

APOIO A DECISÃO ESPACIAL PARA USO ADEQUADO DO SOLO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO¹

Dandara Monteiro Martins^a, Ciro José Jardim de Figueiredo^{a*}

^aDepartamento de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semiárido – Ufersa, Angicos-RN, Brasil

Recebido 10/02/2020, aceito 06/10/2020

RESUMO

No Brasil, o problema da seca ocorre com maior frequência na região nordeste. O uso de mapas por meio de sistemas de decisão espacial para o uso correto do solo é uma alternativa para identificar locais vulneráveis nos locais com estiagem de chuvas. O objetivo desse artigo foi identificar a adequabilidade do uso do solo em uma região do Nordeste do Brasil. Um Sistema de Espacial foi construído, integrando uma interface gráfica, considerando uma abordagem multicritério. Para desempenhar o sistema, cinco critérios foram selecionados e agregados através da abordagem aditiva. Os resultados alcançados mostram os locais mais adequados e menos adequados para o uso do solo. O modelo espacial pode auxiliar gestores para implantar políticas públicas que possam mitigar o problema da seca.

Palavras-chave: Seca, Multicritério, Modelo espacial.

ABSTRACT

In Brazil, the drought problem is mostly in the northeastern region and occurs every year. We propose a model based on a spatial decision system for aiding on the land suitable use. In this sense, we identified which places are most suitable for use in agriculture and livestock. Therefore, we are building a spatial system considering a graphic interface and adopting a multiple criteria methodology. Following, we perform an application in the northeast region of Brazil, considering a semiarid region. Five criteria were selected and aggregated into an additive approach. The results present places more suitable for land use and identify which places are not suitable for use. The spatial model can help planners implement public policy to mitigate the drought problem.

Keywords: Drought, Multi-criteria, Spatial model.

*Autor para correspondência. E-mail: ciro.figueiredo@ufersa.edu.br
DOI: 10.4322/PODes.2020.006

¹Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.

1. Introdução

As regiões do planeta que possuem precipitação pluviométrica abaixo do esperado e com distribuição irregular durante o ano produzem impactos negativos as populações, interferindo diretamente no desenvolvimento econômico. A falta de chuvas tem relação com as mudanças climáticas, que provocam o aumento da temperatura, diminuição de bacias hídricas (Pinheiro et al., 2017), desequilíbrio ecológico (Santos et al., 2014), ineficiência de produtividade na agricultura (de Lima Pereira et al., 2016) e perdas econômicas (Freitas, 1998; Karamouz et al., 2016). A Região Nordeste do Brasil (RNB) geralmente enfrenta longos períodos de estiagem intercalados com curtos períodos de chuva (Costa et al., 2016; Neves et al., 2016). No Brasil, 89,5% da região do semiárido se concentra no Nordeste brasileiro (IBGE, 2018a).

Toda esta situação cria uma demanda para a elaboração de políticas públicas que estabeleçam condições harmônicas entre sociedade e um ambiente que enfrenta o problema do estresse hídrico anualmente. Ressalta-se que estas políticas devem estar pautadas em ações estratégicas que atuem ao longo prazo, não sendo apenas soluções imediatas e limitadas. Resultando no gerenciamento apropriado dos recursos naturais e dos espaços disponíveis na RNB (Costa et al., 2016). Por estas razões, a proposta deste estudo é mensurar a adequabilidade do solo quanto ao seu uso, garantindo a viabilidade de convívio do espaço e a implantação de ações estratégicas futuras.

Na ausência de chuvas em regiões áridas, o uso correto do solo é fundamental para a prosperidade destes locais. A correta identificação é sustentada em estudos que usaram sistemas de suporte à decisão para o monitoramento de seca (Freitas, 1998); mapeamento de locais promissores para manutenção de lençóis freáticos (Machiwal e Singh, 2015; Jeihouni et al., 2015); avaliação da vulnerabilidade de aquíferos em regiões áridas (Uddameri e Honnunar, 2007); modelos para avaliar o nível de estiagem (Neves et al., 2016; Palchaudhuri e Biswas, 2016); e adequabilidade do solo para agricultura, em situações de estiagem (Sehgal e Dhakar, 2016).

