, SIG e problemas de localização, combinam robusta metodologia de apoio à decisão com poderosos recursos de visualização, mapeamento e análises diversas, aplicáveis à otimização da rede de transporte de RSU.

Palavras-chave: *sistema de informação geográfica, análise de decisão multicritério, problemas de localização*

## ABSTRACT

*This paper presents the state - of - the - art tools for the integrated use of Geographic Information System (GIS) and Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for the problem of selection of suitable sites for the management of Municipal Solid Waste (MSW) and; tools for integrated use of GIS and localization problems to minimize the transport distance of MSW. The results show that the integration of MCDA, GIS and localization problems combine a robust decision support methodology with powerful visualization, mapping and analysis capabilities to optimize the MSW transport network.*

*Keywords: Geographic information system, multicriteria decision analysis, location problems*

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e os atuais padrões de consumo são uma das causas da crescente produção de resíduos no mundo. O aterro sanitário, na hierarquia da gestão integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), é a última opção, mas não a menos importante dentre as possibilidades de destinação final ambientalmente adequada, pois é a infraestrutura de tratamento e destino final que pode receber uma gama variada de RSU de forma ambientalmente segura.

A complexidade em selecionar áreas para a instalação de aterros sanitários é senso comum na literatura sobre o assunto. Russo (2003) enfatiza que a escolha de locais candidatos à implantação de sistemas de tratamento de RSU, em que se inclui o aterro sanitário, é o obstáculo mais difícil de ultrapassar no desenvolvimento dessas infraestruturas sanitárias. Um aspecto importante a considerar é a rejeição da comunidade na instalação de infraestruturas não desejadas, esse tipo de comportamento é conhecido mundialmente pela expressão Not In My Back Yard (NIMBY). Os trabalhos de viabilização exigem, assim, a compatibilização de vários fatores, buscando-se o equilíbrio entre aspectos sociais, ambientais e econômicos (VILHENA, 2010).

Nesse contexto, a aplicação de técnicas de geoprocessamento associadas a métodos análise multicritério para a seleção de áreas adequadas para a instalação de sistemas de tratamento e disposição final de RSU têm sido discutidas por diversos autores: Rahmat et al. (2017); Torabi-Kaveh (2016); Vesiljević et al. (2012); Gbanie et. al. (2012); Montaña et. al. (2012); Aragonés-Beltrán (2010); Delgado et al. (2008) e Kontos et al. (2005). As pesquisas, em sua maioria, enfatizam a capacidade de manuseio de dados espaciais em SIG's, sua eficácia de análise e rapidez de processamento, contextualizando-os nas questões que contemplam os desafios de conciliar o desenvolvimento econômico à conservação do meio ambiente.

Dessa forma, o objetivo geral desse artigo é apresentar o estado da arte das ferramentas de tomada de decisão para a otimização da rede de transporte de Resíduo Sólido Urbano (RSU). Os objetivos específicos são: identificar ferramentas de uso integrado de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Decisão Multicritério (MCDA) para o problema de seleção de áreas adequadas para a instalação de infraestruturas de tratamento de RSU e; ferramentas de uso integrado de SIG e problemas de localização para minimizar a distância de transporte de RSU.

## **2. FERRAMENTAS DE TOMADA DE DECISÃO PARA A GESTÃO DE RSU**

Este tópico apresenta as ferramentas de tomada de decisão para a Gestão de RSU e suas aplicações. A princípio é apresentado os principais conceitos sobre MCDA, em seguida, é apresentado o uso integrado de SIG e MCDA para o problema de gestão de RSU. E então, o uso de SIG com problemas de localização para o mesmo fim.

### **2.1 Análise de Decisão Multicritério (MCDA)**

A Análise de Decisão Multicritério (MCDA) é um conjunto de técnicas com o objetivo de proporcionar uma ordenação global de opções, desde a opção mais para a menos preferida. As opções podem ser diferentes na medida em que elas atingem vários objetivos, sendo que a melhor opção pode não ser aquela que atinge todos os objetivos (DODGSON et al, 2009).

Os métodos de apoio a decisão multicritério, objetivam auxiliar analistas e decisores em situações nas quais há a necessidade de identificar prioridades sob a ótica de múltiplos critérios, o que ocorre normalmente quando coexistem interesses em conflito (MELLO et al, 2003). Os autores definem ainda, alguns conceitos utilizados em MCDA: decisores: aqueles que fazem escolhas e assumem preferências, como uma entidade única, chamada também de agente ou tomador de decisão; analista: pessoa encarregada de interpretar e quantificar as opiniões dos decisores, estruturar o problema, elaborar o modelo matemático e apresentar os resultados para a decisão; modelo: conjunto de regras e operações matemáticas que permitem transformar as preferências e opiniões em resultado quantitativo; alternativas: ações globais que podem ser avaliadas isoladamente, e, critérios: ferramentas que permitem a comparação das ações em relação a pontos de vistas particulares.

