

17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

POTENCIAL À EROSÃO LAMINAR DA ILHA DO MARANHÃO - BRASIL

Iris Celeste Nascimento Bandeira ¹
Raimundo Almir da Costa Conceição ²
Luciana Souza Brabo ³

Resumo – A erosão dos solos é um fator natural, que pode ser agravado pelo uso inadequado do território, causando problemas socioambientais. Assim, com a finalidade de colaborar para um planejamento urbano mais adequado, este trabalho tem como objetivo elaborar um mapa de potencial erosivo dos solos, por meio de dados de formações superficiais, solo, declividade, relevo, chuva e uso do solo, fazendo uso da análise multicritério, apoiada na Análise de Processos Hierárquicos (AHP). Os resultados apontaram que 33% da Ilha apresenta potencial alto a muito alto, principalmente por ter várias áreas com solos expostos de alta erodibilidade, onde se formaram várias feições erosivas como sulcos e principalmente ravinas. As áreas com potencial moderado representam 32% e 35% com potencial baixo, representadas por regiões de declividades baixas e com presença de cobertura vegetal. Os resultados encontrados podem subsidiar ações para o planejamento ambiental e a proposição de políticas públicas voltadas à gestão territorial.

Abstract - Soil erosion is a natural factor, which can be aggravated by inappropriate use of the territory, causing socio-environmental problems. Thus, in order to contribute to a more adequate urban planning, this work aims to prepare a map of soil erosion potential, through data on surface formations, soil, slope, relief, rain and land use, making use of the multi-criteria analysis, supported by the Analysis of Hierarchical Processes (AHP). The results showed that 33% of the Island has high to very high potential, mainly because it has several areas with exposed soils of high erodibility, where several erosive features such as furrows and mainly ravines were formed. Areas with moderate potential represent 32% and 35% with low potential, represented by regions with low slopes and vegetation cover. The results found can support actions for environmental planning and the proposition of public policies aimed at territorial management.

Palavras-Chave – AHP, Suscetibilidade, Cartografia Geoambiental, Planejamento territorial.

¹ Geóloga, Mestre, Serviço Geológico do Brasil, (51) 91-981636365, iris.bandeira@cprm.gov.br

² Geólogo, Mestre, Serviço Geológico do Brasil, (51) 91-980631183, raimundo.conceicao@cprm.gov.br

³ Engenheira Agrônoma, Mestre, Serviço Geológico do Brasil, (51) 91-981479364, luciana.brabo@cprm.gov.br

1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um processo modificador e modelador da paisagem, que tem causas naturais, mas que é intensificada por atividades antrópicas, associada principalmente ao uso desordenado do solo. No Maranhão esses processos erosivos se intensificaram com o desmatamento frequente para implementação de atividades econômicas, principalmente no período referente aos grandes projetos da década de 80 (Pinto e Conceição, 2009). Na Ilha de São Luís, muitas pessoas ocuparam áreas suscetíveis à erosão, como bordas de ravinas, sem que houvesse um planejamento territorial, provocando assim problemas socioambientais e originando as áreas de riscos (CONCEIÇÃO et al., 2017).

Guerra e Marçal (2006) apontam que a combinação do crescimento populacional com a ocupação de novas áreas, assim como a exploração de novos recursos naturais, tem causado uma pressão cada vez maior sobre o meio físico. Dessa forma a degradação do solo acontece de forma natural ou acelerada pelo uso e exploração inadequada de seus recursos.

Muitos trabalhos têm sido realizados na ilha do Maranhão direcionados a investigação do potencial erosivo de determinadas áreas degradadas, principalmente daquelas que são produtos da erosão urbana e que apresentam feições erosivas, como ravinas e voçorocas. Tais estudos, abordam o cadastramento e monitoramento dessas feições como Furtado et al. (2004), Pinto e Conceição (2009) e Santos (2014), aspectos geotécnicos como os trabalhos de: Sathler et al. (2009), Lisboa et al. (2015) e Souza et al (2017), trabalhos com foco multidisciplinar como o de Oliveira e Araújo (2019) e Bandeira et al (2018). Assim como erosões que estão associadas a área de risco como o trabalho de Conceição et al. (2017). A partir desses trabalhos muitas feições erosivas, com o destaque para as voçorocas, foram identificadas na ilha do Maranhão.

