

GEOPROCESSAMENTO APLICADO NA ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE BREJO, MARANHÃO

Paulo Roberto Mendes **PEREIRA**

Doutorando em Geografia - UNICAMP

p.roberto18@hotmail.com

Francisco Wendell Dias **COSTA**

Doutorado em Geografia - FCT/UNESP

geo.fwcosta@gmail.com

Audivan Ribeiro **GARCÊS JÚNIOR**

Doutorando em Geografia - UFC

audivanribeiro@gmail.com

Resumo: O objetivo deste artigo é analisar e mapear a distribuição das classes de fragilidade ambiental do município de Brejo no estado do Maranhão, utilizando o modelo de análise multicritério AHP, elaborada pelo método da comparação pareada entre as variáveis para a definição dos pesos seguidas de combinação linear ponderada realizadas com uso de sistemas de informações geográficas. Para tanto foi realizada a agregação de dados de declividade, tipos de solos, geologia e cobertura da terra. Os dados foram submetidos a processo de recodificação e inserção de pesos de fragilidade seguindo os parâmetros descritos em Crepani *et al* (2001). Se destaca que a variável declividade apresentou maior peso fatorial, seguido de uso e cobertura da terra, a solos e geologia. O resultado demonstrou que em geral, o município apresenta valores médios e altos para a fragilidade ambiental, principalmente associados as formas de manejo e de cobertura da terra que apresenta em sua maioria áreas voltadas para a agricultura, em combinação com a topografia e tipologias de solos, a geologia pouco interferiu na fragilidade local. Assim ressalta-se a necessidade de um melhor acompanhamento da expansão agrícola do município principalmente associados a processos de desmatamento e substituição dos cerrados, já que a área possui um importante papel na manutenção hidrológica da porção leste do Estado.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental. SIG. Transformações ambientais. Análise multicritério. AHP. Cerrado.

GEOPROCESSING APPLIED IN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF THE CITY OF BREJO, MARANHÃO

Abstract: The objective of this paper is to analyze and map the distribution of environmental fragility classes of the municipality of Brejo in Maranhão state, using the AHP multicriteria analysis model, elaborated by the paired comparison method for the definition of the weights followed by the linear combination. carried out using geographic information systems. For this purpose, slope data, soil types, geology and land cover were aggregated. Data were submitted to recoding process and insertion of frailty weights following the parameters described in Crepani et al (2000). It is noteworthy that the slope variable presented the highest factor weight, followed by land use and cover, to vials and geology. It is noteworthy that in general the municipality has medium and high values for environmental fragility, mainly associated with the forms of management and land cover that presents mostly areas focused on agriculture, in combination with topography and soil typologies, geology had little influence on local frailty. Thus, it is emphasized the need for a better monitoring of the agricultural expansion of the municipality, mainly associated with deforestation and replacement of cerrados, since the area has an important role in the hydrological maintenance of the eastern portion of the state.

Keywords: Environmental fragility. SIG. Environmental transformations. Multicriteria analysis. AHP. Cerrado.

GEOPROCESO APLICADO EN ANÁLISIS DE FRAGILIDAD AMBIENTAL DE LA CIUDAD DE BREJO, MARANHÃO

Resumen: El objetivo de este trabajo es analizar y mapear la distribución de las clases de fragilidad ambiental del municipio de Brejo en el estado de Maranhão, utilizando el modelo de análisis multicriterio AHP, elaborado por el método de comparación por pares para la definición de los pesos seguido de la combinación lineal. llevado a cabo utilizando sistemas de información geográfica. Para este propósito, se agregaron datos de pendiente, tipos de suelo, geología y cobertura del suelo. Los datos se sometieron al proceso de recodificación e inserción de pesos de fragilidad siguiendo los parámetros descritos en Crepani *et al* (2001). Es de destacar que la variable pendiente presentó el mayor factor de peso, seguido del uso de la tierra y la cobertura, a los viales y la geología. Es de destacar que, en general, el municipio tiene valores medios y altos para la fragilidad ambiental, principalmente asociados con las formas de gestión y cobertura del suelo que presentan principalmente áreas enfocadas en la agricultura, en combinación con la topografía y las tipologías de suelo, La geología tuvo poca influencia en la fragilidad local. Por lo tanto, se enfatiza la necesidad de un mejor monitoreo de la expansión agrícola del municipio, principalmente asociado con la deforestación y el reemplazo de los cerrados, ya que el área tiene un papel importante en el mantenimiento hidrológico de la parte oriental del estado.

Palabras clave: Fragilidad ambiental. SIG. Transformaciones ambientales. Análisis multicriterio. AHP. cerrado.

INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e a intensificação dos usos dos recursos sem planejamento prévio promoveram significativas mudanças no ambiente, associados principalmente pela intensidade do uso dos recursos naturais sem levar em consideração a capacidade de resiliência dos sistemas ambientais (LIRA; CÂNDIDO, 2013). A partir da Conferência de Estocolmo e da Rio-92 começaram a se discutir estratégias para mitigação e/ou formas de uso sustentável desses recursos. As agendas ambientais passaram a buscar metodologias voltadas ao monitoramento e os impactos das transformações ambientais que proporcionaram o desenvolvimento de instrumentos, subsidiando diretamente o processo de planejamento e gestão ambiental em nível regional e local (PASSOS, 2013).

O desenvolvimento tecnológico possibilitou o avanço de estudos aplicados para diversas áreas do conhecimento, como: gestão municipal, agronegócios, serviços públicos de saneamento, energia elétrica, telecomunicações, educação, saúde e análise ambiental (LIRA, CÂNDIDO, 2013). Nesse contexto, destaca-se os Sistemas de Informações Geográficas-SIGs, que tiveram sua evolução ligada diretamente a cartografia, em especial a cartografia digital, ganhando grande relevância dentro dos estudos ambientais principalmente pela possibilidade de análise em extensos espaços e com elevada quantidade de variáveis, gerando uma base de dados que poderá subsidiar diversos estudos, permitindo a geração de informações (SANTOS, 2009).

Uma das funcionalidades da aplicação dos SIGs dentro da análise ambiental é a capacidade de agregação de metodologias que possibilitam o conhecimento espacial a partir da teorização (CÂMARA; ORTIZ, 1998). Dentre as diferentes metodologias existentes, a análise hierárquica multicritério - AHP (SAATY, 1987) apresenta um elevado potencial para as pesquisas em análise espacial (PEREIRA, 2017). A Análise Multicritério representa um modelo de avaliação, que possibilita a criação de hierarquias voltadas para a tomada de decisão, constituindo como uma poderosa ferramenta para a elaboração de políticas de planejamento e zoneamento do uso da terra, principalmente a partir da análise da fragilidade ambiental (GOMES; BIAS, 2018).