No tocante a este tema, a proposta deste estudo é desenvolver um sistema de suporte à decisão espacial para apoiar decisores quanto a identificação da adequabilidade do solo na região do semiárido brasileiro. Para a construção do modelo, foram considerados dados espaciais que são agregados e servem para mensurar a adequabilidade quanto ao correto uso. Os resultados conduzem a identificação de regiões propícias para agricultura, pecuária e caprinocultura, minimizando o impacto ambiental e social. Para validar o sistema desenvolvido, foi escolhida uma microrregião, localizada no estado do Rio Grande do Norte, pertencente a região nordeste do Brasil. Esta região foi escolhida devido aos anos consecutivos de estiagem e ausência de políticas públicas clara e eficientes de longo prazo que possam auxiliar no correto planejamento da região.

O restante do artigo segue dividido em uma breve revisão sobre a abordagem científica que serve de suporte para o estudo. Em seguida é apresentada a Metodologia empregada para o desenvolvimento do sistema espacial e as etapas usadas para obtenção dos dados. Na seção posterior estão dispostos os resultados e a discussão do estudo. Finalmente, na Conclusão são apresentadas as perspectivas da contribuição e visões futuras.

2. Revisão SIG e Multicritério

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) compreendem uma estrutura de armazenamento, manipulação e gerenciamento de dados geográficos que podem apoiar decisões Heywood et al. (2006), Konecny (2003). Na literatura, há diferentes estudos mostrando a relevância sobre o tema (Lobo et al., 2017; Henriques et al., 2016; De Feo et al., 2014; Seekao e Pharino, 2016; Xu et al., 2016). Enquanto o tema sobre Decisão Multicritério (DM) consiste em um conjunto de métodos estruturados para apoiar processos decisórios que possuem objetivos conflitantes (Malczewski e Rinner, 2015).

A integração SIG-DM possibilita avaliar espacialmente uma região previamente definida, apoiando as decisões por meio de modelos estruturados (Malczewski e Rinner, 2015). As informações usadas apresentam diferentes tipos de origem e possuem determinado nível de complexidade a depender do problema (Figueiredo e Mota, 2016; Goodchild e Janelle, 2004).

Em SIG-DM, deve haver a classificação do nível de integração existente entre as duas abordagens, estando relacionado a complexidade computacional utilizada: (i) *loose-coupling*, (ii) *tight-coupling*, e (iii) *full integration* (Goodchild, 1992; Jun, 2000; Jankowski, 1995). Na primeira abordagem, dois sistemas interagem através da troca de arquivos, sendo que um serve de input para o outro. A segunda integração é baseada no compartilhamento de um único conjunto de dados e apenas uma interface que se relaciona com o usuário. A terceira estratégia é a mais completa, pois permite criar rotinas exclusivas para os usuários através de linguagem de programação (Eastman et al., 1995; Yatsalo et al., 2010). No caso deste estudo, foi usada uma extensão *tight-coupling*.

Deve-se enfatizar que no mercado mundial estão disponíveis vários pacotes comerciais. Entretanto, para este estudo se optou por um projeto personalizado para manipulação, tratamento e interface com o usuário. Assim, a proposta atende todas as especificações projetadas, além da completa personalização do ambiente que foi desenvolvido.

3. Metodologia da Pesquisa

No presente estudo, um Sistema Espacial para Apoiar Decisões foi construído para identificar a adequabilidade do solo quanto ao correto uso. Para validar o sistema, foi considerada a microrregião de Angicos, que está localizada no centro do estado do Rio Grande do Norte. A construção da metodologia foi estabelecida em duas etapas. Primeiro, foram levantados os requisitos necessários para a construção do sistema espacial de decisão, baseados: (Ferretti e Montibeller, 2016) e (Hamilton et al., 2016). Para os procedimentos de obtenção e tratamento dos dados espaciais, foram adotadas as etapas apresentadas em (Ferretti e Montibeller, 2016) e (Hamilton et al., 2016). A Figura 1 sintetiza as fases do estudo.

O aplicativo Graphical User Interface (GUI) integrado ao MATLAB® foi usado para construir a interface com o usuário. A interface gráfica desenvolvida permite ao usuário manipular e interagir com os seguintes componentes: inserção dos dados de entrada, tratamento e estruturação multicritério (definição de escalas de valores, decisores, padronização e agregação), apresentação dos resultados e análise de sensibilidade.