Segundo Zuquete (1987), Moreira e Pires Neto (1998), Iwasa e Fendrich (1998), Florenzano (2008), a vulnerabilidade ou suscetibilidade a erosão está condicionada aos seguintes atributos como: solo, geologia/formações superficiais, relevo, clima (chuva e vento), vegetação e uso do solo.

Desta forma, a fim de integrar as informações atualmente existentes e quantifica-las a partir de ferramentas de geoprocessamento, esse trabalho tem como objetivo criar um mapa de potencial erosivo, baseado em dados de formações superficiais, como solo, relevo, chuva, uso do solo, e pontos de erosão cadastrados, a fim de disponibilizar à comunidade científica e aos gestores públicos, um produto na escala de 1.50.000 que possa ser utilizado no planejamento territorial, principalmente nas áreas de expansão urbana.

2. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se na região costeira do Estado do Maranhão, limitada ao norte pelo Oceano Atlântico, ao sul pela Baía de São José e o Estreito dos Mosquitos, a leste pela Baía de São José e a oeste pela Baía de São Marcos. Administrativamente, está inserida na Mesorregião Norte Maranhense, Região de Planejamento da Ilha do Maranhão e na Microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís, abrangendo quatro municípios, São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (Figura 1)

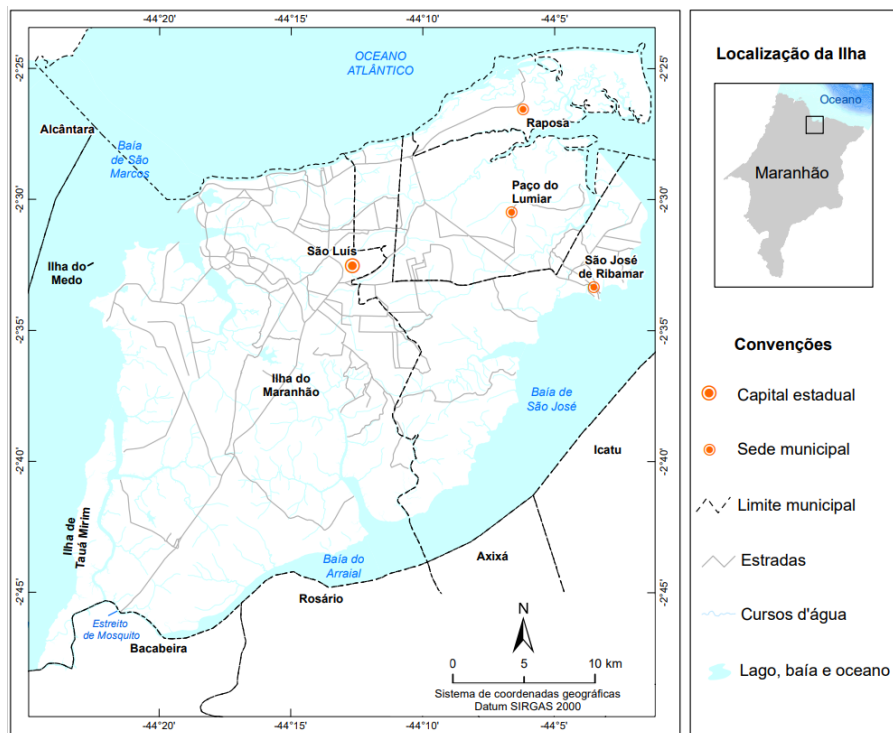


Figura 1. Mapa de localização da Ilha do Maranhão. Fonte: Autores

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para geração do mapa de potencial erosivo foi baseada numa adaptação do trabalho de Crepani et al. (2008), onde foi construído um banco de dados com os planos de informação que influenciam a erosão (formações superficiais, solo, relevo, chuva, declividade). A cada plano de informação foram atribuídos valores que indicam a suscetibilidade do terreno a erosão, conforme uma análise multicritério. Em seguida foi feita a integração das informações através de álgebra de mapas (Figura 2), formando o mapa de suscetibilidade, que posteriormente foi integrado com a informação do uso do solo, formando assim o mapa de potencial a erosão.

