

# Otimização locacional de portos secos para fomentar o desenvolvimento regional sustentável

*Dry port location optimization to foster sustainable regional development*

Marlon Fernandes de Souza<sup>a</sup>

Paulo H. Góes Pinto<sup>b</sup>

Raphael B. Alves Teixeira<sup>c</sup>

Carla de O. Leite Nascimento<sup>d</sup>

Rodrigo A. de Albuquerque Nóbrega<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, Brasil.  
End. Eletrônico: marlonfernandesdesouza@gmail.com

<sup>b</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil.  
End. Eletrônico: paulo-goes@ufmg.br

<sup>c</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil.  
End. Eletrônico: teixeiraraph@outlook.com

<sup>d</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil.  
End. Eletrônico: carla.olin@gmail.com

<sup>e</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Instituto de Geociências e Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil.  
End. Eletrônico: raanobrega@ufmg.br

doi:10.18472/SustDeb.v11n2.2020.27073

Received: 06/09/2019  
Accepted: 01/06/2020

ARTICLE - DOSSIER

## RESUMO

A saturação das zonas de influência portuária acentua impactos ambientais e conflitos socioespaciais, demandando alternativas logísticas. O porto seco possibilita a descentralização de atividades aduaneiras, de manuseio e armazenagem, mitigando parte dos problemas, além de estimular a economia na região onde é inserido. Dessa forma, a sua localização é crucial para a eficiência dos sistemas logísticos de importação e exportação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial dos portos secos em Minas Gerais e identificar os melhores locais para uma nova instalação. A metodologia agregou dois métodos reconhecidos de definição locacional: a Análise Multicritério Espacial e o Problema de Localização-Alocação. O primeiro, em consonância com as práticas mais atuais no planejamento de transporte, integrou critérios sociais,

ambientais e técnicos. O segundo, adotou o resultado da análise multicritério como demanda ponderada e aplicou uma meta heurística para solução do problema de otimização. Os resultados evidenciam a disparidade regional e a deficiência de infraestruturas logísticas no norte de Minas. Todos os cenários apontam a região de Montes Claros como candidata à instalação de um porto seco. A possibilidade de conciliar sociedade, ambiente e economia no planejamento de infraestrutura foi demonstrada.

**Palavras-chave:** AHP. Planejamento de Transportes. Desenvolvimento Regional Sustentável. Estação Aduaneira Interior. Localização-Alocação.

## ABSTRACT

*The saturation of hinterland accentuates adverse environmental impacts and socio-spatial conflicts, demanding logistical alternatives. As a solution, the dry port enables the decentralization of customs, handling, and storage operations, which mitigates part of the problems, in addition to stimulating the economy in the region where it operates. Thus, its location is crucial for the efficiency of import and export logistics systems. The aim of this paper was to evaluate the spatial distribution of dry ports in Minas Gerais and to identify the best locations for a new installation. The methodology put together two recognized methods for location definition: the Spatial Multicriteria Decision Analysis and the Location-Allocation Problem. The first, in line with the most current practices in transportation planning, integrated social, environmental and technical criteria. The second adopted the first's result as weighted demand and applied a metaheuristic to solve an optimization problem. Findings show the regional disparity and the deficiency of logistic infrastructures in the north of Minas Gerais. All scenarios point to the Montes Claros region as a candidate for the installation of a dry port. The possibility of reconciling society, environment and economy in infrastructure planning was demonstrated.*

**Keywords:** AHP. Transportation Planning. Sustainable Regional Development. Inland Port. Location-Allocation.

## 1 INTRODUÇÃO

A globalização gerou crescimento das operações comerciais em todo o mundo com o consequente aumento da movimentação de mercadorias e dos trâmites fiscais de exportação e importação, que têm saturado os portos e afetado os custos do importador/exportador (GERMANO; FREIRE JÚNIOR, 2017; NG; PADILHA; PALLIS, 2013). Além dos prejuízos econômicos e burocráticos, a saturação das zonas de influência portuária acentua os impactos ambientais adversos e os conflitos socioespaciais (AWAD-NÚÑEZ et al., 2016a).

A instalação ou expansão de um porto marítimo invariavelmente afetam o ambiente. Os danos ao ecossistema são amplificados, visto que a maioria dos portos estão localizados em estuários (DINWOODIE et al., 2012; GOULIELMOS, 2013). Jaffee (2015), Oliveira et al. (2013) e Sinay, Carvalho e Braga (2017) citam uma série de impactos sociais e ambientais relacionados à atividade portuária. Sinay, Carvalho e Braga (2017) ainda afirmam que as principais consequências da instalação e operação do porto são advindas das atividades realizadas no seu entorno. As diversas atividades desenvolvidas e a sobreposição das áreas de influência produzem efeitos cumulativos e sinérgicos (KOEHLER; ASMUS, 2010).

No Brasil, a situação é agravada devido ao grande crescimento das exportações experimentado nas últimas décadas, associado à falta de conservação da infraestrutura logística existente e ao baixo investimento em novas estruturas (CHINELATO; CRUZ; ZIVIANI, 2011; MEDEIROS, 2014; WANKE; HIJJAR, 2009). Entre 2010 e 2018, a movimentação portuária aumentou 33,2% (ANTAQ, 2018). A limitação de espaço para crescimento de pátios e armazéns ocorre em diversas zonas portuárias brasileiras, causando o aumento do trânsito de caminhões nas rodovias e filas de espera nas cidades portuárias (GERMANO; FREIRE JÚNIOR, 2017).

Nesse contexto, os portos secos (PS) se apresentam como alternativa, funcionando como facilitadores para armazenagem, desembarço aduaneiro, consolidação e manuseio da carga (AWAD-NÚÑEZ et al., 2016b; GERMANO; FREIRE JÚNIOR, 2017). Os Portos Secos podem ser definidos como terminais intermodais terrestres fortemente conectados aos portos marítimos por meio de serviços de transporte frequentes e

de alta capacidade (NGUYEN; NOTTEBOOM, 2016; ROSO; WOXENIUS; LUMSDEN, 2009). Os PS funcionam como extensões das zonas de influência portuária em terra (*hinterlands*) para facilitar a movimentação de cargas entre porto e interior, proporcionando maior agilidade (LOUREIRO; FREITAS; GONÇALVES, 2015).