Diversos estudos utilizaram a AHP como modelo de análise, dentre estes se destacam os de fragilidade ambiental (ADAMIL *et al*, 2012; GOMES, 2015; GOMES, BIAS, 2017; TRAFICANTE, 2017; PEREIRA, 2017), que consiste na análise da capacidade de certos ambientes a suportarem determinada forma de uso, a partir da interação entre as diferentes características, sendo em geral utilizadas formas de cobertura e uso da terra, tipologias

litológicas, solos, padrões de declividade e além de outras informações, com modelos determinísticos, que podem representar uma forma de zoneamento ambiental (MACEDO *et al.*, 2018).

O município de Brejo, localizado no estado do Maranhão, apresentou intensas transformações ambientais associadas a inserção da agricultura mecanizada, com destaque para a monocultura da soja, iniciados no ano 2000, fortalecida pela políticas de expansão do agronegócio do Estado entre os anos de 2007 e 2008 (IBGE, 2017), ocasionando a substituição de extensas áreas de vegetação nativa de Cerrado por sistemas agrícolas (ANDRADE, 1995; ALMEIDA, 2017). De acordo com dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2018), Brejo apresentou as maiores taxas de desmatamento entre os municípios que compõem a microrregião de Chapadinha, com uma taxa de 200 km² de novas áreas (INPE, 2015).

As características ambientais locais com destaque para as condições climáticas sazonais; topografia variando entre plana e suavemente ondulada (0 a 8%) e solos, em geral, arenosos (latossolos e plintossolos) contribuem para elevada fragilidade aliada às formas de uso, necessitando assim de práticas de manejo conservacionistas. Neste contexto, o presente artigo apresenta um modelo de classificação da fragilidade ambiental para o município de Brejo a partir da aplicação da Análise Multicritério, utilizando a técnica de Processo Hierárquico Analítico em ambiente SIG, combinado com o modelo de Combinação Linear Ponderada, integrando os atributos uso e cobertura da terra, pedologia, declividade e geologia.

O modelo multicritério e sistemas de informações geográficas como ferramenta da análise da fragilidade ambiental

De acordo com Sproll e Ross (2004), a fragilidade ambiental está intimamente relacionada com características espaciais de um conjunto de variáveis ambientais e sua análise só é possível a partir de ferramentas que as abordem de maneira integrada. Neste contexto, destacou-se a necessidade de uso de sistemas capazes de modelar a informação, denominados de Sistemas de Informação Geográfica - SIG por Goodchild (1992).

Matias (2001) ressalta que os primeiros Sistemas de Informações Geográficas surgiram na década de 1960, no Canadá, como parte de um esforço governamental para criar um inventário de recursos naturais. Longley *et al.* (2013) destacam que a partir de 1980, os SIG's apresentaram grande evolução, com destaque a sua interface, e capacidade de

processamento, implementados por sistemas matemáticos e lógicos voltados para a cartografia, ligados principalmente a queda no preço dos computadores e a formação inicial de um mercado que passou a sustentar a indústria de *software*.

A base de qualquer Sistema de Informação Geográfica é o modelo de dados, que é um conjunto de construtores para representar objetos e processos no ambiente digital do computador. Para Rosa (2009), a evolução dos SIGs esteve diretamente ligada às atividades de Geoprocessamento, sendo em muitos casos tratados como sinônimo, mesmo sendo atividades distintas. Para Longley *et al* (2013) os Sistemas de Informação Geográfica são sistemas computacionais feitos para armazenar e processar informação geográfica, voltados a melhorar a eficiência e efetividade dos tratamentos espaciais de dados.

Pereira (2017) destaca que a partir de 1990, com a melhora das ferramentas computacionais, houve crescimento do uso dos SIGs dentro das análises geográficas associado, principalmente, a sua capacidade de análise e tratamento de grande quantidade de dados, contribuindo consideravelmente para ampliação de estudo do espaço geográfico, gerando novos conhecimentos do território e das variáveis atuantes na dinâmica de transformação do espaço produzido pelo homem.

Matias (2001) afirma que, com a evolução tecnológica se ultrapassou as barreiras existentes nas formas de representação espacial, originando a base da Ciência da Geoinformação, na qual deve-se debater questões teóricas e práticas fundamentais dos usos Sistemas de Informações Geográficas, e tendo como abordagem central a representação dos fenômenos geográficos, modelos e estruturas de dados, apresentação dos dados geográficos e a natureza dos instrumentos analíticos.

Para Mennecke e Crossland (1996), os SIGs apresentam uma grande capacidade de manipular dados geográficos a partir de diferentes técnicas e modelos e permitem a produção de mapas, com digitalização em papel. A geração de mapas pode ser baseada em fotografias aéreas ou imagens de satélite e a coleta de coordenadas de mapas usando técnicas de levantamento topográfico ou Sistemas de Posicionamento Global (GPS), técnicas que popularizaram o uso dessas tecnologias no âmbito estatal, principalmente para atividades de planejamento e gestão.

Nesse contexto, destaca-se a Análise Decisória Multicritério - MDA como modelo de tomada de decisão. A MDA é uma técnica de modelização muito utilizada em ambiente SIG, principalmente por sua fácil implementação e por permitir a comparação de diferentes planos de informações e possibilidade de elaboração de cenários, utilizando critérios que permitem a tomadas de decisão (TRAFICANTE, 2016).

Certo (2005, p. 123) apresenta a tomada de decisão como “ o processo de escolha da melhor alternativa”, já Robbins (2010) e Maximiano (2009) afirmam que a tomada de decisão corresponde a um processo ligado a resolução de problemas na qual se tem como foco uma avaliação do estado atual e a partir de parâmetros ajustáveis se busca estado desejável das coisas.

Dentre as diferentes técnicas de tomadas de decisão se destaca a AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Criada por Saaty (1980), a AHP tem como objetivo agrupar em níveis hierárquicos o conjunto de variáveis formados a partir de uma matriz quadrada, na qual os elementos são comparados entre si, considerando o grau de importância que cada um representa diante do grupo. Cada julgamento representa a dominância de um elemento da coluna à esquerda sobre um elemento na linha do topo, formando assim um padrão hierárquico.