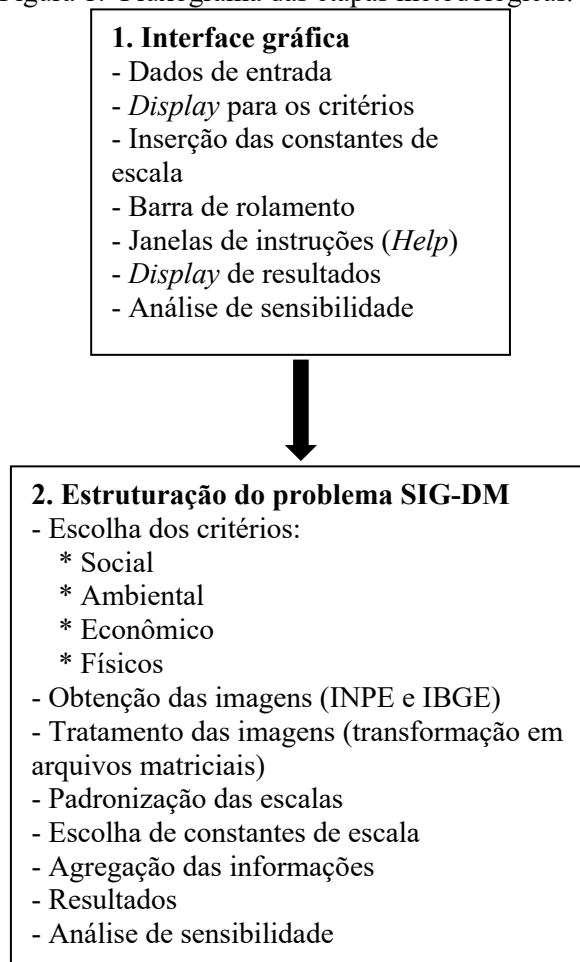
Para escolher as variáveis usadas no sistema, quatro fatores foram considerados: ambientais, físicos, econômicos e sociais. Estes dados foram obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e LANDSAT 8 imagens de satélites (USGS). Os dados são tratados como imagens e transformados no formato *raster*. Em virtude das diferentes mensurações dos critérios, optou-se pela padronização em uma única escala no intervalo fechado de $[0, 10]$, sendo 0 a menos preferida e 10 a mais preferida. Na literatura, são reportados critérios relevantes para os cenários de adequação do solo (Jeihouni et al., 2015; Karamouz et al., 2016; de Lima Pereira et al., 2016; Pinheiro et al., 2017). A seguir, estão descritos os critérios escolhidos:

- Declividade: a declividade é calculada pela inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal. A relação é obtida entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos. A imagem foi tratada via reamostragem pela abordagem do vizinho mais próximo. Imagem obtida pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).
- Distância: serve para mensurar o mínimo comprimento entre as possíveis trajetórias sobre a superfície, partindo de um ponto e atingindo um segundo ponto. Obtida pelo IBGE.
- NVDI: o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*) classifica um terreno quanto a sua vegetação e o tipo de terreno. Técnicas de sensoriamento remoto são usadas para se chegar no produto. Neste estudo, o produto já estava disponível. Obtida por imagem de satélite LANDSAT 8. A imagem foi tratada via reamostragem pela abordagem do vizinho mais próximo.
- Disponibilidade hídrica: se refere as superfícies da área em estudo, que tem recursos/fontes hídricas. No caso da região em estudo é comum os açudes, barragens

ou corpos de rios. Este último pode sua vez ocorre em função das chuvas. Obtida pelo IBGE.

- Tipo de solo: formação e Composição do solo. Obtida pelo IBGE.

Figura 1: Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4. Resultados

Nesta seção, são apresentadas as informações relativas a construção da interface, aplicação do problema e posterior discussão dos resultados obtidos e os impactos encontrados.

4.1. Apresentação da Interface Gráfica

A construção do sistema gráfico foi configurada em quatro componentes interativos e sequenciais.

- Dados de entrada: os dados de input foram tratados como matrizes. A representação foi feita em unidades de pixels. Cada pixel é uma alternativa e formalmente é definida como a localização da k -ésima alternativa (*pixel*), $a_{i,j}$, definida pelas coordenadas (x_i, y_j) . Por simplificação é um elemento a_i , de uma matriz quadrada A . Deve-se considerar os índices i e j com sua respectiva dimensão espacial 30×30 metros. Para padronizar as escalas, os valores mínimo e máximo foram adotados como extremos e, em seguida, dividiu-se linearmente em um número fixo de classes.
- Conjunto de critérios: assumindo um conjunto finito de critérios com as preferências expressas por constantes de intensidade (denotado como cp , para $p=1, 2, \dots, n$) e

assumindo que: $0 \leq c_p \leq 1$. Cada alternativa tem um desempenho valorado, conforme mencionado anteriormente, e mensurado na escala, obtida na expressão observada na Eq. (1).