Bana e Costa e Beinat (2010) tratam da estruturação da análise multicritério de problemas de decisão pública e afirmam que o processo de estruturação deve resultar uma base operacional bem definida para ajudar o tomador de decisão a identificar os pontos de vista fundamentais e a operacionalizar os critérios para avaliar os impactos das opções e comparar os seus prós e contras. A estruturação dos modelos está relacionada às atividades de definição do problema, estrutura do modelo e análise dos impactos, sendo que a definição do problema é o passo fundamental para o êxodo do modelo.

Para a avaliação do processo de MCDA é preciso definir se o método será utilizado em problemas multiobjetivos ou multiatributos. De acordo com Malczewski (2006), os problemas de decisão multiatributo possuem um número limitado (finito) de alternativas pré-determinado. O problema multiobjetivo é contínuo no sentido que a melhor solução pode ser encontrada dentre as soluções viáveis. Os problemas multiatributos e multiobjetivos são referidos como problemas de decisão discretos e contínuos, respectivamente.

Segundo o Dodgson et al. (2009) as técnicas de MCDA geralmente fornecem uma relação explícita com sistema de peso para diferentes critérios. O papel principal das técnicas é lidar com as

dificuldades que os humanos têm em tomar decisões que envolvem complexas e grandes quantidades de informações de forma consistente.

Ramos (2000) apresenta quatro métodos para a definição de pesos. Esses métodos são baseados no ordenamento de critérios; em escalas de pontos; distribuição de pontos; e comparação par a par. Os métodos baseados no ordenamento de critérios consistem no simples ordenamento dos critérios de acordo com a ordem de importância atribuída pelo tomador de decisão. Os métodos baseados em escalas de pontos atribuem pesos a critérios, a atribuição desses pesos é feita pela eleição de um número numa escala, após eleger os números para todos os critérios é possível fazer a normalização desses valores, o que resulta num conjunto de pesos. Nos métodos baseados na distribuição de pontos o tomador de decisão deve distribuir pelos diferentes critérios um conjunto de pontos, por exemplo, 100. Os quais devem ser distribuídos para cada critério, sendo que o critério de maior importância recebera a maior parcela do conjunto de 100 pontos e o de menor importância uma menor parcela. O método baseado na comparação de critérios par-a-par também é conhecido como o processo de tomada de decisão Analytic Hierarchy Process (AHP), baseia-se numa matriz quadrada  $n \times n$ , de comparação entre os  $n$  critérios, onde as linhas e as colunas correspondem aos critérios (na mesma ordem ao longo das linhas e ao longo das colunas), uma vez normalizados os scores dos critérios para um intervalo fixado estes já podem ser agregados de acordo com a regra de decisão.

As técnicas de análise de decisão multicritério, vêm sendo utilizadas por pesquisadores de diversas áreas de conhecimento e em diversos lugares do mundo. A escolha de um método em relação a outro varia bastante de acordo com os dados e informações disponíveis sobre determinado assunto e também com o problema a ser resolvido.

## **2.2 MCDA & SIG**

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um sistema computacional feito para armazenar e processar informação geográfica. São ferramentas que melhoram a eficiência e efetividade do tratamento da informação de aspectos e eventos geográficos, podem ser usados para diversas tarefas, como armazenar grandes quantidades de informação geográfica em bancos de dados, realizar operações analíticas e automatizar o processo de confecção de mapas (CÂMARA et al.; MONTEIRO, 2001; GALATI, 2006; LONGLEY et al, 2013). O presente tópico tem como finalidade apresentar o uso integrado de MCDA e SIG, portanto, conceitos mais detalhados do uso do SIG, pode ser encontrado na literatura referida acima.

A literatura mostra que diferentes métodos de MCDA integrados a SIG têm sido aplicados aos estudos de seleção de áreas adequadas para a localização de aterros sanitários de forma bastante expressiva. A Tabela 1 traz as referências consultadas e o método empregado, em seguida os trabalhos são brevemente descritos, ressaltando os diferentes métodos de MCDA.