A ideia central da teoria da análise hierárquica introduzida por Saaty, é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações aos pares (PEREIRA, 2017). A utilidade do método realiza-se no processo de tomada de decisões, minimizando suas falhas e assim determinado a intensidade de importância, que apresenta a escala de comparações empregadas no método, indicando a constante de importância e a hierarquia empírica entre elas, utilizando a intensidade de importância usando a escala de 1-9 conforme descrito por Saaty (1980) (tabela 1)

Tabela 1: Matriz de comparação

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	na importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

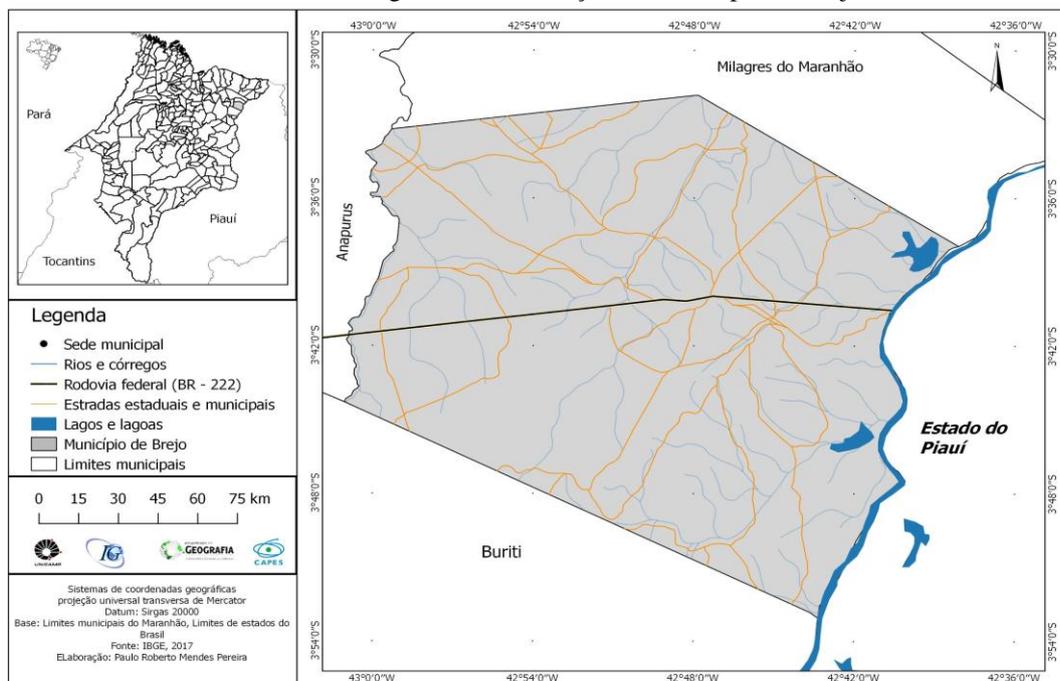
Fonte: adaptado de Saaty, 1980.

Mesmo apresentando caráter empírico na definição de importância entre os pares, o modelo de comparação da AHP é avaliado a partir de critérios técnicos conforme descritos por Crepani *et al.* (2001), que podem ser facilmente combinados com o banco de dados em ambiente SIG, resultando nos sistemas ou modelos de apoio à tomada de decisões espaciais ou DSS. Segundo Keenan (2006), são sistemas ou modelos baseados em dados espaciais utilizados para o suporte a decisões. Traficante (2017) destaca que a AHP tornou-se uma ferramenta empregada em uma gama de estudos relacionados à análise e planejamento ambiental, incluindo a definição de áreas prioritárias para a conservação, buscando a adequação e redução dos impactos ambientais

CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BREJO

O município de Brejo (figura 1)) possui extensão territorial de 1.074 km², localizando-se na porção leste do estado do Maranhão nas coordenadas: 43° 0'19.18"O; 42°40'7.96"O e 3°53'14.07"S, 03° 18' 22"S, limitando-se ao norte com o município de Milagres do Maranhão, ao sul com o município de Buriti, ao leste com o município de Anapurus e a oeste com o município de Matias Olímpio-PI (IBGE, 2017).

Figura 1 – Localização do Município de Brejo



Fonte: adaptado de IBGE, 2015.

Brejo apresenta população de 33.359 habitantes, densidade demográfica de 31,04 hab/km²; 63% população reside na zona rural do município. Apesar de possuir baixa população urbana (37%), o município apresentou crescimento populacional urbano de aproximadamente 68% entre os censos de 2000 e 2010. A economia do município é basicamente agrícola, tendo a monocultura da soja como principal produto, destinado à exportação (IBGE, 2011).

O município de Brejo apresentou, em 2016, o Produto Interno Bruto de R\$ 6.392,68, entretanto apresenta elevada desigualdade social, com IDHM de 0,562, em 2010; possui, aproximadamente, 55% da população vivendo com até 1 salário mínimo, que vivem da agricultura de subsistência, de comércio informal etc.; 94% da população apresentou entre 5 e 14 anos de estudo; já o acesso a infraestrutura é altamente deficitário, com apenas 18% dos domicílios com acesso à rede de esgoto e 30% com acesso ao abastecimento de água (IBGE, 2011).