$$\sum_{p=1}^n c_p = 1 \quad (1)$$

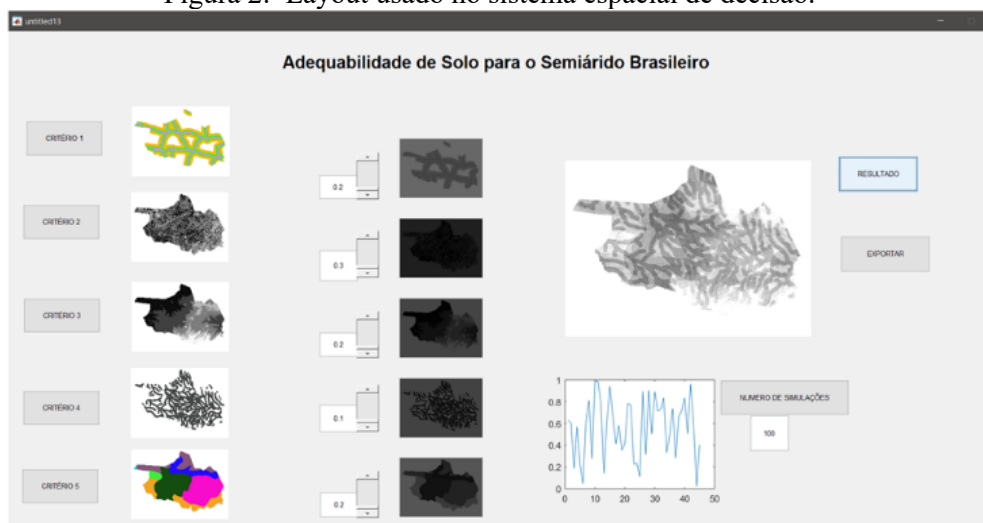
- Função aditiva: para agregar as informações, foi usada uma função aditiva. Como em cada critério há um desempenho mensurável e valorado por $v(a_{in})$. O procedimento combina o valor da i -ésima alternativa de decisão ao conjunto de constantes de preferências resultando na avaliação global de cada alternativa e expressa pela Eq. (2).

$$V(A_{i,j}) = \sum_{p=1}^n c_p(a_{i,j}) \quad (2)$$

- Estruturação multicritério: consiste na agregação das alternativas dado o conjunto de critérios.
- Visualização dos resultados: os resultados são dispostos graficamente, apresentando a combinação das preferências expressas pelo decisor.
- Análise de sensibilidade: são feitas alterações nos pesos de desempenho de cada critério para verificar a sensibilidade dos resultados.

A Figura 2 apresenta a interface desenvolvida e utilizada para tratar o problema.

Figura 2: Layout usado no sistema espacial de decisão.

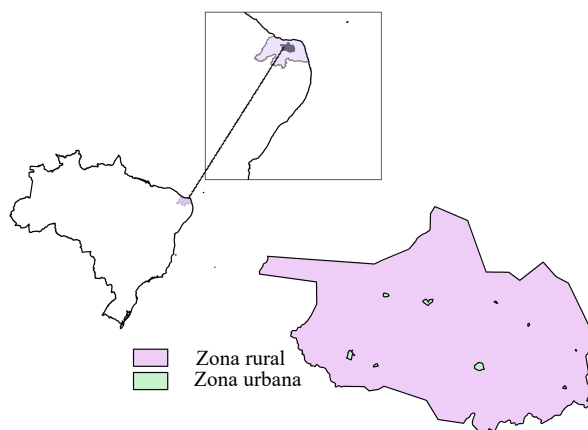


Fonte: Elaborada pelos autores.

4.2. Aplicação em um Problema Real

Para validar o sistema desenvolvido, foi escolhida a microrregião de Angicos situada no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. O território é limitado pelas coordenadas geográficas: $36^{\circ}86' - 35^{\circ}.91'E$ longitude e $-5^{\circ}90' - 5^{\circ}25' N$ latitude. Há oito municípios distribuídos ao longo de aproximadamente 408,560 hectares divididos em zona urbana (1.627 hectares) e zona rural (406.933 hectares), com população estimada em 53.321 habitantes baseado conforme o Censo de 2017 (IBGE, 2018b). No ano de 2018 a precipitação acumulada média entre os municípios da microrregião foi de 487,44 mm de chuvas. A Figura 3 detalha o local escolhido.