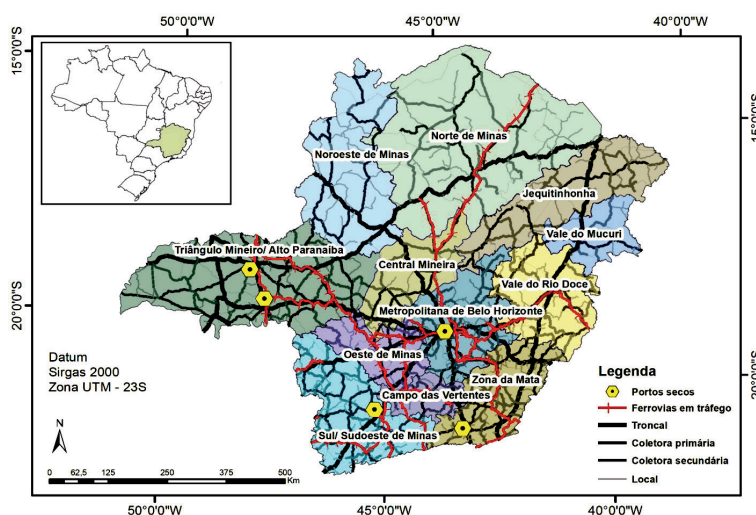
Entre suas principais vantagens, destaca-se a descentralização de parte das atividades portuárias, deixando-as mais próximas das regiões de captação ou de destino das cargas. Isso possibilita soluções logísticas aprimoradas e contribui para a geração de empregos e receita na região onde o PS é instalado. Outra vantagem é a possibilidade de liberar importações e exportações ao longo do tempo, distribuindo as despesas alfandegárias uniformemente durante o exercício financeiro em vez de um único grande pagamento. Roso, Woxenius e Lumsden (2009) destacam ainda a mudança do transporte rodoviário para um modal mais eficiente e menos prejudicial ao meio ambiente.

O objetivo deste artigo foi avaliar a distribuição espacial dos portos secos em Minas Gerais e identificar os melhores locais para uma nova instalação. A avaliação e a proposta foram subsidiadas por uma metodologia que integrou dois métodos bastante empregados na definição locacional: a Análise Multicritério Espacial – AMCE (LIGMANN-ZIELINSKA; JANKOWSKI, 2014; RAHMAN et al., 2013; SADASIVUNI et al., 2009) e o Problema de Localização-Alocação – PLA (HILLSMAN, 1984; LORENA et al., 2001; MAPA; LIMA, 2012). O primeiro caracteriza-se como solução integradora de objetivos distintos, muitas vezes conflitantes (SAATY, 2008). O segundo trata-se de uma aplicação do problema de p-mediana, sendo amplamente empregado na localização de instalações logísticas (LORENA et al., 2001).

O estudo foi realizado em Minas Gerais por ser um estado sem acesso a portos marítimos, mas com grande importância logística e econômica no comércio exterior brasileiro. Condição interessante para a viabilidade de um PS distante, onde a distância e o tamanho do fluxo de mercadorias tornam a ferrovia viável sob uma perspectiva estrita de custos (ROSO; WOXENIUS; LUMSDEN, 2009). Ainda, devido às desigualdades inter-regionais do estado, o conceito de Desenvolvimento Econômico e Social Sustentável (DESS), apresentado no Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado (MINAS GERAIS, 2015), foi considerado, implicando na adoção não só de aspectos logísticos e econômicos, mas também sociais e ambientais.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS

Minas Gerais possui alta heterogeneidade biofísica, socioeconômica e cultural, que se reflete na distribuição espacialmente desigual de equipamentos públicos e infraestrutura de transporte. Na Figura 1 é ilustrada a área de estudo, com suas mesorregiões, ferrovias em tráfego, principais rodovias (federais e estaduais) e a localização dos PS existentes.



**Figura 1 |** Mesorregiões de Minas Gerais com os portos secos, ferrovias em tráfego e as principais rodovias existentes em 2016 segundo o IBGE.

Fonte: Elaborada pelos autores com dados do IBGE (2018) e BRASIL (2014).

A escolha do local para instalação do PS considerou cinco macrocritérios (ambiental, competição, econômico, logístico e social). Quatro desses critérios com subcritérios (Tabela 1). A seleção dos critérios foi baseada na literatura sobre localização de instalações logísticas, como Barboza e Vieira (2014); Bolturk et al. (2016); Ka (2011); Loureiro, Freitas e Gonçalves (2015); Nguyen e Notteboom (2016); Roso, Woxenius e Lumsden (2009) e Sopha et al. (2016). Outros critérios, referentes a aspectos legais, estabilidade e ambiente político, custos de construção e questões técnicas de engenharia também são encontrados (BOLTURK et al., 2016; ROSO; WOXENIUS; LUMSDEN, 2009). Entretanto, esses aspectos não foram considerados, uma vez que não se relacionam a questões espaciais e, portanto, extrapolam o objetivo do trabalho.

No que diz respeito à acessibilidade logística, a malha rodoviária mineira é a mais extensa do Brasil. Apesar da distribuição desigual, mais de 50% das rodovias da Região Sudeste do Brasil estão em Minas Gerais (CNT, 2018). Já a malha ferroviária é a segunda maior do Brasil em extensão, representando aproximadamente 17% da rede ferroviária (MINAS GERAIS, 2015).

**Tabela 1 | Critérios selecionados com fonte, data e método para espacialização dos dados.**

<i>Grupo</i>	<i>Variável</i>	<i>Fonte</i>	<i>Data</i>	<i>Formato dado</i>	<i>Método</i>
Econômico	Valor FOB exp	MDIC	2015	Tabular	Interpolação (IDW)
	Valor FOB imp	MDIC	2015	Tabular	Interpolação (IDW)
	nº postos de trabalho	RAIS	2010	Tabular	Interpolação (IDW)
	PIB	FGV	2015	Tabular	Interpolação (IDW)
Competição	Distância PS existente	PNLT 2010	2010	Vetor - Ponto	Distância Euclidiana
Acessibilidade	Dist. Rod. Troncal	DEER/Setop	2015	Vetor - Linha	Dist. Euclidiana
	Dist. Rod. Principal	DEER/Setop	2015	Vetor - Linha	Dist. Euclidiana
	Distância ferrovias	PNLT 2010	2010	Vetor - Linha	Dist. Euclidiana
Social	nº de não ocupados	IBGE	2010	Tabular	Interpolação (IDW)
	Índice Social	Atlas Brasil	2010	Tabular	Interpolação (IDW)
Ambiental	Dist. área urbana*	Embrapa Territorial	2015	Vector - Polígono	Dist. Euclidiana
	Dist. Hidrografia**	IBGE	2015	Vector - Linha	Dist. Euclidiana
	Dist. Ucs***	ICMBio/Semad	2015	Vector - Polígono	Dist. Euclidiana

\*Influência limitada a 5 km da área urbanizada.

\*\*Apesar da Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que instituiu o novo Código Florestal (BRASIL, 2012) determinar que a maior Área de Proteção Permanente (APP) de mata ciliar é de 500 m, foi definida uma oneração gradual decrescente para áreas até 1000 m de cursos de água, a fim de se evitar a proposição de empreendimentos em áreas que possam impactar os recursos hídricos.

\*\*\*Apesar de o Conama ter revogado em 2010 a Resolução Conama 13/1990 (BRASIL, 1990) que determinava a zona de amortecimento das UCs sem plano de manejo em 10 mil metros, e determinado o novo valor de 3.000 metros, o estudo adotou um buffer de 10.000 m considerando a importância dessas zonas para o ecossistema das UCs.