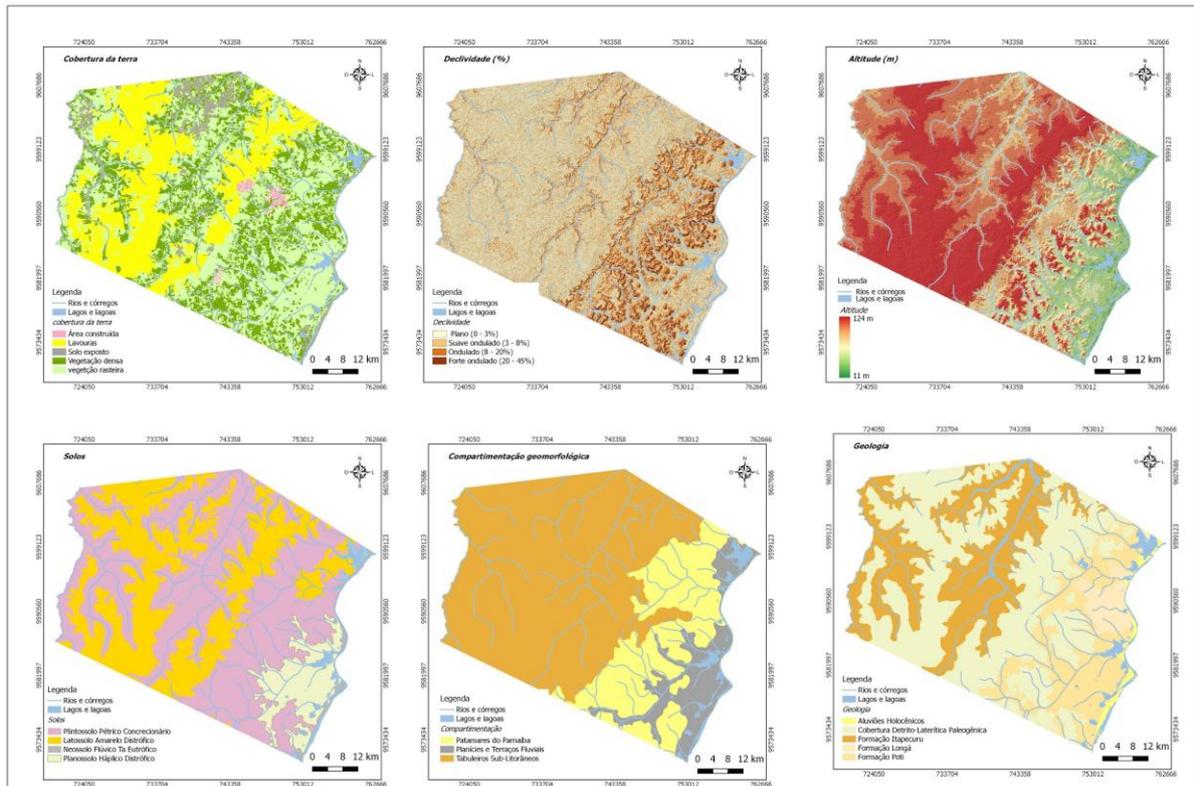
Quanto às características ambientais, Brejo apresenta embasamento geológico de características sedimentar pertencentes a bacia do Parnaíba, formado por depósitos detrítico-lateríticos compostos por lateritos imaturos (petroplintitas) ferruginosos, areia e argila; arenitos de estratificação cruzada texturas finas a grosseiros, argilosas e intercalações de argilitos e siltitos do Grupo Itapecuru; arenitos esbranquiçados, de intercalações de silte, com folhelhos cruzados da formação Longá; já nos leitos dos canais intermitentes se destaca a presença de depósitos aluvionares recentes onde se destaca a presença de arenitos e argilas friáveis (BATISTELA *et al.*, 2013).

O clima da área é subúmido seco, com temperaturas acima dos 31°C e umidade relativa do ar em torno dos 75%, apresentando chuvas sazonais de janeiro a junho com acumulado anual de variando entre 1200 e 1500 mm (BATISTELA *et al.*, 2013). O relevo da área de estudo apresenta variação altimétrica entre 15 e 128 metros, formada por feições tubuliformes de topografia planas (0 a 3%) intercaladas por vales e terraços fluviais e colinas de topos côncavos com declividade variando entre 8 a 20%. Apresenta 80% do território com solos do tipo Plintossolos, formados por minerais hidromórficos de textura média e argilosa de restrição à percolação d'água; já os topos dos tabuleiros predominam os Latossolos Amarelos e manchas de neossolos nas proximidades dos cursos d'água (IBGE, 2011).

A vegetação predominante é típica do Cerrado com árvores espaçadas de média altura e com troncos retorcidos, predominando os chamados carrascos, campos cerrados, cerrados e capão (BRASIL, 2013). A hidrografia é caracterizada por um conjunto de córregos, rios e lagos, em duas bacias hidrográficas: Parnaíba e o Rio Munim, porém apresenta um conjunto

de sub-bacias que apresentam importância local, com destaque para o rio Preto, rio Magu, e rio Buriti que apresentam suas nascentes no limite municipal de Brejo (CPRM, 2011) A figura 2 apresenta a espacialização dos condicionantes ambientais encontrados no limite de Brejo.

Figura 2 – Características ambientais de Brejo - MA



Fonte: Adaptado de IBGE, 2013; EMBRAPA, 2013

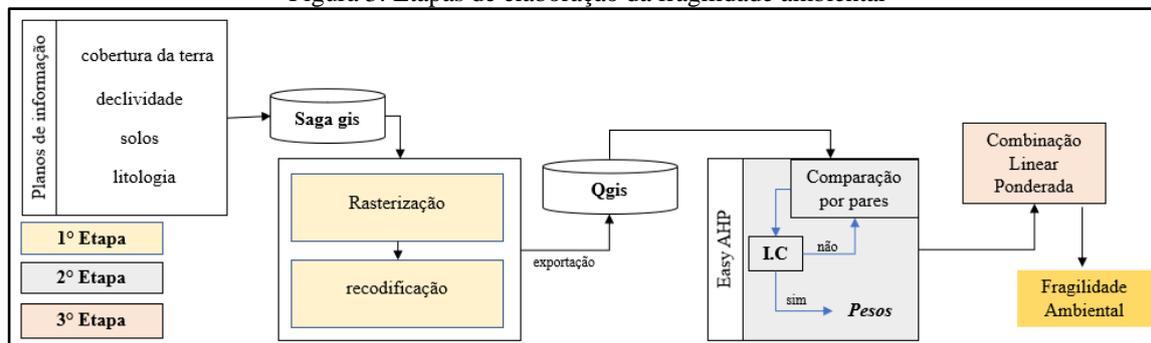
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A análise da fragilidade ambiental do município de Brejo foi elaborada a partir do modelo de análise hierárquica ponderada multicritério AHP, utilizando os procedimentos descritos em Macedo *et al.* (2017). Todas as informações cartográficas necessárias foram preparadas em ambiente de geoprocessamento, com informações georreferenciadas, utilizando o programa Saga Gis[®] e Qgis 2.18.8[®].

Foram utilizados dados em formato vetorial referentes a: litologia e solos na escala de 1:250.000 (IBGE, 2013), cobertura da terra escala de 1:250.000 (EMBRAPA, 2017); dados de declividade da vertente originados do Zoneamento Ecológico Econômico do Maranhão compilados na escala de 1.250.000 (MARANHÃO, 2018). A Figura 3 apresenta o

organograma metodológico utilizado para a análise da fragilidade ambiental do município de Brejo.

Figura 3: Etapas de elaboração da fragilidade ambiental



Fonte: Dados de pesquisa, 2019.