Figura 3: Detalhamento do local de aplicação.



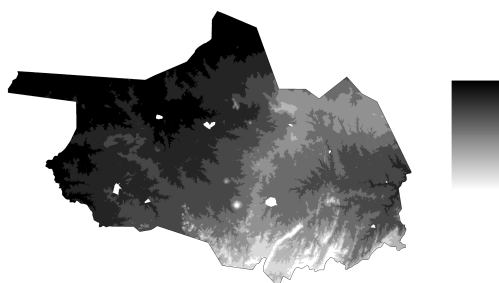
Fonte: Elaborada pelos autores.

Os mapas foram convertidos no formato *raster*. Foi adotado uma dimensão 30 m × 30 m para avaliação. Para cada mapa, foram mensurados os seus respectivos intervalos de valores e depois padronizados para uma mesma escala. Após a disposição dos mapas no ambiente desenvolvido, deve-se definir o grau de importância de cada mapa. No presente estudo, optou-se por graus de importância de mesma intensidade, para uma análise inicial. Na análise de sensibilidade foram feitas adaptações. A Tabela 1 apresenta as características destes critérios que foram utilizados.

Outra fase importante é a eliminação de locais que dispensam avaliação. Os locais de exclusão são superfícies no terreno onde as análises são descartadas, pois não há o interesse em realizar avaliação dado o conjunto de alternativas. Isto se deve a inúmeras razões de natureza ambiental, social e econômica. Para este estudo, as zonas urbanas dos municípios e áreas ambientais, que são protegidas por leis de preservação do meio-ambiente, foram excluídas.

A etapa seguinte, consiste na atribuição das constantes de intensidade para cada mapa representado pelos critérios escolhidos para o problema. Inicialmente, as intensidades dos cinco *layers* foram assumidos com os mesmos valores de desempenhos, mencionando anteriormente. A Figura 4 mostra a variação de adequabilidade do uso do solo para a região escolhida. As superfícies mais adequadas têm a maior pontuação de desempenho global, e por convenção são as cores mais escuras.

Figura 4: Resultado com o nível de adequabilidade do solo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 1: Critérios usados no problema.

Critério	Valores	Escala padronizada
Declividade	< 145 m	5
	145 – 285 m	4
	285 – 425 m	3
	425 – 565 m	2
	565 < m	1
Distância	Com rodovia	2
	Sem rodovia	1
NVDI	Alta vegetação	4
	Baixa vegetação	3
	Solo arenoso	2
	Solo rochoso	1
Disponibilidade hídrica	Corpos artificiais de água	2
	Sem corpos artificiais de água	1
Tipo de solo	Solo A	8
	Solo B	7
	Solo C	6
	Solo D	5
	Solo E	4
	Solo F	1
	Solo G	1

Fonte: Elaborada pelos autores.

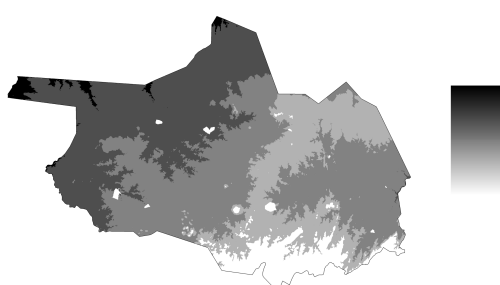
Com base na Figura 4, é conveniente destacar as características das regiões com os maiores níveis de adequabilidade para o correto uso. As zonas mais apropriadas têm a elevação próxima ao nível do mar. Portanto, a baixa altitude em relação ao nível do mar e áreas planas proporcionam condições ideais de desenvolvimento, sendo citados para fins de agricultura e pecuária. Por outro lado, locais que possuem maior grau de inclinação em relação a horizontal, e consistem em cadeias montanhosas (elevações) são menos adequadas para o uso. Também, estes terrenos apresentam características rochosas, dificultando a expansão da agricultura e pecuária.

No tocante aos resultados é relevante a disponibilidade hídrica. Por se tratar de uma região em que há escassez de água, uma atenção maior deve ser enfática para as regiões mais próximas dos corpos artificiais de água. Neste caso, é importante reforçar a implantação de ações de conservação destas reservas hídricas, visando o abastecimento para as demandas necessárias. Estas ações podem ser representadas por políticas de manutenção preventiva, evitando risco de inundações e poluições por aterros localizados em áreas irregulares e não autorizadas.