Tabela 1 - Métodos de Análise de Decisão Multicritério

Métodos de MCDA	Referências
AHP	Sumathi et al. (2008)
	Sharifi et al. (2009)
	Guiqin et al. (2009)
	Sener et al. (2010)
	Vesillijeć et al. (2012)
	Kumar et al. (2013)
Lógica Booleana	Delgado et al. (2008)
	Nas et al. (2010)
AHP, SAW	Kontos et al. (2005)
	Eskandari et al. (2012)
	Rahmat et al. (2017)
Fuzzy	Chang et al. (2008)
	Torabi-Kaveh (2016)
AHP, WLC, OWA	Gbanie et al. (2012)
ANP, AHP	Aragonés-Beltrán et al. (2010)
AHP, OWA	Moeinaddini et al. (2010)
WLC, SCA, AHP	Gorsevski et al. (2012)
SAW	Yesilnacrar et al. (2012)

Sumathi et al. (2008) estudaram a implantação de um novo aterro sanitário, na região de Pondicherry no sul da China, usando MCDA e SIG. O método AHP foi empregado para indicar a importância relativa para cada variável. As ponderações de entrada para o método AHP foram feitas através do parecer de peritos da área e decisores políticos locais. Os autores destacaram a versatilidade do modelo, uma vez que o mesmo pode acomodar novas informações, a base de dados pode ser atualizada e o modelo ser empregado em estudos futuros.

Sharifi et al. (2009) empregaram o SIG para identificar potenciais áreas para localizar aterros de resíduos perigosos na província do Curdistão no Irã ocidental, a MCDA foi utilizada a fim de otimizar a ponderação das variáveis através do método AHP. O processo de tomada de decisão foi estruturado em duas fases de análise, começando com um estudo inicial seguido por uma avaliação detalhada de áreas adequadas candidatas através de uma abordagem MCDA guiada por um painel de especialistas no processo de seleção de áreas. Os autores enfatizaram a possibilidade de empregar um grande número de fatores através do uso integrado de MCDA e SIG.

Guiqin et al. (2009) calcularam o peso das variáveis usando AHP, através de um modelo de hierarquia para resolver o problema da seleção de áreas para aterro de resíduos sólidos em Beijing na China. As variáveis foram classificadas de 1 (mais baixa adequação) a 5 (mais alta adequação).

Os autores destacaram a importância de se considerar não apenas critérios ambientais, mas também critérios econômicos principalmente em países em desenvolvimento.

Sener et al. (2010) combinaram AHP com SIG para selecionar áreas adequadas para aterros sanitários na região de Konya, Turquia. Diversas variáveis foram analisadas tais como: geologia/hidrogeologia, uso do solo, inclinação, altura, aspecto e distância de assentamentos, águas superficiais, estradas e áreas protegidas (ecológica, científica ou histórica). Os autores concluíram que para estudos de seleção de áreas, o SIG é uma ferramenta muito poderosa que pode proporcionar uma rápida avaliação da área de estudo, através dessa ferramenta é possível gerenciar e analisar grandes volumes de dados espacialmente a partir de fontes variadas, além disso, tem a capacidade de manipular e simular as restrições econômicas, ambientais, sociais, técnicas e políticas necessárias. Por outro lado, o AHP é uma ferramenta robusta para a solução de problemas complicados que podem ter interações e correlações entre os vários objetivos; portanto, a integração de SIG e métodos AHP fornece um mecanismo para explorar problemas complexos e fornecer feedback imediato para os decisores.

Vasilijec et al. (2012) utilizaram SIG e AHP para a seleção de áreas adequadas para a implantação de aterros regionais na Servia, a qual possui uma estratégia de gerenciamento de resíduos para o período de 2010 a 2019 o que somado às diretrizes da União Europeia, resultam em rigorosas exigências na implantação de aterros. Dezesete fatores foram selecionados e divididos em fatores geo-natural, ambiental, social e econômico. Em seguida, esses fatores foram avaliados por experts de diferentes áreas, uma comparação par a par (AHP) foi utilizada para classificar os fatores de acordo com seu grau de adequabilidade, posteriormente o AHP foi aplicado novamente, resultando em layers espaciais com diferentes pesos, os quais foram combinados em um mapa de áreas adequadas. Esse mapa foi então sobreposto a um mapa de restrições, resultando em um mapa final de adequabilidade.

Kumar e Hassan (2013) utilizaram análise espacial juntamente com o método AHP para identificar um local adequado para aterro em uma região do Território da Capital Nacional de Deli na Índia. O estudo identificou seis locais potenciais, dos quais um foi proposto e recomendado como o local mais adequado. De acordo com os autores, SIG e AHP são ferramentas capazes de lidar com enorme quantidade de dados espaciais e não espaciais, pois são ferramentas muito importantes para o estudo de seleção de áreas. Tais estudos dependem de um conjunto de fatores sociais, econômicos e ambientais, ou seja, consiste na comparação de um número muito grande de indicadores.