Para tornar possível a integração desses mapas, foi necessário fazer a sua padronização de maneira que ficassem em uma mesma escala de valores. Para tanto inicialmente foi realizado o processo de transformações dos dados vetoriais para formato matricial, utilizando a ferramenta *vector to raster*, após a rasterização os dados foram recodificados com base em limites pré-definidos utilizando os operadores *or e and* associados a valores de fragilidade ambiental, segundo a classificação de Crepani *et al.* (2008) (Quadro 1).

Quadro 1: Valores de reclassificação da fragilidade ambiental.

Nível de fragilidade	Valores	R	G	B	
Estável	1.0 – 1.3	254	240	217	
Baixa	1.3 - 1.9	253	204	138	
Média	1.9 - 2.4	252	141	89	
Alta	2.4 – 2.7	227	74	51	
Muito alta	2.7 – 3.0	179	0	0	

Fonte: Adaptado de Florezzano, 2008.

Crepani *et al.* (2001) baseados nos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977) desenvolveu uma escala de vulnerabilidade, levando em consideração a caracterização morfodinâmica do local. Para tanto, são utilizados como critérios: os meios estáveis, meios intergrades e meios meios fortemente instáveis, que culminaram na elaboração de um ‘modelo’ com valores de (ins)estabilidade capaz de avaliar, de forma empírica e relativa, o estágio de evolução das categorias ou unidades territoriais. O quadro 2 apresenta os valores de fragilidade atribuídos segundo o modelo de classificação para o município de Brejo-MA.

Quadro 2 – Valores de recodificação para os planos de informação

Classe de uso	Valor	Classe de solo	Valor
Área construída	1.5	Plintossolo petricos	3.0
Soja	2.7	Latossolo amarelo	1.0
Solo exposto	3.0	Neossolo flúvico	3.0
Vegetação densa	1.1	Planossolos háplicos	3.0
Vegetação rasteira	1.4		

Classe de litologia	Valor	Classe de declividade	Valor
Aluviões holocênicos	3.0	Plano	1.0
Formação Itapecuru	1.9	Suave ondulado	1.6
Cobertura dentrito-lateríticas	3.0	Ondulado	2.5
Formação Longá	2.5	Forte ondulado	2.6
Formação Potí	2.5		

Fonte: Dados de pesquisa, 2019.

A matriz de comparação pareada foi criada utilizando a ferramenta Easy AHP disponível no software Qgis 2.18.10[®], onde é realizado os julgamentos de importância entre as variáveis utilizadas, sendo calculado também o índice de consistência – I.C, a razão de consistências R.C e a índice randômico. O IC indica o grau de interação entre as variáveis, sendo calculado a partir da seguinte equação:

$$I.C = (\lambda_{max} - n) / (n - 1).$$

Onde **n** é a quantidade de variáveis inseridas na matriz de análise hierárquica e **λmax** é dado pela divisão da matriz de ponderação do autovalor pela ponderação da média geométrica do auto vetor.

Já a RC indica a potencial aceitação do modelo AHP, sendo estes aceites valores inferiores a 0,1, para tanto foi utilizado a seguinte equação:

$$R.C = I_c / I_r$$

Onde, **I_r** se refere-se ao índice randômico para a quantidade de elementos n utilizados na ponderação. Saaty (1991) propõe uma tabela (Tabela 2) com os índices randômicos de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório, que desmontaram para a elaboração de uma AHP a necessidade de mais de duas variáveis para a elaboração da hierarquização.

Tabela 2 - Valores de índices randômicos para o número de variáveis

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

O mapa final foi gerado pelo método da Combinação Linear Ponderada, através da análise integrada dos dados disponíveis sobre a área em estudo, segundo os critérios e pesos estabelecidos pela AHP, utilizando a calculadora raster do Qgis, sendo elaborada pelo produto da soma dos planos de informação pelo seu peso, seguindo a equação:

$$Fr = \sum(V1 * p1) + (V2 * p2) + (V3 * p3) + \dots (Vn * pn).$$

Onde $V1, V2, V \dots Vn$ indica os planos de informações; e $p1, p2, p3 \dots pn$ os pesos associados a cada variável.

O mapa final de fragilidade ambiental foi reclassificado para melhor avaliar a relação das características e restrições quanto ao uso, sendo definidas cinco classes de prioridades: Estável, Baixa, Média, Alta e Muito Alta. Essas classes significam o nível de importância e prioridade, em que as classes média, alta e muito alta possam ser contemplados por ações que visam favorecer práticas de manejo de uso de forma adequada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de fragilidade ambiental aplicada ao município de Brejo como descrito na metodologia considerou as características pedológicas, clinográficas (declividade de vertente) e litológicas comparando-as com as formas de uso e cobertura da terra. Os planos de informação contribuíram com pesos diferenciados no processo final de decisão das classes de fragilidade, onde se estabeleceu uma hierarquia, de acordo com a importância de cada fator para a área.

Foram testadas três hipóteses de importância entre as variáveis, sendo a com melhor nível de confiança escolhida, com destaque para as variáveis solos, declividade e cobertura da terra com igual importância valor 1. Observou-se também a cobertura da terra e solo ligeiramente de maior importância quando comparadas a litologia (valor 3) e a declividade claramente de maior importância em relação a litologia (valor 5) (Tabela 3)