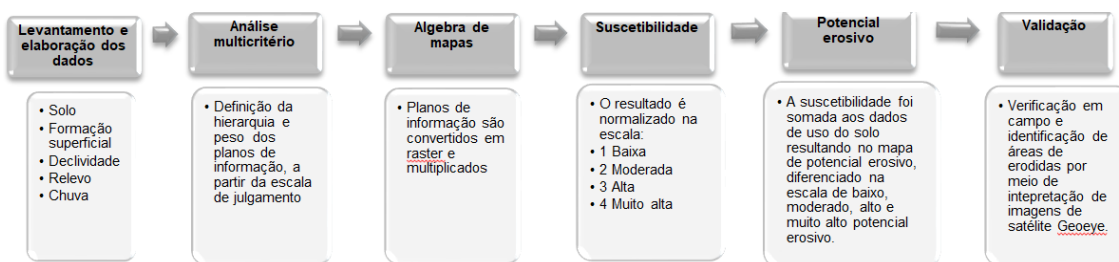


Figura 2. Fluxograma metodológico. Fonte: Autores

3.1. Levantamento dos dados

Esta etapa envolveu pesquisa bibliográfica dos fatores que influenciam na erosão: solo, formações superficiais, relevo e uso do solo na escala de 1.50.000. Também foi feita a compilação e avaliação/categorização do potencial erosivo de cada fator.

O tipo de solo e as formações superficiais foram avaliados conforme a erodibilidade do material, seguindo conceitos de Bouyoucos (1935) Bertoni e Lombardi Neto, (2010) e Carvalho (1994).

O relevo foi categorizado segundo a forma do terreno. Uma vez que relevos mais planos tendem infiltrar a água dificultando a perda de solo por erosão laminar (Vieira et al.,2000).

Segundo STEIN (1987) a sistemática de uso de uma área pode levar a diferentes taxas de perdas do solo por erosão, podendo ser maior ou menor, dependendo do tipo de uso e do grau de

proteção. Portanto, a informação uso do solo foi classificada conforme a sua exposição, ou seja, solos com menor proporção de vegetação, ou não permeabilizados pela urbanização obtiveram pesos maiores na classificação do potencial erosivo.

3.2. Elaboração de dados

3.2.1 Declividade

Este fator foi considerado na análise de erosão, uma vez que as áreas de elevada declividade, escoam mais rapidamente os líquidos, dificultando a infiltração, causando assim maior erosão (CARVALHO, 1994). Foi feita a classificação da declividade em seis intervalos, onde áreas mais declivosas obtiveram maior peso quanto ao potencial erosivo. Para elaboração desse dado, utilizaram-se imagens MDE-SRTM corrigidas e disponíveis no sítio da *Alaska Satellite Facility* – ASF (<https://asf.alaska.edu/about-asf/>). Utilizou-se a ferramenta *slope* da extensão *Spatial Analyst*, do ArcGis

3.2.2 Erosividade

A chuva é considerada o principal agente ativo da erosão hídrica, seja ela laminar, em sulcos ou ravinas (CREPANI et al., 2008). Dessa forma, utilizou-se o índice numérico conhecido como erosividade (Fator R) das chuvas para compor o mapa de potencial erosivo.

Para o cálculo do fator R utilizou-se seis estações hidrometeorológicas, das quais duas são operadas pelo CEMADEN (Icatu e Sítio Raposa); três operadas pela CPRM, (Gonçalo, Guimarães e São Bento); e uma operada pelo INMET (estação de São Luís). Esses dados foram obtidos na plataforma de dados do CEMADEN (<http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>), na plataforma de dados Hidroweb (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf) e na plataforma de dados do INMET (<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/82280#>), respectivamente. Os dados obtidos incluem um registro pluviométrico de cinco anos, entre o período de jan/2016 a dez/2020.