Delgado et al. (2008) apresentaram três modelos de apoio à decisão espacial (lógica booleana, evidência binária e índice de sobreposição de mapas de múltiplas classes), o estudo é realizado na bacia do Lago Cuitzeo, no México, com o objetivo de identificar áreas que estejam em conformidade com as normas ambientais e que são acessíveis por no mínimo dois municípios. Os três modelos diferem em sua complexidade e restrições, segundo os autores o modelo de lógica booleana é mais fácil de aplicar e mais restritivo do que os outros modelos, porque se baseia na

avaliação de atributos individuais, por outro lado, os dados binários e os métodos de índice de sobreposição são relativamente mais complexos, porque requerem atributos de ponderação.

Nas et al. (2010) identificaram áreas candidatas para a implantação do aterro na cidade de Cumra, Condado de Konya, Turquia. Os locais foram determinados por meio da integração de SIG e lógica booleana. As metodologias utilizadas são normalmente baseadas na composição de análise de adequabilidade usando sobreposições de mapa e extensões para incluir análise estatística. Dentre os modelos de integração com SIG, o tipo mais simples e mais conhecido é baseado em operação booleana. Ela envolve a combinação lógica de mapas binários resultantes da aplicação de operadores condicionais. O resultado é um mapa binário indicando se o local é adequado ou não.

Kontos et al. (2005) propuseram um método que consiste no desenvolvimento de um banco de dados digital em SIG, determinação da avaliação dos critérios/subcritérios e formação da estrutura hierárquica do problema multicritério, implementação do AHP para calcular os pesos dos critérios/subcritérios de acordo com a relativa importância, implementação do Método Simple Additive Weighting (SAW) para estimar o índices de adequabilidade, e por fim, implementação de um processo de agrupamento espacial para revelar as áreas mais adequadas. A aplicação da metodologia se deu na ilha de Lemnos, ao Norte do Mar Egeu, Grécia. Os critérios de avaliação foram desenvolvidos de acordo com a legislação grega e da União Europeia, concluiu-se que a metodologia de tomada de decisão em plataforma SIG é flexível na medida em que a adaptação dos critérios para outras áreas é factível.

Para Eskandari et al. (2012) a tomada de decisão é construída com uma árvore de critérios de avaliação, na qual um algoritmo foi proposto para obter a árvore de decisão com restrições e variáveis. Um banco de dados em SIG foi desenvolvido com base nas variáveis indicadas e áreas buffers ou áreas de restrições foram construídas de acordo com modelo de lógica booleana na árvore de decisão. As ponderações dos critérios econômicos, socioculturais e ambientais foram realizadas por AHP. Após essa etapa, um valor índice composto para cada pixel foi calculado através da aplicação do SAW, que também foi utilizado para a análise de sensibilidade.

Rahmat et al. (2017) utilizaram o método de classificação para avaliar cada critério individualmente. Então, a importância relativa dos critérios entre si foi determinada pela AHP. O SAW foi aplicado para avaliar a adequação da terra.

Chang et al. (2008) combinaram SIG com Fuzzy Multicriteria Decision-Marking (FMCDM) para a implantação de aterro em uma região urbana de rápido crescimento no sul do Texas. Empregou-se uma análise de duas fases para formar um Sistema Espacial de Suporte à Decisão (SESD). A primeira fase usou mapas temáticos em SIG em conjunto com variáveis ambientais, biofísicas, ecológicas e socioeconômicas para eliminar as áreas inadequadas. Na segunda fase o método FMCDM foi utilizado para identificar as áreas mais adequadas usando informações fornecidas por experts regionais com referencia a 5 critérios de escolha.

Torabi-Kaveh (2016) apresentam um estudo que desenvolve um processo de MCDA, que combina a análise do SIG com um processo de hierarquia analítica difusa (FAHP), para determinar áreas adequadas para a construção de aterros no Iranshahr County, Irã. O SIG foi usado para calcular e classificar os critérios selecionados e o FAHP foi utilizado para avaliar os pesos dos critérios com base na sua eficácia na seleção de aterros potenciais. Finalmente, um mapa de adequação foi preparado por análises de sobreposição e áreas adequadas foram identificadas.