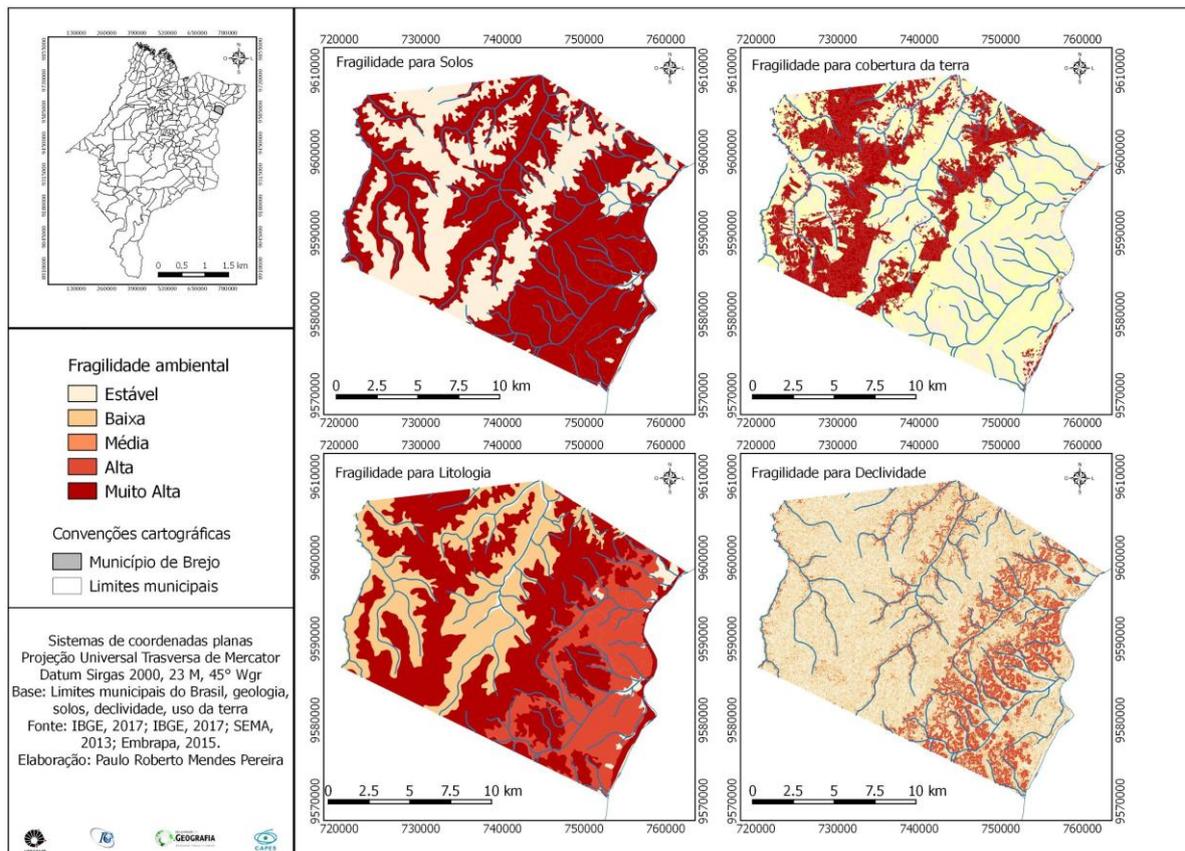
Tabela 3: matriz de comparação pareada da AHP para Brejo

	Cobertura da terra	Declividade	Solos	Litologia
Cobertura da terra	1	1	1	2
Declividade	1	1	1	5
Solos	1	1	1	
Litologia	0.333	0.2	0.333	1

Fonte: Dados de pesquisa, 2019.

É importante destacar que as composições da análise das variáveis apresentaram *razão de consistência* de 0.012, que indica que os valores de comparação entre os fatores foram gerados aleatoriamente, portanto, não houve a necessidade de reorganização da matriz estando dentro dos padrões que validam a análise. Em relação aos pesos atribuídos, destaca-se a declividade, que apresentou valor de 0.344, cobertura da terra com (0.324), solos (0.242) e litologia (0.085). A figura 4 apresenta as características de fragilidade após a recodificação das variáveis elaboradas dentro do modelo de fragilidade ambiental.

Figura 4 - Variáveis recodificadas para a caracterização da fragilidade



Fonte: Dados de pesquisa, 2019.

Desse modo, o mapa de fragilidade ambiental natural, apresenta como variáveis os dados geológicos, pedológicos, clinográfico e cobertura do solo integradas favorecem a ocorrência de áreas com maior restrição quanto ao avanço da fronteira agrícola no município. Os solos apresentaram classes muito alta, abrangendo 70% do município, com predomínio dos plintossolos, neossolos e planossolos. O fator cobertura da terra constitui importante elemento nos estudos de fragilidade ambiental, na medida em que a cobertura vegetal fornece proteção ao solo contra os processos erosivos, desse modo 63% da área é caracterizado como

alta e muita alta fragilidade, principalmente em setores com solo exposto e com emprego do monocultivo da soja, e de pastos, que possibilita elevada perda de solo para o local.

Quanto a declividade, destaca-se que 72% do município se enquadra como área estável, principalmente pelo predomínio de áreas planas e suavemente onduladas (0 e 8%); já a litologia se destacou o predomínio das classes alta e muito alta em 57% do município, nas áreas compostas por arenitos e argilitos inconsolidados, com destaque para as coberturas lateríticas e aluviões holocênicos. Apesar de apresentarem pesos fatoriais aproximados, a componente declividade apresentou maior importância na matriz, indicando que os níveis topográficos e as formas de manejo associados a proteção do solo pela presença de cobertura vegetal influenciam diretamente em maior grau de fragilidade ambiental do local,

É possível perceber que as áreas *estáveis* apresentaram a menor porção dentro do município, com área territorial de aproximadamente de 9,12 km², representando menos de 1% da área estudada. Essa classe é representada por setores com presença significativa de corpos d'água a exemplo de lagoas e do rio Parnaíba, porém é importante destacar que estes setores são extremamente suscetíveis mudanças ambientais em seu entorno, principalmente a processo de assoreamento.

Os ambientes classificados como *baixa fragilidade* ambiental apresentou área aproximada de 194,87 km², compartimentando a terceira maior classe em área. Esses setores são caracterizados por cobertura vegetal de porte arbóreo e arborescente; a declividade varia entre plana e suavemente ondulada, predominando nos vales entalhados pelos canais fluviais presentes no local; destaca-se a predominância de plintossolos, solos extremamente frágeis as formas de manejo, com cobertura vegetal nativa e ausência de atividade agrícolas.