*Fonte: Dados primários da pesquisa com a respectiva fonte citada na tabela.*

A mineração representa uma fatia significativa da receita de exportação do estado, com uma logística dedicada e eficiente. Entretanto, a pauta de exportações possui outras atividades relevantes que direta ou indiretamente podem ser beneficiadas com PS estrategicamente localizados. Os principais produtos exportados são: minério de ferro e seus concentrados (29%), café cru e em grãos (12%), soja em grãos ou triturada (8,5%) e ferroligas (8,0%) (BRASIL, 2018). A importação é mais fracionada, com destaque para adubos ou fertilizantes químicos (8,9%), carvão (7,7%), compostos químicos (4,6%) e demais produtos da indústria de transformação (4,3%) (BRASIL, 2018). Para medir exportação e importação, foi considerado o valor livre e desembaraçado sobre o navio, em inglês *Free On Board* (FOB), dos municípios mineiros no ano de 2015, conforme disponível no site do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC).

A atividade econômica foi representada pelo PIB e pelos postos de trabalho relativos aos segmentos de extrativismo mineral, indústria de transformação, agropecuária e serviços industriais de utilidade pública, constantes da Relação Anual de Informações Sociais (Rais).

Quanto às características ambientais, as áreas preservadas, em 2010, correspondiam a apenas 6,4% do território do estado. A Mata Atlântica correspondia originalmente a 46% do território total e hoje representa apenas 5,3% (MINAS GERAIS, 2015). Portanto, ressalta-se a necessidade de que os investimentos em infraestrutura não acentuem os impactos ambientais e nem coloquem em risco as áreas preservadas, já tão escassas.

No tocante às características sociais, os municípios do norte apresentam os piores índices, com renda *per capita* inferior à média do estado e baixo Índice de Desenvolvimento Humano – IDH (MINAS GERAIS, 2015). As mesorregiões Noroeste, Norte, Jequitinhonha e Mucuri, embora abriguem 15,6% da população, representam apenas 7,4% do PIB (IBGE, 2010). O indicador de não ocupados foi obtido a partir da Tabela 3580 no Sistema do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de Recuperação Automática (Sidra) com base nos dados do Censo de 2010 (IBGE, 2010). O Índice Social (IS) foi proposto para ponderar, além da demanda por serviços portuários, também o potencial de impacto socioeconômico regional do PS. O IS é proporcional à população e inversamente proporcional ao quadrado do IDH conforme mostra a Equação 1.

$$IS = \frac{Pop}{IDH^2} \quad (1)$$

Em que: **IDH**: Índice de Desenvolvimento Humano (Atlas Brasil/Censo de 2010)

**Pop**: População obtida também no Atlas Brasil

Os critérios possuem diferentes unidades de medida, portanto foram normalizados para possibilitar a comparação e integração. A faixa de variação dos valores foi de 0 a 10. Zero (0) representa ausência de influência da variável, um (1) representa o menor custo e 10 o maior. Quanto menor o valor, maior a atratividade de instalação de PS.

Os subcritérios foram referenciados no espaço utilizando a metodologia indicada na Tabela 1. Por se tratarem de análises espaciais, e devido à dimensão geográfica da área de estudo, para minimizar distorções cartográficas em medidas de distâncias foi adotado o sistema de coordenadas em projeção cônica equidistante (MITCHEL, 2005; SNYDER, 1987).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia integrou de forma sequencial dois métodos reconhecidos de definição locacional em um único modelo. Dessa forma, o inverso do índice produzido na AMCE foi utilizado como demanda ponderada no PLA, conforme descrito na Figura 2. A adoção de cenários propiciou a avaliação da localização dos PS existentes e também o impacto da priorização socioambiental na escolha da localização de uma nova instalação.

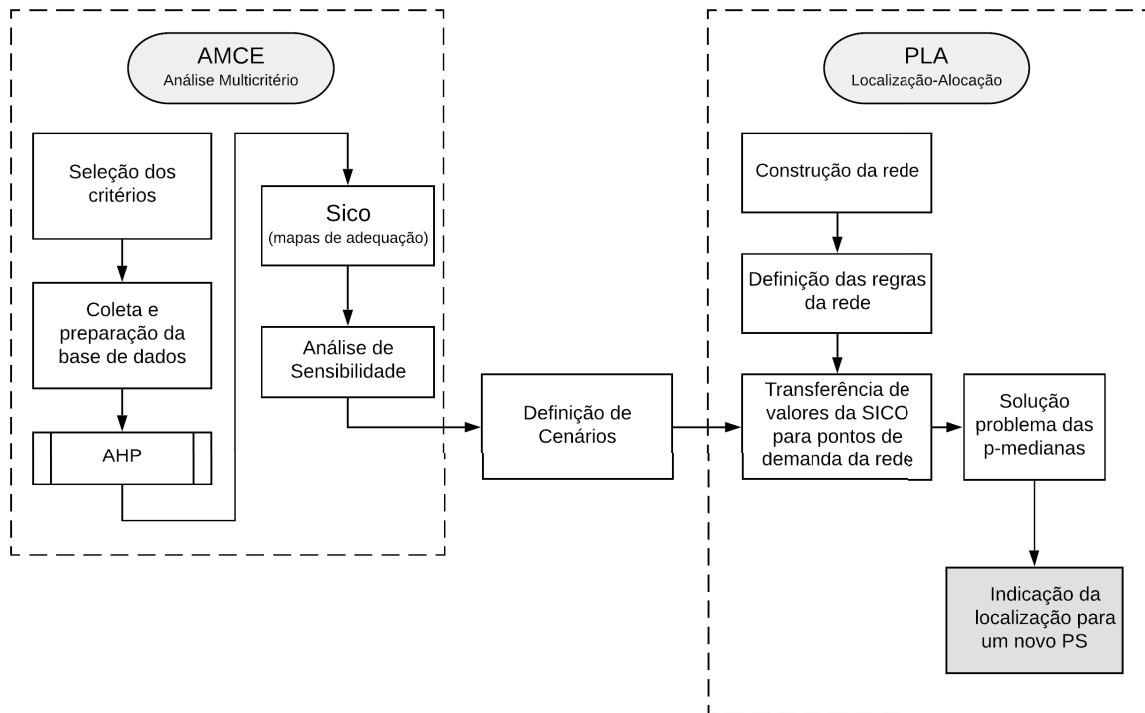


Figura 2 | Fluxograma dos procedimentos metodológicos desenvolvidos.

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3.1 ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL (AMCE)

A determinação da hierarquia e os pesos dos critérios foram atribuídos seguindo-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (SAATY, 1977, 2008). A pesquisa contou com a participação de dez especialistas da área de logística na avaliação par a par dos critérios. Os cálculos foram realizados utilizando a planilha desenvolvida por Goepel (2013). O valor do peso de cada critério ( $w_i$ ) foi definido tomando o autovetor correspondente ao maior autovalor ( $\lambda$ ) da matriz de comparação pareada (CHEN; YU; KHAN, 2010; SAATY, 1977). A hierarquia dos critérios adotados na formulação do modelo é ilustrada na Figura 3.