Gbanie et al. (2012) utilizaram SIG e MCDA para realizar a modelagem de localização de aterros no sul de Serra Leoa, onde existem muitos conflitos sobre a localização de aterros sanitários. O mapa de restrições foi desenvolvido utilizando lógica booleana, o mapa de fatores que descreve a variação da adequabilidade da área foi preparado e padronizado utilizando técnicas de lógica fuzzy, os fatores foram divididos em três mapas de critérios, que foram combinados para obter um índice de adequabilidade para a localização de aterros sanitários utilizando técnicas Weighted Linear Combination (WLC) e Ordered Weighted Averaging (OWA), cada um desses mapas foram rasterizados e posteriormente foram padronizados utilizando o módulo fuzzy do IDRISI. Os pesos para as variáveis consideradas na análise foram obtidos pelo emprego da AHP.

Aragonés-Beltrán et al. (2010) aplicaram o Analytic Network Process (ANP) para selecionar o melhor local para a construção de um aterro de RSU na área metropolitana de Valência –Espanha. As influências entre os elementos da rede foram identificadas e analisadas utilizando dois modelos ANP diferentes: um modelo de hierarquia (que considera o AHP como um caso particular da ANP) e um modelo baseado em rede, os resultados obtidos em cada modelo foram comparados e analisados.

Moeinaddini et al. (2010) avaliaram a adequação de locais para a implantação de aterro sanitário em Karaj, Irã. Usando o Método Weighted Linear Combination (WLC) e Spatial Cluster Analysis (SCA) foram identificados locais adequados para a destinação de resíduos sólidos urbanos para um período de 20 anos. O AHP foi utilizado para a identificação da alternativa preferida para a implantação do aterro. Destacou-se que as principais vantagens da AHP são: a relativa facilidade de lidar com múltiplos critérios, de fácil compreensão e tratamento eficaz dos dados qualitativos e quantitativos. Os autores recomendam que o WLC deve ser usado apenas para a identificação de alternativas e o AHP é usado para definição de prioridades. Sugere-se também, que o procedimento seja empregado para outras regiões semelhantes.

Gorsevski et al. (2012) apresentaram uma abordagem da análise multicritérios com base em SIG para avaliar a aptidão para a escolha do local do aterro na Região Polog, Macedônia. O quadro de decisão multicritério considera fatores ambientais e econômicos que são padronizados por funções de pertinência fuzzy e combinadas pela integração das técnicas AHP e OWA. O AHP foi utilizado para o levantamento de pesos de atributos, enquanto o OWA foi usado para gerar alternativas de decisão para tratar a incerteza associada com a interação entre os vários critérios.



Finalmente, Yesilnacrar et al. (2012) empregaram o método SAW a fim de utilizar a contribuição de especialistas para o problema da escolha do local para implantação de aterros em Urfa, sudeste da Turquia. Antes da aplicação do método SAW, as áreas restritas por regras, regulamentos e restrições físicas foram excluídas. De acordo com os autores, a eficiente análise dos dados através de MCDA junto com a facilidade em reprodutibilidade e velocidade de SIG superam os métodos convencionais.

Contudo, após a análise dos estudos previamente descritos e considerando os resultados positivos quanto ao emprego do método AHP, é possível afirmar que a integração de MCDA e SGI é um método robusto e versátil para o problema de seleção de áreas adequadas para a implantação de aterros sanitários ou qualquer outra infraestrutura de tratamento de RSU.

### **2.3 Problemas de Localização & SIG**

Os problemas de localização tratam essencialmente sobre as decisões relativas à quantidade e localização ideal de um ou mais pontos de distribuição de produtos e serviços, ou seja, localização de pontos de oferta, mediante a necessidade de suprir, da melhor forma possível, o atendimento a um conjunto de pontos de demanda, distribuídos em um espaço geográfico.

O problema de localização de instalações pode ser resolvido por modelagem matemática e/ou com o uso de SIG que integram alguns algoritmos. Segundo Lorena et al. (2001), Mapa et al. (2006) e Mapa e Lima (2012), o uso combinado desses métodos podem trazer grandes ganhos, uma vez que um modelo matemático pode trazer soluções ótimas de localização, porém pode passar a ser inviável nas resoluções de problemas de maior porte.

Murray (2010) apresentou os avanços na ciência de localização e a importante contribuição do SIG como uma ferramenta de análise integrada. O autor conclui que o SIG é importante para conhecer e sumarizar as relações espaciais, bem como oferecer o potencial de explorar esse conhecimento para estruturar soluções técnicas e novos modelos de localização.

Tendo em vista a dificuldade de determinar a solução ótima para problemas de localização, utilizaram-se heurísticas que permitiam obter soluções aproximadas num tempo computacionalmente aceitável. A vantagem de utilizar a tecnologia SIG estava em poder representar as soluções obtidas sobre a base cartográfica de uma determinada área, possibilitando visualizar os circuitos num ambiente próximo do real. (SANTOS e RODRIGUES, 2003).