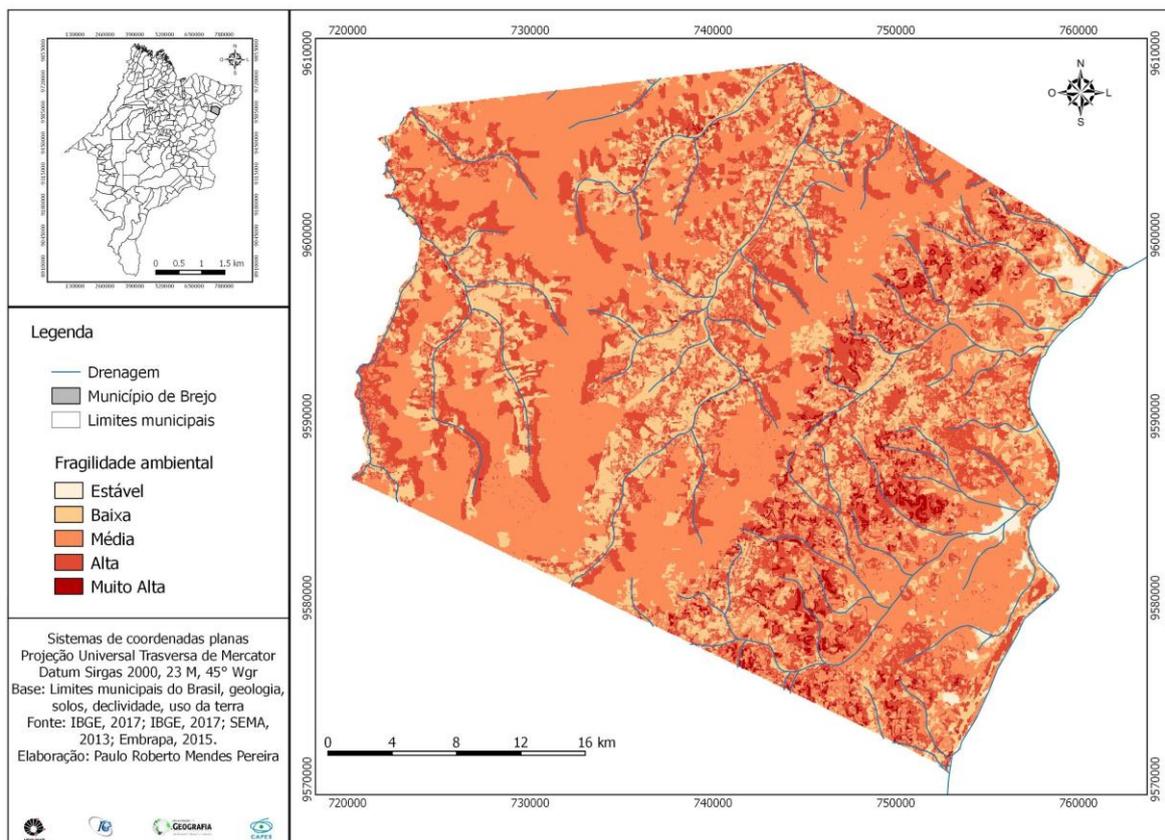
A classe de *Média fragilidade* apresentou área de 557,15 km², que representa mais de % do território municipal, estando diretamente relacionada às características de topográficas e atividades agrícolas desenvolvidas no local. Essa área apresentou ausência de cobertura vegetal associadas às intensas substituição para práticas agrícolas; mostrou predomínio de latossolos (com menor nível de fragilidade), declividade planas a suavemente ondulada e topográfica variando entre 45 a 75 metros de altitude. Nessa classe se destaca a intensa atividade agrícola para a produção de grão intensificadas a partir do ano de 2005 (IBGE, 2017).

As áreas classificadas com *alta fragilidade* correspondem a segunda maior classe de fragilidade ambiental localizada no município, com área de aproximadamente 28,63 km², um representativo de 26% do limite territorial do município, predominando principalmente na porção noroeste do município. Estão associadas ao grande percentual de cobertura vegetal

apresentada nas vertentes das superfícies colinosas, com vertentes de declividade moderadamente baixa (8 a 35%), presença de plintossolos e altitude moderadamente elevada, apresentando significativos usos para pastagens.

A classe Fragilidade *Muito Alta* apresentou 29,81km², que representou aproximadamente 2,77% da área, apresentando como característica baixa densidade de vegetação, predominando as áreas de campestres com mesclas de vegetação arbustivas e arborescentes, declividade variando entre ondulada e forte ondulada; os solos são medianamente frágeis principalmente plintossolos e planosolos; há presença marcante de solo “nu”, que facilitam a atividade de morfogênese, com destaque principalmente nas bordas dos tabuleiros e nas vertentes de feições colinosas. O mapa da Figura 5 apresenta a espacialização das classes de fragilidade ambiental do município de Brejo a partir do modelo AHP pelo método da combinação linear ponderada.

Figura 5 -Fragilidade Ambiental do Município de Brejo - MA



Fonte: Dados de pesquisa, 2019.

É importante destacar que as áreas com fragilidade caracterizada como Média, Alta e Muito Alta representam aproximadamente 75% do limite territorial do município de Brejo,

que representa mais de 800 km², e foram caracterizadas por apresentarem elevada fragilidade dos solos, principalmente pelas suas formas de manejo que em combinação com as condições topográficas tende a sofrer elevadas taxas de morfogênese, compactação ou perdas de solo.

Já as áreas estáveis e com baixa fragilidade apresentaram o menor percentual de área para o município, representadas por áreas de relevo plano, baixa altitude e com cobertura vegetal de porte denso e predomínio de plintossolos. Essa classe de fragilidade predomina principalmente nos vales e em setores onde a prática agrícola ainda não ocorre de maneira intensa, ligado a áreas com áreas de preservação permanentes de cursos de águas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do modelo AHP em associação com SIG's se mostrou uma eficaz ferramenta no mapeamento da fragilidade ambiental, com grande aplicabilidade no processo de gestão e ordenamento territorial. É importante destacar que a AHP tende a generalizar o processo analítico e, em alguns casos, esconder singularidades, que está associado a escala do estudo (1:250.000). Porém, a necessidade de melhoria na escala de trabalho, ainda ausente para o estado do Maranhão, dificulta a confiabilidade das fontes de dados utilizadas.

Esse modelo proporcionou a identificação de áreas suscetíveis a processo de degradação ambiental associada a atividades antrópicas, tal como ocorre no município de Brejo, que tem atividades econômicas ligadas a substituição da vegetação de cerrado por cultivos de soja.

A combinação entre as formas de cobertura, solos e declividade ocasiona ao município elevada fragilidade ambiental, somadas às classes média, alta e muito alta indica a necessidade de melhor política de parcelamento e uso do solo municipal, bem como controle nas taxas de desmatamento do cerrado do município, haja vista que o município apresenta em seus limites importantes áreas de recarga dos lençóis freáticos para as sub-bacias hidrográficas dos rios Preto, Buriti e Magu, necessitando assim de um maior planejamento quanto a expansão de áreas agrícolas em seus limites cerrado.