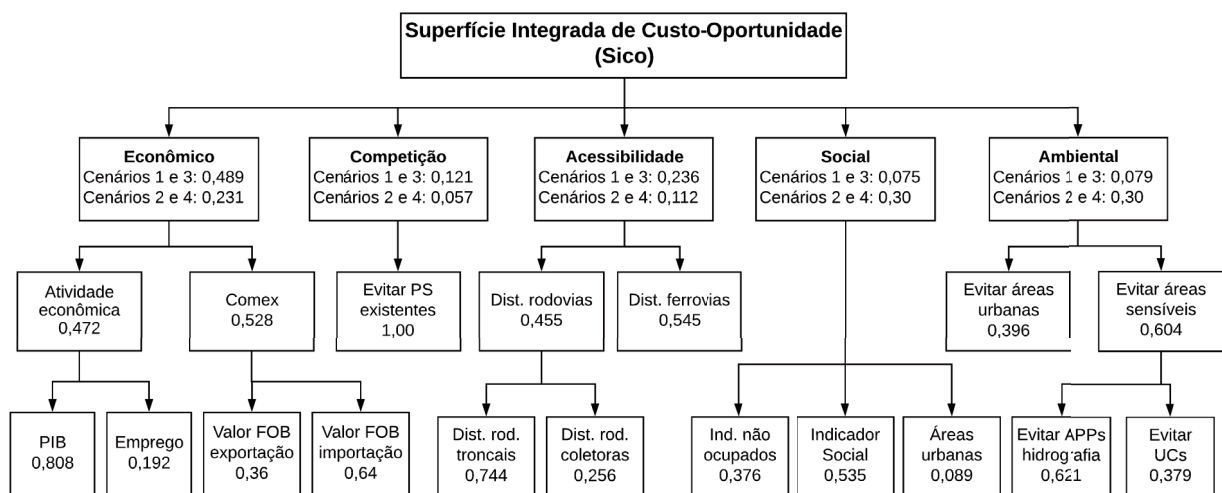


Figura 3 | Hierarquia dos critérios selecionados e seus respectivos pesos.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A consistência da matriz normalizada foi medida por meio da taxa de consistência (CR), do consenso entre os especialistas (EC) e do índice de consistência geométrica (GCI), proposto por Crawford e

Williams (1985). Para a CR, foi adotado o valor limite de 0,10, usado em várias aplicações do AHP (APOSTOLOU; HASSELL, 1993; CHEN; YU; KHAN, 2010). Para maior detalhamento do AHP, sugere-se a leitura de Chen, Yu e Khan (2010) e Saaty (1977, 2008), e sua aplicação em análise espacial em Sadasivuni et al. (2009).

A AMCE foi referenciada no espaço para possibilitar análises espaciais e melhor visualização. Duas Superfícies Integradas de Custo-Oportunidade (Sico) foram geradas. Sico **A** com pesos dos critérios determinados pelo AHP e Sico **B** com favorecimento socioambiental. Maior detalhamento sobre a Sico **B** é apresentado na seção 3.3 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS. A análise foi desenvolvida em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os municípios foram classificados com intuito de apresentar as melhores alternativas para localização de um novo PS.

Cada Sico representa a soma ponderada dos critérios (Equação 2). Seguindo a hierarquia estabelecida no AHP, cálculo semelhante à Sico foi empregado a cada critério para cômputo dos subcritérios. Exceção do critério ambiental, construído por sobreposição condicionada. As zonas de amortecimento, áreas urbanas e APPs são áreas que devem ser mandatoriamente evitadas para esse tipo de empreendimento, portanto não deve haver ponderação entre esses subcritérios no cálculo do critério ambiental.

$$Sico(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^n P_n \times C_n(x_i, y_i) \quad (2)$$

Em que: Sico  $(x_i, y_i)$  = Valor da Superfície Integrada de Custo-Oportunidade no ponto  $i$  de coordenada  $(x_i, y_i)$ .

$P_n$  = Peso do critério  $n$ , conforme determinado no AHP.

$C_n(x_i, y_i)$  = Valor do critério  $n$  no ponto de coordenada  $(x_i, y_i)$ .

A Análise de Sensibilidade (AS) da AMCE foi realizada para os critérios social e ambiental utilizando-se o método de variação de um critério de cada vez (*One-Fator-At-A-Time*, OAT) (CHEN; YU; KHAN, 2013; DANIEL, 1958). A intenção foi avaliar a força desses critérios e o possível impacto da priorização socioambiental. O peso de cada critério variou de 0 a 100% com incrementos de 10%, enquanto os demais critérios tinham a proporção do seu peso mantida.

### 3.2 PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO (PLA)

Assim como a etapa anterior (AMCE), o PLA também foi desenvolvido em uma plataforma SIG. O problema foi construído em uma rede com a conectividade definida em dois grupos: rodovias e ferrovias. A topologia da rede foi corrigida e validada. Foram especificadas cinco regras para a rede. Duas de custo, o comprimento do trecho e o tipo da via. Uma de hierarquia de acordo com a classe de função da via (ferrovia: 1; rodovias troncais e coletoras primárias: 2; coletoras secundárias: 3; vias locais: 4). Duas de preferência, uma para trânsito de cargas preferencialmente por ferrovias e outra para evitar trânsito em rodovias locais.

Os 79.535 pontos de demanda receberam valores transferidos da Sico correspondente de cada cenário. Dessa forma, a solução do PLA considera as regras definidas para a rede e também a demanda ponderada dos critérios econômicos, logísticos, sociais, ambientais e de competição. Como candidatos para localização do PS foram selecionados 94 pontos da rede, distribuídos em todas as mesorregiões do estado, sendo preferencialmente conexões rodoferroviárias.

O PLA foi enunciado como um problema de  $p$ -medianas. Esse problema consiste em localizar  $p$  instalações logísticas (medianas) em uma rede, de modo a minimizar a soma total das distâncias de

cada nó de demanda à sua mediana mais próxima (CHRISTOFIDES; BEASLEY, 1982; HAKIMI, 1964; TEITZ; BART, 1968). A solução foi gerada de forma a atender a maior quantidade de pontos de demanda. Técnicas heurísticas foram usadas, pois o espaço da solução cresce até ficar extremamente grande. O solucionador construiu uma matriz de custos origem-destino (OD). Em seguida, foi feita uma edição de Hillsman (HILLSMAN, 1984), e um conjunto de soluções semirrandomizadas foi gerado. Aplicou-se uma heurística de substituição de vértices (TEITZ; BART, 1968) para refinar as soluções. Finalmente, uma meta-heurística Grasp (FEO; RESENDE, 1995; LORENA et al., 2001) retornou a melhor solução de um grupo de boas soluções.