Após o processamento dos dados pluviométricos mensais, foram calculados os valores de erosividade média em cada estação, para avaliar a capacidade e o potencial da chuva em causar erosão no solo, conforme equação a seguir, proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992).

$$R = \sum \left[67,355 \left(\frac{r^2}{p} \right)^{0,85} \right]$$

Onde: “r” é a média do total mensal (mm); “p” é a média do total anual de precipitação (mm).

Para a espacialização dos dados de erosividade das chuvas foi realizada a interpolação dos valores do fator R de cada estação, conforme Bertoni e Lombardi Neto (2010), utilizando o interpolador linear Spline, da extensão *Spatial Analyst*, do ArcGis. Como resultado obteve-se um arquivo raster de curvas iso-erodentes, utilizado na geração do mapa de perdas de solo.

3.2.3 Análise Multicritério

A cada plano de informação utilizado, foi atribuído um peso correspondente, que representa sua importância no processo erosivo. Esses pesos foram produzidos com o auxílio do método de Análise de Processos Hierárquicos – AHP (SAATY, 1988). Para isso foi estruturada uma árvore onde foi definida a hierarquia entre os critérios, conforme referências relacionadas ao tema erosão (CREPANI et al., 2008; CALDAS et al. 2019). A partir dessa etapa, os planos de informação foram comparados par a par, e sua importância relativa estabelecida de acordo com uma escala de julgamento (Tabela 1).

Tabela 1. Escala de julgamento (SCHMIDT, 1955).

Definição	Valor
Elementos iguais	1
Fraca importância de um elemento sobre o outros	3 ou 1/3
Importância forte de um elemento sobre o outros	5
Importância muito forte de um elemento sobre o outros	7
Importância extrema de um elemento sobre o outros	9
Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	2, 4, 6, 8

3.2.4 Álgebra de mapas

A partir da padronização das notas e dos pesos de cada plano de informação foi realizada a integração temática dos diferentes planos de informação através da “Combinação Linear Ponderada”. Esta metodologia consistiu na utilização de álgebra de mapas, onde os diferentes planos de informação foram cruzados, com seus pesos e notas, resultando em um mapa com valores que variam no mesmo padrão das notas dos planos de informação base.

3.2.5 Normalização dos Planos de Informação e Geração do mapa de suscetibilidade

Os planos de informação foram normalizados em quatro pontuações (1 a 4), de acordo com o impacto de cada classe para a erosão dos solos:

- 1 – Baixo – corresponde um impacto pequeno para a erosão laminar dos solos
- 2 – Moderado: receberam esta nota, as classes de contribuição moderada para a erosão laminar dos solos.
- 3 - Alta: receberam esta nota, as classes de elevada contribuição para o aumento da erosão laminar dos solos.
- 4 – Muito Alta: receberam esta nota, as classes que possuem contribuição muito alta para a erosão laminar dos solos.

O mapa de suscetibilidade foi elaborado para verificar quais os fatores do meio físico, no processo de erosão hídrica laminar, mostram-se mais preponderantes na erosão. Onde todos os fatores (erosividade, erodibilidade, declividade) tiveram a mesma nota, mas pesos diferenciados.

3.2.6 Geração do mapa de potencial para erosão

O mapa de potencial a erosão possibilitou observar como os fatores naturais influenciaram os processos erosivos. A partir dessa percepção foi possível diferenciar a nota dos fatores, incluir a informação do uso do solo e gerar o mapa do potencial erosivo para a Ilha do Maranhão. Sendo este mapa classificado em quatro graus: baixo, moderado, alto e muito alto.

3.2.7 Validação do Mapa de potencial à Erosão

A validação do mapeamento foi realizada a partir da verificação em campo de pontos aleatórios, bem como na identificação de áreas de erodidas, por meio de interpretação de imagens de satélite Geoeye.

4. FATORES INFLUENCIADORES DA EROSÃO LAMINAR

Dentre os fatores influenciadores da erosão laminar, considerou-se para análise do potencial erosivo: o tipo de solo, formações superficiais, tipo de relevo, declividade, uso do solo e chuvas/erosividade.