Trabalho enviado em março de 2019

Trabalho aceito em agosto de 2019

REFERÊNCIAS

- ADAMIL, S. F.; COELHO, R. M.; CHIBA, M. K.; MORAES, J. F. L. de. **Environmental fragility and susceptibility mapping using geographic information systems: applications on Ribeirão do Pinhal watershed (Limeira, State of São Paulo)**. Acta Scientiarum Technology. Maringá: v. 34, n. 4, p. 433-440, oct./dec., 2012.
- ALMEIDA, J. G. **A luta na/pela terra frente à expansão da soja no município de Brejo – MA**. São Luís: Dissertação (Mestrado em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço) – Universidade Estadual do Maranhão, 2017.
- ALVES, R.J.V. & KOLBEK, J. **Can campo rupestre vegetation be floristically delimited based on vascular plant genera?** *Plant. Ecol.*: 2010. p. 67-79.
- ANDRADE, M. de P. A produção do carvão vegetal e o plantio de eucalipto no leste maranhense. In: CONCEIÇÃO, F. G. (org.). **Carajás: desenvolvimento ou destruição?** São Luís: CPT, relatórios de pesquisa, 1995.
- BATISTELLA, M. BOLFE, E. L.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; ARAÚJO, L. S. **Relatório do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão**. Campinas, SP: Embrapa, 2013.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Base de cobertura vegetal do estado do Maranhão 1:250.000**. 2013. Disponível em: www.i3geo.com.br/coberturavegetal/shp/. Acesso em 27/06/2018
- CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. **Sistemas de informações geográficas para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral**. In: SILVA, M. **Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998.cap. 2, p. 59-88.
- CERTO, S. C. **Tomada de decisões**. In: **Administração moderna**. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2005. cap. 7, p. 123-145.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Relatório diagnóstico do município de Brejo**. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T & BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; PALMEIRA, A. F.; SILVA, E. F.. **Zoneamento Ecológico-Econômico**. In: FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2008. cap. 10, p. 285-318.
- DONHA A. G., SOUZA, L. C. DE P., SUGAMOSTO, M. L., **Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG**. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 1, p. 175-181, Campina Grande, PB, 2006.
- EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Base de Dados de Pesquisa Agropecuária. 2013. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/embrapa>. Acesso em: 27 de novembro de 2018.
- FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GOODCHILD, M. **Geographical data modeling**. *Computers & Geosciences*,18(4): 401-408, 1992.

GOMES, R. de C. **Integração dos métodos AHP e SIG como instrumento de análise do nível de qualidade ambiental em bacias hidrográficas**: estudo de caso bacia do rio Melchior-DF. Brasília: Dissertação de mestrado em Geociências, IGA, 2015.

GOMES, R. de C; BIAS, E. S. **Integração do método AHP e SIG como instrumentos de análise do nível de conservação ambiental em bacias hidrográficas**. São Paulo: Revista de Geociências, v 37, p. 167-182, 2018.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Município de Brejo**. 2011. Disponível em: <www.ibge.br/cidade/brejo>. Acesso em: 25/07/2018.

_____. **Produção Agrícola municipal**: Lavoura temporária de 1990 a 2017. 2017, Disponível: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612#resultado>>. Acesso em: 21/08/2018

_____. **Mapa geológico do Maranhão**. 2013. Disponível em: <www.ibge.br/geociencias/downloads/geologia>. Acesso em: 25/07/2017.

_____. **Mapa pedológico do Maranhão**. 2013. Disponível em: <www.ibge.br/geociencias/downloads/solo>. Acesso em: 25/07/2017.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Programa de monitoramento do Biomas Brasileiros – Probio**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/cerrado/>>. Acesso em 24/06/2018.

KEENAN, P. B. **Spatial decision support systems: a coming of age**. *Control and Cybernetics* 35(1): 9-27, 2006.

LIRA, W. S; CÂNDIDO, G. A. **Gestão sustentável dos recursos naturais**: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, 2013.

LONGLEY, P. A; GOODCHILD, M. F; MAGUIRE, D. J; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Porto Alegre: Bookman, 3 ed. 2013.

MACEDO, D. R; HUGHES, R. M; KAUFMANN, P. R; CALLISTO, M. **Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome**. *In: Science of the Total Environment* p. 1267-1279, 2018.

MARANHÃO, GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO. INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS. **Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão**. Disponível em: <<http://www.zee.ma.gov.br/Portal/basededados>>. Acesso em: 28 de novembro de 2018.

MATIAS, L. F **Sistema de Informações Geográficas (sig)**: teoria e método para representação do espaço geográfico. São Paulo: Biblioteca da Universidade de São Paulo, tese de doutorado em Geografia, 2001.

MAXIMIANO, A. C. A. **Introdução à Administração**. Ed. Compacta. São Paulo: Atlas, 2009. 294p.

MENNECKE, B. E; CROSSLAND M. D. **Geographic Information Systems**: Applications and Research Opportunities for Information Systems Researchers. Hawaii: Proceedings of the 29th Annual International Conference on System Sciences, 1996.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. O Bioma Cerrado, 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em: 27/03/2017.

PASSOS, M. M. **Paisagem e meio ambiente**. Maringá: EDUEM, 2013.

PEREIRA, P. R. M. **Análise das alterações de cobertura da terra do município de Brejo a partir processamento digital de imagens e sensoriamento remoto**. Trabalho de conclusão de curso especialização em Geoprocessamento. Minas Gerais Pucminas virtual, 2017.

ROBBINS, S. Comportamento organizacional: teoria e prática no contexto brasileiro. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 633p.

ROSA, R. Introdução **ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: EDUFU, 7 ed, 2009.

ROSS, J. L. S. **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados**. In: Revista do Departamento de Geografia nº8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill International, 1980.

_____. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP, 1991.

SAATY, R. W. **The analytic hierarchy process-what it is and how it is used**. Mathematical Modelling, vol. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SANTOS, C. **Cartografia ambiental e planejamento territorial urbano**. Revista Patrimônio: lazer e turismo. Santos: Universidade Católica de Santos, v. 6, n. 7, p. 40-74, 2009.

SPORL, C.; ROSS, J. L. S. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. In: GEOUSP: Espaço e Tempo, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

TRAFICANTE, D. P. **Fragilidade ambiental da APA Corumbataí botucatu-Tejupá (perímetro Botucatu, SP, Brasil) na bacia hidrográfica do rio Capivara**. Rio Claro: PPGAGRO, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Tese de doutorado em Agronomia), 2016.

TRAFICANTE, D. P.; CAMPOS, S.; MANZIONE, R. L.; RODRIGUES, B. T. **Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capivara, Botucatu-Sp**. In: Revista Energia na Agricultura, Volume 33, 2017.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977.