### 3.3 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Foram definidos quatro cenários, criados a partir da combinação da consideração, ou não, dos PS existentes com as Sicos computadas pela AMCE. Em cada um dos quatro cenários, seis localidades foram selecionadas entre as 94 candidatas para atender aos 79.535 pontos de demanda.

- **Cenário 1:** Sem PS existentes + Sico A (pesos critérios AHP).
- **Cenário 2:** Sem PS existentes + Sico B (priorização socioambiental).
- **Cenário 3:** PS existentes obrigatórios + Sico A (pesos critérios AHP).
- **Cenário 4:** PS existentes obrigatórios + Sico B (priorização socioambiental).

Dois cenários (2 e 4) tiveram priorização socioambiental. A priorização ambiental foi realizada visando a minimização dos impactos ao meio ambiente e a redução dos esforços do projeto ao evitar áreas ambientalmente sensíveis (MONTAÑO et al., 2012). Já o favorecimento dos critérios sociais busca tornar a instalação de um novo PS um instrumento de desenvolvimento regional, que possibilite a geração de empregos e melhora dos indicadores sociais. Os pesos dos critérios social e ambiental foram definidos arbitrariamente em 30% cada. Os outros três critérios tiveram seu peso ajustado, mantendo a proporção determinada pelo AHP.

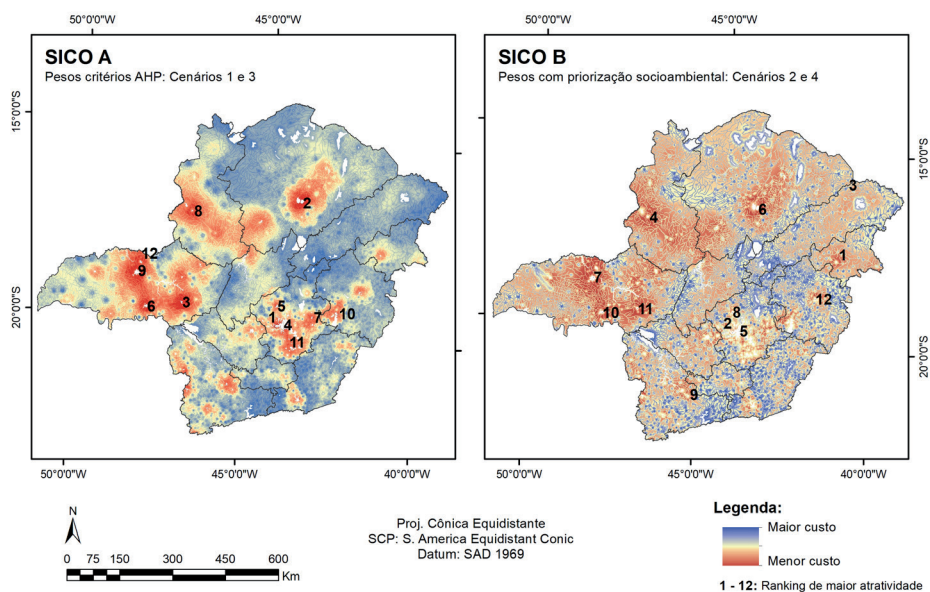
Para avaliar a localização dos PS existentes, o modelo foi executado desconsiderando-os (cenários 1 e 2). Contudo, na realidade, os PS existentes são obrigatórios na solução, pois não faz parte do objetivo sugerir a desativação de nenhuma instalação logística, que inclusive pode ser privada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os pesos determinados pelo AHP para a AMCE foram atestados pela  $CR = 0,008$ , com  $\lambda = 5,035$ . O valor de  $CR$  observado ( $< 0,10$ ) assinala consistência aceitável da matriz de comparação pareada (APOSTOLOU; HASSELL, 1993; CHEN; YU; KHAN, 2010). O  $GCI$  foi igual a  $0,03$  e o consenso das opiniões foi de  $84,6\%$ .

As duas Sico são apresentadas na Figura 4. A superfície **A** (esquerda) considerou os pesos dos critérios determinados pelo AHP. Do lado direito, a Sico **B** teve priorização socioambiental. Comparando os dois mapas, observa-se que a priorização socioambiental reduz o peso econômico e, de certa forma, equaliza as regiões. Essa priorização, entretanto, não altera a configuração espacial da solução, onde alguns polos regionais permanecem mais atrativos para a instalação do PS.





**Figura 4 |** Superfícies integradas de custo-oportunidade para localização de PS em Minas Gerais. Pesos dos critérios determinados pelo AHP (Sico A) e priorização dos critérios social e ambiental (Sico B).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Sico A (utilizada nos cenários 1 e 3), o custo de oportunidade máximo para localização de PS foi de 8,3993 (Arantina, no Sul de Minas) e o mínimo de 2,8601 (Betim). Observa-se na Tabela 2 que os municípios mais atrativos são Betim, Montes Claros e Araxá. Entretanto, por já existirem PS muito próximos da primeira e da terceira alternativas, provavelmente haverá uma grande competição. O destaque é Montes Claros (2º no ranking), pois apresenta grande atratividade e nenhum PS em um raio de 350 km.

A Sico B, empregada nos cenários com priorização socioambiental (2 e 4), teve os custos variando entre 9,2408 (Arantina) e 3,4524 (Teófilo Otoni). A ordem de classificação apresentada na Tabela 2 foi alterada. Porém, oito candidatas permanecem como boas alternativas nas duas AMCE: Betim, Montes Claros, Araxá, Belo Horizonte, Sete Lagoas, Uberaba, Paracatu e Uberlândia. Na Sico B, Montes Claros cai da 2ª para a 6ª posição na classificação, devido à sua proximidade ao Parque Estadual da Lapa Grande e à grande área urbanizada.

**Tabela 2 |** Localidades de maior atratividade para instalação do PS de acordo com a AMCE sem priorização socioambiental (Sico A).

Ranking	Custo	Município	Microrregião	Mesorregião	X coord (m)	Y coord (m)
1	2,86	Betim	Belo Horizonte	Metropolitana de BH	1.571.640,7	1.248.247,0
2	3,07	Montes Claros	Montes Claros	Norte de Minas	1.644.675,2	1.596.149,6
3	3,22	Araxá	Araxá	Triângulo / Alto Paranaíba	1.302.431,1	1.315.568,9
4	3,25	Belo Horizonte	Belo Horizonte	Metropolitana de BH	1.590.851,3	1.251.391,4
5	3,30	Sete Lagoas	Sete Lagoas	Metropolitana de BH	1.571.917,2	1.304.824,2
6	3,37	Uberaba	Uberaba	Triângulo / Alto Paranaíba	1.202.742,4	1.304.367,2
7	3,75	Itabira	Itabira	Metropolitana de BH	1.675.155,0	1.272.323,9
8	3,75	Paracatu	Paracatu	Noroeste de Minas	1.336.801,3	1.574.621,2
9	3,78	Uberlândia	Uberlândia	Triângulo / Alto Paranaíba	1.177.431,2	1.405.099,9
10	3,83	Santana do Paraíso	Ipatinga	Vale do Rio Doce	1.746.041,6	1.282.858,3

Ranking	Custo	Município	Microrregião	Mesorregião	X coord (m)	Y coord (m)
11	3,96	Itabirito	Ouro Preto	Metropolitana de BH	1.606.038,8	1.212.047,3
12	3,97	Araguari	Uberlândia	Triângulo / Alto Paranaíba	1.186.257,2	1.432.014,4

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 5 pode-se observar a AS do critério ambiental das 12 localidades candidatas à instalação do PS que apresentaram o menor custo na Sico A. Todas as localidades apresentaram aumento linear do custo, com conseqüente redução da atratividade. Paracatu (A87) foi a alternativa que apresentou menor taxa de crescimento do custo. As poucas localidades (6 das 94) que reduziram o custo ao se aumentar o peso ambiental não estão entre as 12 primeiras do ranking.