Arakaki e Lorena (2006) abordaram a heurística de localização-alocação (HLA) que se baseia na formação de agrupamentos (clusters) e na possibilidade de melhorá-los em relação a algum objetivo.

Visto a posição de alguns autores em relação ao uso integrado de SIG e problemas de localização, são apresentados, a seguir, estudos sobre a localização de aterros sanitários a serem compartilhados por um conjunto de municípios.

Naruo (2003) considerou duas situações para o problema de localização de aterro sanitário. Essas situações referem-se à existência ou não, de Estações de Transferência (ET) no sistema e o número de aterro. Quando existe ET considera-se que o resíduo é consolidado e transportado de uma só vez em caminhões maiores até o aterro sanitário, independente da produção de resíduos do município. Já no caso de não existir a ET, municípios com grande produção de resíduos precisariam realizar maior número de viagens até o aterro sanitário uma vez que esse transporte seria feito pelos próprios caminhões da coleta. Neste caso, é viável que o aterro sanitário esteja próximo a esses municípios, sendo assim, os municípios com maior produção de RS receberiam um peso maior que os outros na análise de localização. O parâmetro quantidade de aterros foi utilizado para criar as situações diversas, que levou a identificação do número ideal de aterros, com ou sem ET. O software TransCAD® foi utilizado para realizar a localização dos aterros através da ferramenta “Facility Location”. O autor conclui que a utilização da ferramenta SIG-T TransCAD foi satisfatória, sendo uma ferramenta de apoio a decisão espacial útil no caso de analisar o sistema de destinação consorciada de RSU.

Dalmas (2008) utilizou uma análise de rede com ênfase às menores rotas com origem nas áreas centrais dos municípios e destino nas áreas classificadas como aptas para a disposição final. O trabalho foi realizado utilizando a ferramenta “Network” do software ArcMap (versão 9.2), módulo que permite fazer uma busca por determinadas áreas a partir de um local específico. A área de serviço engloba os vetores de uma malha viária na qual, a partir de diferentes intervalos de distância, cria-se um raio de busca polígono ao redor da origem. O objetivo era que as maiores áreas aptas fossem identificadas, pois essas teriam maior capacidade de receber os resíduos uma vez que o aterro sanitário seria destinado a receber RSU de dois ou mais municípios. A imagem resultante das áreas aptas foi vetorizada, resultando em diversos polígonos, que foram classificados de acordo com as suas áreas e convertidos em arquivos de pontos, que continham em suas tabelas de atributos as áreas de cada polígono. Baseando-se na média diária de produção de RSU por habitantes na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 11 e no cálculo de dimensionamento de um aterro, foram realizadas operações de análise de rede para quatro diferentes tamanho de aterros: até 10.000 habitantes - raio de busca de 10 km, até 30.000 habitantes - raio de busca de 15 km, até 50.000 habitantes - raio de busca de 25km, mais de 50.000 habitantes raio de busca de 50km. O autor conclui que as técnicas de geoprocessamento empregadas mostraram-se adequadas aos estudos de gestão de resíduos sólidos, pois agregaram diferentes fatores e pouparam custos nas etapas iniciais.

Hoang Son e Louati (2016) utilizaram um modelo de roteamento de veículo generalizado, incluindo várias estações de transferência, áreas de coleta e veículos não homogêneos em janelas de tempo para a coleta de RSU. Considerou-se viajar em rotas unidirecionais, o número de veículos por  $m^2$  e o tempo de espera no trânsito para a redução do tempo de operação. O modelo proposto poderia ser usado para cenários com estruturas de nós semelhantes e características dos veículos. Um estudo de caso na cidade de Danang, Vietnã, é dado para ilustrar a aplicabilidade do modelo. A

análise ambiental utilizando o método AHP foi feita para uma melhor investigação dos resultados, que enfatizou a aplicabilidade das medidas propostas para o gerenciamento de resíduos. Os resultados mostraram que o modelo reduz as distâncias de viagem totais e as horas de operação dos veículos em comparação com os de cenários práticos. São oferecidas rotas ótimas de veículos nas ruas em Danang.

Bosompem et al. (2016) utilizam estações de transferência de RSU. A área metropolitana de Kumasi, apesar de ter um aterro sanitário, é confrontada com o problema da coleta de resíduos dos centros de geração para o local de disposição final. Assim, foram utilizadas análises de decisão multicêntricas incorporadas em um SIG para determinar potenciais locais de estações de transferência de resíduos. O resultado estabeleceu 11 áreas localizadas em seis sub-centros diferentes.