Outro aspecto que pode ser analisado são as vantagens econômicas e a manutenção do nível de competitividade produtiva para a região. As regiões mais adequadas estão próximas das vias de escoamento, e são visualizadas pelo critério “Distância”. Portanto, há vias de escoamento da cadeia produtiva regional (agricultura e pecuária). Havendo o interesse de políticas públicas que priorizem a manutenção destas rodovias.

Considerando o aspecto compensatório do modelo, é possível fazer uma avaliação completa de toda a região do estudo. A região pode ser dividida em três níveis de adequabilidade. As zonas extremas, como as mais adequadas e as menos adequadas e as áreas intermediárias. Embora, não esteja no escopo deste estudo, para cada nível de adequabilidade poderá haver a identificação de quais ações devem ser implementadas nestas regiões, desde que estejam separadas pelo nível de adequabilidade. Estas ações dizem respeito ao caráter de políticas públicas prioritizadas, como o tipo de cultura agrícola, segmento de pecuária e proteção de áreas ambientais. Para analisar a sensibilidade do resultado, foram realizadas simulações nas constantes de escala de 25% para mais e para menos e são observados na Figura 5 seguinte. Estas mudanças, possibilitam identificar com maior clareza as áreas definidas de acordo com a adequabilidade de uso.

Figura 5: Resultados após as análises de simulação.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3. Discussão

Diante dos resultados, esta seção traz as discussões sobre a pesquisa. Conforme visto anteriormente, um dos desafios sobre a questão da seca no semiárido brasileiro é a implementação de políticas públicas que garantam a produtividade e a qualidade de vida para os habitantes da região.

A construção do sistema espacial de suporte a decisão baseado em SIG-DM, prioriza os locais mais adequados para o correto uso e posterior investimento econômico. Estes investimentos, podem ser traduzidos como a escolha do cultivo agrícola (frutas e hortaliças), manutenção de áreas ambientais e preservação de corpos artificiais hídricos. Também, o planejamento urbano em função do crescimento populacional. Neste último caso, seria de interesse social planejar novas áreas de moradia urbana nos núcleos de cada município, por exemplo.

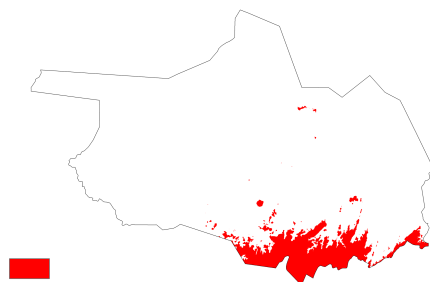
Dito isso, estudos recentes mostraram os tipos de fontes hídricas utilizadas na região do semiárido brasileiro (de Lira Azevêdo et al., 2017) e alternativas de cultivos agrícolas mediante o estresse causado pela ausência de chuvas (Oliveira et al., 2018; Zonta, 2017). Estudos como estes, devem servir de base para criar as políticas públicas que contribuam com o desenvolvimento regional. Além disso, a participação da sociedade junto ao poder público viabiliza o alcance de resultados coletivos, permitindo a participação dos interessados.

O sistema concebido neste estudo foi proposto para atender a necessidade de uma ferramenta com confiabilidade de resultados, para o problema de adequação do solo. Atualmente, outras contribuições semelhantes ao cenário de estudo são verificadas na literatura, usando Inteligência Artificial (Alizadeh e Nikoo, 2018; Behmanesh e Mehdizadeh, 2017; Chantre et al., 2018), também com soluções eficientes. Outro ponto de interesse do SIG-DM é auxiliar os gestores para encontrar resultados com melhores soluções de compromisso, em ambientes que possuem relevância econômica para o Brasil. Em Freitas (1998) e Machiwal et al. (2011), foi

demonstrado esta viabilidade para regiões de seca, mas considerando outro tipo de problema em análise.

Esta pesquisa também contribui por usar um modelo de agregação, produzindo uma única representação (mapa de adequabilidade). Por outro lado, embora possa haver distorções nos resultados pelo caráter compensatório do modelo, estas distorções não foram constatadas nesta pesquisa. Por exemplo, em ambos os resultados alcançados, as regiões que não possuem adequação para uso são semelhantes. Estas áreas possuem cadeias de terreno elevado (variando entre 400 e 590 metros de altitude acima do nível do mar), sendo inviável economicamente estabelecer algum tipo de uso, como pecuária e agricultura, devido a inclinação elevada e terreno acidentado, o que ocasionalmente dificulta o acesso. A Figura 6 mostra em destaque estas regiões.