O comportamento da AS do critério social foi diferente do ambiental. A variação de custo observada é menor<sup>1</sup> e, ao contrário do critério ambiental, a maioria das localidades (66) apresenta redução do custo com o incremento no peso do critério. As localidades que apresentaram aumento do custo já tinham custos maiores antes do incremento no peso.

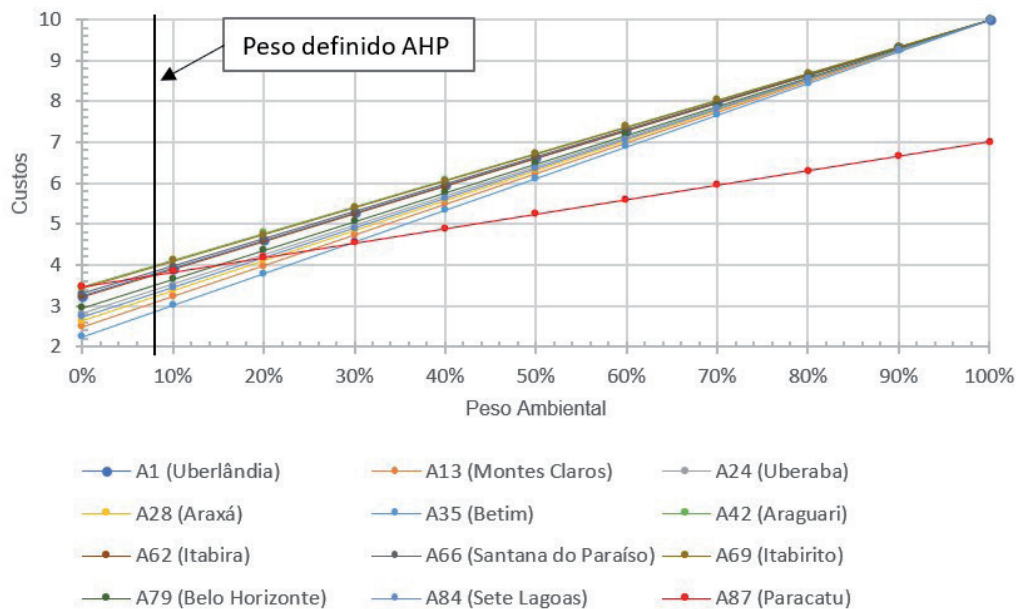


Figura 5 | Análise de Sensibilidade do critério ambiental, com a variação observada do custo nas 12 localidades candidatas à instalação do PS de maior atratividade na Sico A.

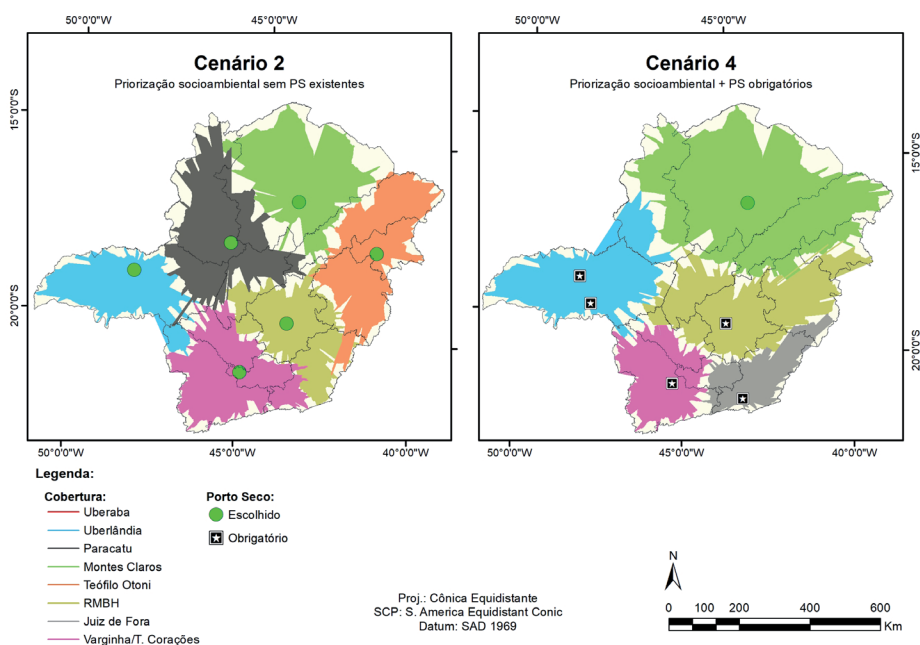
Fonte: Elaborada pelos autores.

Nos cenários 1 e 2, devido à configuração espacial semelhante das Sico A e B (Figura 4), as localidades selecionadas foram as mesmas. Ocorreram apenas diferenças mínimas na área de cobertura de cada PS. Três PS foram localizados em locais onde já existem instalações na região (Uberlândia, Varginha e Contagem). Outros três foram posicionados nos municípios de Paracatu, Teófilo Otoni e Montes Claros, com preferência em relação aos que já existem em Uberaba e Juiz de Fora. O resultado aponta a deficiência de PS no norte do estado (mesorregiões Norte, Noroeste, Vale do Jequitinhonha e Mucuri), apesar da existência de demanda e, conseqüentemente, potencial para instalação. Além disso, devido à característica gravitacional do PLA, a distribuição espacial dos PS foi mais equilibrada do que a distribuição das instalações existentes. A área de cobertura de cada PS foi muito similar à área dos demais.

Nos cenários 3 e 4, onde os cinco PS existentes são obrigatórios na solução, apenas mais um é acrescido. Montes Claros é escolhida como a melhor solução em ambos os cenários. Apesar da queda na atratividade após a priorização socioambiental, Montes Claros foi selecionada no PLA devido à sua

posição estratégica (IBGE, 2008), que permite atender uma vasta região de Minas, ainda não servida por terminais alfandegados. Nesses dois cenários, uma das localidades obrigatórias, Uberaba, só foi acessada por pontos de demanda muito próximos e no seu entorno.