### 3. CONSIDERAÇÕES

A tarefa de identificar áreas adequadas para a localização de aterros sanitários é um componente desafiador no processo global de gestão de RSU. Este problema ambiental tem atraído pesquisadores do mundo todo e fortalecendo o uso de ferramentas espaciais e técnicas de tomada de decisão. A integração de MCDA e SIG aqui apresentadas combinam metodologia de apoio à decisão com poderosos recursos de visualização, mapeamento e análises diversas. Os estudos de seleção de áreas adequadas para a localização de aterros sanitários se destacam, pois requerem uma avaliação no campo ambiental, social e econômico, buscando-se um equilíbrio entre esses fatores para se chegar a um consenso sobre o nível de adequação de uma determinada área.

Contudo, a complexidade do gerenciamento de RSU não está limitada apenas em encontrar o local mais adequado para a instalação de uma infraestrutura de tratamento e disposição final do RSU, mas também, inclui-se nesse problema, a questão dos custos de transporte do RSU. Assim, o uso integrado de SIG e problemas de localização são fundamentais para o completo entendimento do gerenciamento de RSU.

Os problemas de localização podem ser modelados através de modelos matemáticos e, com o uso de softwares, possuem potencial de incluir inúmeras variáveis e retornar soluções rápidas e precisas para os tomadores de decisões. Através do SIG é possível calcular *inputs* para os modelos, como por exemplo, as distâncias reais entre pares de locais, visualização espacial das ligações e inclusive heurísticas para modelagens dentro do SIG.

As políticas mundiais relacionadas ao gerenciamento de RSU preconizam os 3 Rs, reduzir, reutilizar e reciclar. Assim, a tendência é que uma quantidade menor de resíduos sejam direcionados à aterros sanitários, e, outras formas de tratamento dos resíduos sejam implantadas. Para tal, surge cada vez mais a necessidade de se estudar rotas tecnológicas para o tratamento e

disposição final dos RSU. O que inclui utilizar as ferramentas de MCDA e SIG para a localização de infraestruturas de transferências, tratamentos e disposição final alinhadas a problema de localização para que um conjunto de municípios possam se associar, para que assim, alcancem economia de escala para viabilizar o tratamento e a disposição final de seus resíduos. Contudo sugere-se para trabalhos futuros o uso integrado das ferramentas apresentadas nesse estudo para o estudo de rotas tecnológicas para o tratamento e disposição final de RSU.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGONÉS-BELTRÁN, P. et al. (2010) An Analytic Network Process approach for siting a municipal solid waste plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain). **Journal of Environmental Management**, 91, 1071–1086.

ARAKAKI, R. G. I.; LORENA, L. A. N. (2006) Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Produção**, 16, 319-328.

BANA e COSTA, C. A.; BAINAT E. (2010) **Estruturação de modelos de análise multicritério e problemas de decisão pública**. Centro de Estudos de Gestão, Portugal. Artigo de investigação, n. 3, ISSN 1645-2955. Disponível em: <[https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1010988/1/WP%20CEG-IST%2003\\_2010.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1010988/1/WP%20CEG-IST%2003_2010.pdf)>. Acesso em 20 de nov. de 2013.

BOSOMPEN, C. et al. (2016) Multi-criteria GIS-based siting of transfer station for municipal solid waste: The case of Kumasi Metropolitan Area, Ghana. **Waste Management & Research**, 34(10).

CÂMARA, G.; et al. (2001) **Introdução à ciência da geoinformação**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Downloads/publicacao%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/publicacao%20(2).pdf). Acesso em: 17 de out. 2012.

CHANG, N. et al. (2008) Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in fast-growing urban region. **Journal of Environmental Management**, 87.

DALMAS, F. B. (2008) **Geoprocessamento aplicado à gestão de resíduos sólidos na UGRHI-11 – Ribeira de Iguape e litoral sul**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DELGADO, O. B. et al. (2008) Analysis of land suitability for the siting of inter-municipal landfills in the Cuitzeo Lake Basin, Mexico. **Waste Management**, 28, 1137–114.

DODGSON, J. et al. (2009) Multi-criteria analysis: a manual. Department for Communities and Local Government: London,. ISBN 1409810232. Disponível em:<[http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria\\_Analysis.pdf](http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf)>. Acesso em 18 de dez. de 2013.

ESKANDARI et al. (2012) An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural área. **Waste Management**, 32, 1528-1538.