Figura 6: Destaque para as áreas não adequadas para uso.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por último, destacam-se as vantagens em construir um sistema próprio de decisão espacial. Embora várias plataformas estejam disponíveis (ESRI®, QGIS), esta ferramenta foi desenvolvida para uma finalidade específica. Portanto, optou-se pela concepção e sem fazer uso de outros ambientes fornecidos no mercado. O usuário realiza a manipulação direta dos dados e tem a possibilidade de excluir as regiões que não necessitam de avaliação, pois se conhece previamente a inadequação quanto ao uso do solo. Finalmente, o tratamento considera as unidades matriciais (formato *raster*). Assim, o decisor visualiza um único conjunto de alternativas, diminuindo o seu esforço cognitivo durante a compreensão do problema.

5. Conclusão

O presente estudo buscou a construção de um sistema espacial de decisão para identificar as áreas mais adequadas para o correto uso do solo. Para isto foi considerado uma abordagem multicritério espacial, que permite agregar múltiplas informações e representá-las em uma única medida. Uma aplicação foi feita em uma região pertencente ao estado do Rio Grande do Norte. O sistema ainda não se encontra disponível para o usuário em geral, mas no futuro é esperada esta alternativa.

O sistema espacial baseado em SIG-DM, apresentou resultados eficientes e confiáveis, indicando as zonas mais adequadas, com características propícias para uso na agricultura e pecuária. O sistema pode ser usado por gestores, para apoiar o processo de políticas públicas que minimizem os impactos negativos causados, pelos longos períodos de estiagem na região nordeste do país. Assim, ações relativas a quais áreas devem ser priorizadas quanto ao uso de recursos, redução do impacto ambiental e preservação de bacias hídricas são algumas das vantagens que podem ser alcançadas com os resultados. Como continuidade para pesquisas futuras, a implantação de alternativas que tragam benefícios para as áreas mais adequadas e que estejam associadas a modelos de priorização.

Agradecimentos. Os autores agradecem as contribuições dos revisores, no sentido de melhorar a qualidade e o nível técnico deste trabalho.

Referências

- Alizadeh, M. R. e Nikoo, M. R. A fusion-based methodology for meteorological drought estimation using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, v. 211, p. 229–247, 2018.
- Behmanesh, J. e Mehdizadeh, S. Estimation of soil temperature using gene expression programming and artificial neural networks in a semiarid region. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 2, p. 76, 2017.
- Chantre, G. R., Vigna, M. R., Renzi, J. P. e Blanco, A. M. A flexible and practical approach for real-time weed emergence prediction based on artificial neural networks. *Biosystems Engineering*, v. 170, p. 51–60, 2018.
- Costa, D. D., Pereira, T. A. S., Fragoso Jr., C. R. e Uvo, C. B. Understanding drought dynamics during dry season in Eastern Northeast Brazil. *Frontiers in Earth Science*, 2016. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00069>
- De Feo, G., Cerrato, F., Siano, P. e Torretta, V. Definition of a multi-criteria, web-based approach to managing the illegal dumping of solid waste in Italian villages. *Environmental Technology*, v. 35, n. 1, p. 104–114, 2014.
- de Lima Pereira, J. W., Albuquerque, M. B., Melo Filho, P. A., Nogueira, R. J. M. C., Lima, L. M. e Santos, R. C. Assessment of drought tolerance of peanut cultivars based on physiological and yield traits in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, v. 166, p. 70–76, 2016.
- de Lira Azevêdo, E., Alves, R. R. N., Dias, T. L. P. e Molozzi, J. How do people gain access to water resources in the Brazilian semiarid (Caatinga) in times of climate change? *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 8, p. 375, 2017.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P. A. K. e Toledano, J. Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 61, n. 5, p. 539–547, 1995.
- Ferretti, V. e Montibeller, G. Key challenges and meta-choices in designing and applying multi-criteria spatial decision support systems. *Decision Support Systems*, v. 84, p. 41–52, 2016.
- Figueiredo, C. J. J., e Mota, C. M. M. A classification model to evaluate the security level in a city based on GIS-MCDA. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3534824>
- Freitas, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. *Revista Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 19–30, 1998.
- Goodchild, M. F. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 6, n. 1, p. 31–45, 1992.
- Goodchild, M. F. e Janelle, D. G. (eds.) *Spatially Integrated Social Science*. New York: Oxford University Press, 2004.
- Hamilton, M. C., Nedza, J. A., Doody, P., Bates, M. E., Bauer, N. L., Voyadgis, D. E. et al. Web-based geospatial multiple criteria decision analysis using open software and standards. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 30, n. 8, p. 1667–1686, 2016.