Na Figura 6 são apresentadas as localidades selecionadas para instalação dos PS, com sua respectiva área de cobertura. Devido aos resultados semelhantes nos cenários 1 e 2, assim como em 3 e 4, os mapas da Figura 6 apresentam apenas os resultados dos cenários 2 e 4.



**Figura 6 |** Portos secos e suas respectivas áreas de cobertura no estado de Minas Gerais para os dois cenários de priorização socioambiental (2 e 4).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Um fator que influencia a escolha por Montes Claros é a concentração das atividades de exportação e importação da mesorregião Norte de Minas em poucos municípios, a maioria deles localizados no entorno de Montes Claros. De acordo com dados do MDIC (BRASIL, 2018), quase 99% do valor FOB de exportação da mesorregião é proveniente de apenas sete municípios. Montes Claros sozinho é responsável por 49,9% em 2017 e 38,3% em 2018, do valor total exportado pela mesorregião (BRASIL, 2018).

Os resultados deste estudo corroboram a condição de Capital Regional B e a grande área de influência atribuídas a Montes Claros pelo IBGE (2008) na pesquisa Regiões de Influência das Cidades (Regic). De acordo com os resultados (Figura 6) e com o IBGE (2008), além da mesorregião Norte de Minas, Montes Claros influencia também as mesorregiões Noroeste, Vale do Jequitinhonha e Mucuri.

A importância da integração de dois métodos de definição locacional é verificada pela diferença entre os resultados de cada método individualmente. Se tivéssemos considerado apenas a AMCE com pesos determinados pelo AHP, o município de Betim teria preferência em relação a Montes Claros. Contudo, já existe um PS na Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde situa-se Betim, de forma a atender à respectiva demanda regional. Por outro lado, a solução do PLA sem a ponderação da Sico seria restrita à otimização do número de pontos de demanda atendidos, e a importância das dimensões social e ambiental provavelmente seria negligenciada. Além disso, esse tipo de análise na etapa de planejamento pode facilitar o processo de licenciamento ambiental, que exige a avaliação de alternativas locais ambientalmente viáveis (MONTAÑO et al., 2012).

Os projetos de investimentos produtivos direcionados a Minas Gerais entre 2004 e 2014 foram fortemente concentrados em termos espaciais. Apenas quatro Territórios de Desenvolvimento responderam por 70% das intenções de investimentos. As regiões mais dinâmicas foram preferidas, em detrimento das áreas historicamente problemáticas do ponto de vista ambiental, econômico e social, ou seja, as políticas de fomento estaduais sancionaram uma determinada configuração produtiva e espacial preexistente (MINAS GERAIS, 2015). É necessário superar esse cenário de desigualdade regional por meio do DESS de todo o estado.

## 5 CONCLUSÃO

Portos secos são alternativas para amenizar o congestionamento e os conflitos sociais nas zonas primárias, diminuir os custos logísticos, dar maior agilidade ao processo e reduzir impactos ambientais. Contudo, tradicionalmente, o assunto tem sido limitado à área de transportes. Este estudo apresenta subsídios para a formulação de propostas de planejamento mais abrangentes e participativas. Fatores de caráter social e ambiental, muitas vezes negligenciados na perspectiva cartesiana da engenharia de transportes, devem ser considerados no momento de escolha do local de uma nova instalação. Dessa forma, o maior benefício para todas as partes interessadas pode ser alcançado, promovendo o desenvolvimento regional sustentável.

A adoção conjunta de dois métodos reconhecidos e empregados para a localização de instalações apresentou resultados diferentes de cada método individualmente. Dessa forma, a contribuição do artigo foi demonstrar o ganho alcançado pela integração de métodos modernos e consolidados de suporte à decisão no planejamento de transportes. O modelo proposto foi otimizado do ponto de vista logístico ao mesmo tempo que atendeu às demandas sociais e ambientais.

Minas Gerais, embora possua a maior malha rodoviária do País, é um estado com grandes disparidades regionais. Os resultados demonstraram que as mesorregiões do norte (Norte, Noroeste, Jequitinhonha e Mucuri) são carentes de serviços portuários interiores. Estudos multidimensionais possibilitam que locais com alto potencial não sejam esquecidos, e que a eventual instalação de novos PS não acentue a desigualdade de infraestrutura e os problemas ambientais preexistentes. As análises locais desenvolvidas a partir de diferentes cenários resultaram na convergência de Montes Claros como localização prioritária para instalação de PS.

Os autores entendem que o objetivo principal foi alcançado. A metodologia foi discriminada para subsidiar a discussão e propiciar a identificação das localidades mais adequadas para instalação de PS, tendo em vista elementos logísticos, sociais, ambientais, econômicos e de competição. Trabalhos futuros podem incorporar mais variáveis, avaliar as métricas de desempenho do modelo, comparar os resultados com outros métodos e aplicar uma AS espacialmente explícita.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, CNPq e Fapemig pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa. Também agradecem aos colegas Vanilson Couto e Ana Ísis Moura pelas contribuições ao trabalho.

## NOTA

1 | A variação média do custo (média das diferenças entre o custo a peso 0% e 100% de todas as alternativas) na AS Social é de 1,11 contra 4,32 na ambiental. REFERÊNCIAS