GALATI, S. (2006) **Geographic Information Systems Demystified**. Norwood, MA: Artech House, INC, 2006. 270 p. ISBN-10: 1-58053-533-x

GBANIE, S. P. et al. (2012) Modelling landfill location using Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): Case study Bo, Southern Sierra Leone. **Applied Geography**.

GORSEVSKI, P. V. et al. (2012) Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: A case study using ordered weighted average. **Waste Management**, 32, 187-296.

GUIQIN, W.; LI, Q.; GUOXUE, L. LIJUN, C. (2009) Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. **Journal of Environmental Management**, 90, 2414–2421.

Hoang Son, Le e Louati, A. (2016) Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time Windows. **Wast Management**, 52, 34-39.

KONTOS, T. D. et al. (2005). Siting MSW landfills with a spacial multiple criteria analysis methodology. **Waste Management**, 25, 818-832

KUMAR, S.; HASSAN, M. I. (2013) Selection of a landfill site for solid waste management: an application of AHP and spatial analyst tool. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 1-12.

LONGLEY, P.A. et al. (2013) **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p. ISBN 978-85-65837-69-9.

LORENA, L. A. N, et al. (2001) Integração de modelos de localização a sistemas de informação geográficas. **Gestão & Produção**, 8, 180-195.

MALCZEWSKI, J. (2006) GIS- BASED multicriteria decision analysis: A survey of literature. **International Journal of Geographical Information Science**, 20, 703-726

MAPA, S.M.S.; et al. (2006) **Localização de instalações com o auxílio de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e modelagem matemática**. XXVI ENEGEP – Fortaleza, CE, Brasil, 2006. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006\\_tr460314\\_8161.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_tr460314_8161.pdf). Acesso em: 08 de ago. De 2011.

MAPA, S.M.S.; LIMA, R.S. (2012) Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. **Gestão & Produção**, 19.

MELLO, J.C.C.B.S. et al.(2003) Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no projeto de aerodesign. **Engevista**, 5, 22 – 35.

MONTAÑO, M. et al. (2012) Integração de critérios técnicos, ambientais e sociais em estudos de alternativas locais para implantação de aterro sanitário. **Artigo Técnico. Engenharia Sanitária Ambiental**, 17, 61-70.

MURRAY, A.T. (2010) Advances in location modeling: GIS linkages and contributions. **Jornal of Geographical Systems**, 12, 335-354.

NARUO M.K. (2003) **O estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando sistema de informações geográficas**. 284 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com Ênfase em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NAS, B. et al. (2010) election of MSW landfill site for Konya, Turkey using GIS and multi-criteria evaluation. **Environmental Monitoring and Assessment**, 160, 491–500.

Rahmat et al. (2017) Landfill Site Selection using GIS and AHP: a Case Study: Behbahan, Iran. **Environmental Engineering**, 21(1), 111-118

RAMOS, R. A. R. (2000) **Localização Industrial – um modelo espacial para o noroeste de Portugal**. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2000. Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/DEC\_RuiRamos2000.pdf. Acesso em: 23 de Nov. de 2013.

RUSSO, M. A. T. (2003) **Tratamento de Resíduos Sólidos**. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://homepage.ufp.pt/madinis/RSol/Web/TARS.pdf>>. Acesso em 29 de nov. de 2013.

SANTOS, L. A; RODRIGUES, J. C. (2003) **Implementação em SIG de uma Heurística para o Estudo da Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos**. Relatórios de Investigação Nº 6, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra – Portugal, 24p.

ŞENER, Ş. et al. (2010) Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). **Waste Management**, 30, 2037-2046.

SHARIFI, M. et al. (2009) Integrating multi-criteria decision analysis for a GIS-based hazardous waste landfill siting in Kurdistan Province, western Iran. **Waste Management**, 29, 2740–2758

SUMATHI, V. R.; et al. (2013) GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. **Waste Management**, 28, 2146-2160.

Torabi-Kaveh, M. (2016) Landfill site selection using combination of GIS and fuzzy AHP, a case study: Iranshahr, Iran. **Waste Management & Research**, 34(5) 438–448.

VESILJEVIĆ, T.Z. et al. (2012) GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transition Countries: A Case Study From Serbia. **Environmental Management**, 49.

VILHENA, A. (Coord.) (2010) **Lixo municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) - Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE). 3. ed. São Paulo, ISBN 978-85-87345-02-8.

YESILNACARAR, M. I. et al. (2013) Municipal solid waste landfill site selection for the city of Sanliurfa-Turkey: an example using MCDA integrated with GIS. **International Journal of Digital Earth**, 5, 147-164,