Henriques, H. O., Tavares, E. P., Fortes, M. Z., Malheiros, C. E. M. e Andrade, W. S. Fuzzy inference method applied to georeferenced maintenance management. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 9, p. 4043–4047, 2016.

Heywood, I., Cornelius, S. e Carver, S. *An Introduction to Geographical Information Systems*. New York: Prentice-Hall, 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Áreas Especiais*. 2018a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 20/01/2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Menu do Produto*. 2018b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>. Acesso em: 20/01/2020.

Jankowski, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 3, p. 251–273, 1995.

Jeihouni, M., Toomanian, A., Alavipanah, S. K., Shahabi, M. e Bazdar, S. An application of MC-SDSS for water supply management during a drought crisis. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 187, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4643-y>

Jun, C. Design of an intelligent geographic information system for multi-criteria site analysis. *URISA Journal*, v. 12, n. 3, p. 5–18, 2000.

Karamouz, M., Zeynolabedin, A., e Olyaei, M. A. Regional drought resiliency and vulnerability. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 21, n. 11, p. 1–12, 2016.

Konecny, G. *Geoinformation*. New York: Taylor & Francis, 2003.

Lobo, V. T. C., Silva, T. H. e Ramos, H. S. On the comparison of the social dynamic of large cities through participatory sensing. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 12, p. 2305–2314, 2017.

Machiwal, D., Jha, M. K. e Mal, B. C. Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources Management*, v. 25, n. 5, p. 1359–1386, 2011.

Machiwal, D. e Singh, P. K. Comparing GIS-based multi-criteria decision-making and Boolean logic modelling approaches for delineating groundwater recharge zones. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 12, p. 10675–10691, 2015.

Malczewski, J. e Rinner, C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin: Springer, 2015.

Neves, J. A., Melo, S. B. e Sampaio, E. V. S. B. An index of susceptibility to drought (ISD) for the semiarid Brazilian Northeast. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, p. 177–195, 2016.

Oliveira, F. R. A., Souza, H. A., Carvalho, M. A. R. e Costa, M. C. G. Green fertilization with residues of leguminous trees for cultivating maize in degraded soil. *Revista Caatinga*, v. 31, n. 4, p. 798–807, 2018.

- Palchaudhuri, M. e Biswas, S. Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya District, India. *Natural Hazards*, v. 84, n. 3, p. 1905–1920, 2016.
- Pinheiro, E. A. R., van Lier, Q. J. e Bezerra, A. H. F. Hydrology of a water-limited forest under climate change scenarios: The case of the Caatinga Biome, Brazil. *Forests*, v. 8, n. 3, p. 1-15, 2017.
- Santos, M. G., Oliveira, M. T., Figueiredo, K. V., Falcão, H. M., Arruda, E. C. P. e Almeida-Cortez, J. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 26, n. 1, p. 83–99, 2014.
- Seekao, C. e Pharino, C. Assessment of the flood vulnerability of shrimp farms using a multicriteria evaluation and GIS: a case study in the Bangpakong Sub-Basin, Thailand. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5154-4>
- Sehgal, V. K. e Dhakar R. Geospatial approach for assessment of biophysical vulnerability to agricultural drought and its intra-seasonal variations. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 188, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5187-5>
- Uddameri, V. e Honnungar, V. Combining rough sets and GIS techniques to assess aquifer vulnerability characteristics in the semi-arid South Texas. *Environmental Geology*, v. 51, n. 6, p. 931–939, 2007.
- Xu, J., Yin, X., Chen, D., An, J. e Nie, G. Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 20, p. 51–62, 2016.
- Yatsalo, B. I., Didenko, V., Tkachuk, A., Gritsyuk, G., Mirzeabasov, O., Slipenkaya, V. et al. Multi-criteria spatial decision support system DECERNS: application do land use planning. *International Journal of Information Systems and Social Change*, v. 1, n. 1, p.11–30, 2010.
- Zonta, J. H., Brandão, Z. N., Rodrigues, J. I. S. e Sofiatti, V. Cotton response to water deficits at different growth stages. *Revista Caatinga*, v. 30, n. 4, p. 980–990, 2017.