## REFERÊNCIAS

- ANTAQ. **Anuário Antaq**. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/Anuario/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- APOSTOLOU, B.; HASSELL, J. M. An empirical examination of the sensitivity of the analytic hierarchy process to departures from recommended consistency ratios. **Mathematical and Computer Modelling**, 1993.
- AWAD-NÚÑEZ, S. et al. How should the Sustainability of the Location of Dry Ports be Measured? **Transportation Research Procedia**, v. 14, n. 2016, p. 936–944, 2016a.
- AWAD-NÚÑEZ, S. et al. A Methodology for Measuring Sustainability of Dry Ports Location Based on Bayesian Networks and Multi-criteria Decision Analysis. **Transportation Research Procedia**, v. 13, n. 2016, p. 124–133, 2016b.
- BARBOZA, P. D.; VIEIRA, J. G. V. Análise de decisão multicritério aplicada na seleção de investimento em armazenagem de soja em grão. **Produto & Produção**, v. 15, n. 2, p. 24–45, 2014.
- BOLTURK, E. et al. Multiattribute Warehouse Location Selection in Humanitarian Logistics Using Hesitant Fuzzy AHP. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 8, n. 2, 2016.
- BRASIL. Lei N. 12.651. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n. 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n. 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n. 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, Brasil: **Diário Oficial da União – Seção 1 – 28/5/2012**, p. 1-32.
- BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Estatísticas de Comércio Exterior**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior>>. Acesso em: 31 mar. 2018.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. **Base de Dados Georreferenciados PNL 2010**. Brasília (on-line): Ministério dos Transportes, 2014. Disponível em: <<https://www.infraestrutura.gov.br/conteudo/2822-base-de-dados-georreferenciados-pnl-2010.html>>. Acesso em: 31 jul. 2018.
- BRASIL. Resolução Conama 013/1990. Dispõe sobre a área circundante, num raio de 10 (dez) quilômetros, das Unidades de Conservação. Brasília, Brasil: **Diário Oficial da União**, 28/12/1990, p. 25541.
- CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 12, p. 1582–1591, 2010.
- \_\_\_\_\_. The spatial framework for weight sensitivity analysis in AHP-based multi-criteria decision making. **Environmental Modelling & Software**, v. 48, p. 129–140, 2013.
- CHINELATO, F. B.; CRUZ, D. B. DE F.; ZIVIANI, F. Made in Brazil: o impacto da infraestrutura logística brasileira nas operações de comércio exterior. **Revista Administração em Diálogo – RAD**, v. 13, n. 3, 2011.
- CHRISTOFIDES, N.; BEASLEY, J. E. A tree search algorithm for the p-median problem. **European Journal of Operational Research**, v. 10, n. 2, p. 196–204, 1982.
- CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018**. CNT | SEST SENAT. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2018. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Home>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- CRAWFORD, G.; WILLIAMS, C. A note on the analysis of subjective judgment matrices. **Journal of Mathematical Psychology**, 1985.
- DANIEL, C. On Varying One Factor at a Time. **Biometrics**, v. 14, 1958.
- DINWOODIE, J. et al. Sustainable Development of Maritime Operations in Ports. **Business Strategy and the Environment**, v. 21, n. 2, p. 111–126, 2012.
- GERMANO, E. C.; FREIRE JÚNIOR, A. E. A importância do porto seco como facilitador na armazenagem e desembarço aduaneiro. **Revista Fatec Sebrae em Debate: Gestão, Tecnologias e Negócios**, v. 04, n. 6, 2017.

GOEPEL, K. D. Implementing the Analytic Hierarchy Process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises – A new AHP Excel template with multiple inputs. **Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process**. Kuala Lumpur: 2013. Disponível em: <<https://bpmmsg.com/new-ahp-excel-template-with-multiple-inputs/>>. Acesso em: 29 dez. 2018.

GOULIELMOS, A. M. European Policy on Port Environmental Protection. **Global Nest Journal**, v. 2, n. 2, p. 189–197, 2013.

HAKIMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450–459, 1964.

HILLSMAN, E. L. The p-Median Structure as a Unified Linear Model for Location–Allocation Analysis. **Environment and Planning A**, v. 16, n. 3, p. 305–318, 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Regiões de influência das cidades 2007**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: IBGE, 2008. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: IBGE, 2012. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 6 maio 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Downloads Geociências | IBGE**. Rio de Janeiro (on-line): IBGE, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

JAFFEE, D. ‘A Deeper Channel Floats all Boats’: the port economy as urban growth engine. **Environment and Planning A: economy and space**, v. 47, n. 4, p. 783–800, 2015.

KA, B. Application of fuzzy AHP and Electre to China dry port location selection. **Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 27, n. 2, p. 331–354, 2011.

KOEHLER, P. H. W.; ASMUS, M. L. Gestão ambiental integrada em Portos Organizados: uma análise baseada no caso do porto de Rio Grande, RS – Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 2, p. 53–67, 2010.

LIGMANN-ZIELINSKA, A.; JANKOWSKI, P. Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. **Environmental Modelling and Software**, v. 57, p. 235–247, 2014.

LORENA, L. A. N. et al. Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. **Gestão & Produção**, v. 8, n. 2, p. 180–195, 2001.

LOUREIRO, J. F.; FREITAS, R. R. DE; GONÇALVES, W. Proposta de um método de localização para expansão de um terminal portuário por meio do Analytic Hierarchy Process (AHP). **Revista Espacios**, v. 36, n. 10, p. 7, 2015.

MAPA, S. M. S.; LIMA, R. DA S. Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p. 119–136, 2012.

MEDEIROS, M. C. A geografia do mercado mundial de produtos agroalimentares e o papel do Brasil. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 31, p. 260, 2014.

MINAS GERAIS. Desenvolvimento econômico e social sustentável de Minas Gerais: redução das desigualdades sociais e regionais. **Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado (PMDI)**. Belo Horizonte, MG: Governo de Minas Gerais, 2015. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/conteudo/transicao/pmdi/pmdi>>.

MITCHEL, A. **The ESRI Guide to GIS analysis**. Redlands: ESRI Press, 2005. v. 2

MONTAÑO, M. et al. Integração de critérios técnicos, ambientais e sociais em estudos de alternativas locais para implantação de aterro sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 61–70, 2012.

NG, A. K. Y.; PADILHA, F.; PALLIS, A. A. Institutions, bureaucratic and logistical roles of dry ports: the Brazilian experiences. **Journal of Transport Geography**, v. 27, p. 46–55, 2013.

NGUYEN, L. C.; NOTTEBOOM, T. A Multi-Criteria Approach to Dry Port Location in Developing Economies with Application to Vietnam. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 32, n. 1, p. 23–32, 2016.

OLIVEIRA, D. S. et al. Expansão Portuária, Desenvolvimento Municipal e Alterações Ambientais no Brasil: desafios para a gestão costeira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 13, n. 1, p. 79–87, 2013.

PNUD; FJP; IPEA. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Disponível em: <<http://atlasbrasil.org.br/2013/>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

RAHMAN, M. A. et al. An integrated study of spatial multicriteria analysis and mathematical modeling for managed aquifer recharge site suitability mapping and site ranking at Northern Gaza coastal aquifer. **Journal of Environmental Management**, v. 124, p. 25–39, 2013.

ROSO, V.; WOXENIUS, J.; LUMSDEN, K. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. **Journal of Transport Geography**, v. 17, n. 5, p. 338–345, 2009.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, 1977.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.

SADASIVUNI, R. et al. A transportation corridor case study for Multi-criteria Decision Analysis. **Proceeding of ASPRS 2009 Annual Conference**. Baltimore, USA: ASPRS, 2009.

SINAY, M. C. F.; CARVALHO, S. D.; BRAGA, I. L. A Importância da Inclusão da Variável Ambiental na Gestão Portuária. **Revista de Administração, Sociedade e Inovação**, v. 3, n. 2, p. 124–135, 2017.

SNYDER, J. P. **Map Projections: a working manual**. Washington, DC, USA: United States Government Printing Office, 1987.

SOPHA, B. M. et al. Urban distribution center location: combination of spatial analysis and multi-objective mixed-integer linear programming. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 8, p. 1–10, 2016.

TEITZ, M. B.; BART, P. Heuristic Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted Graph. **Operations Research**, v. 16, n. 5, p. 955–961, 1968.

WANKE, P. F.; HIJJAR, M. F. Exportadores brasileiros: estudo exploratório das percepções sobre a qualidade da infraestrutura logística. **Produção**, v. 19, n. 1, p. 143–162, 2009.