4.1 Solos

Segundo Agência Nacional de Águas-ANA e Serviço Geológico do Brasil-CPRM (2017) a Ilha do Maranhão apresenta quatro tipos de solo:

- Solo de Mangue - solos hidromórficos com influência fluviomarinha, textura predominantemente argilosa e presença de matéria orgânica, caracterizando-se com baixo a moderado fator de erodibilidade.
- Gleissolo Haplíco distrófico - compreendem solos argilosos mal drenados, relacionados às áreas mais deprimidas do terreno, com deficiência de oxigênio, dando ao solo uma coloração acinzentada, chegando até azulada, quase sempre implicando em presença de ferro, principalmente devido à condição de redução. Por conter textura predominantemente argilosa, com presença de matéria orgânica caracteriza-se com baixo a moderado fator de erodibilidade.
- Argissolo Vermelho e Vermelho-Amarelo distrófico – são solos profundos, bem estruturados, muito bem drenados, porosos, friáveis e com baixa fertilidade natural, geralmente associado à ocorrência de lateritas ou concreções ferruginosas. Apresentam erodibilidade moderada a alta.
- Neossolo Quartzarenico Órticos - constituem solos essencialmente quartzosos, de textura mais arenosa, muito profundos, fortemente drenados e com baixa capacidade de retenção de

nutriente e água. Devido à textura arenosa, pouca coesão das partículas e baixo teor de matéria orgânica, caracterizam-se com fator de erodibilidade alto.

Alguns terrenos da Ilha do Maranhão foram considerados como não solos, como é o caso das Dunas. Observa-se ainda que muitas áreas se apresentam não mapeáveis, sendo conceituadas de Urbano Denso, Urbano Industrial e Corpos D'Água (ANA e CPRM, 2017).

4.2 Formações superficiais

Segundo Ramos et al. (2020) na Ilha do Maranhão foram identificadas dez unidades regolíticas:

- Dunas móveis - localizadas próximas à linha de praia, com origem marinha, e remobilizadas pela ação eólica, são compostas por areia fina, bem selecionada, com ausência de vegetação, caracterizando-se com alto fator de erodibilidade.

- Dunas fixas - ocorrem à retaguarda ou entremeadas com as dunas móveis e apresentam incipiente desenvolvimento de processos pedogenéticos, resultando na fixação de um revestimento vegetal pioneiro (gramíneas e arbustos esparsos), que impede ou atenua a mobilização eólica. São formados por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas inconsolidadas. Com moderado a alto fator de erodibilidade.

- Depósitos laterítico imaturo completo, associado a dois tipos de coberturas: A) Solo espesso/profundo (Argissolos) formado por alteração de crosta laterítica de textura arenosa, arenosíltico-argilosa, síltico-arenosa. B) Sedimentos alóctones do Pós Barreiras caracterizados por sedimentos de textura predominantemente arenosa a areno-siltosa associados a Neossolo Quartzarênicos. Apresentam erodibilidade moderada a alta.

- Depósito laterítico imaturo truncado - formado por intercalações de camadas arenosas e síltico-argilo-arenosas, com lâminas de argila e silte de cores variegadas, intensamente intemperizadas, formando um perfil laterítico imaturo truncado, sem presença de crosta laterítica preservada, geralmente associado a horizonte concrecionário ferruginoso ou revestido por concreções lateríticas dispersas. Segundo Sathler et al (2009) nessa unidade foram encontradas feições erosivas associadas aos sedimentos arenosos e siltosos, com altas taxas de infiltração. Apresentam erodibilidade moderada a alta.

- Depósito de cordões litorâneos antigos - composto por areias finas, esbranquiçadas, inconsolidadas, associadas a antigas áreas de praias;

- Depósitos arenosos em cordões e terraços (recentes) - correspondem aos depósitos litorâneos praias recentes, constituídos por areias de textura fina.

- Depósitos aluvionares – constituídos predominantemente por areia fina a média e areia silto-argilosa, com seixos e grânulos dispersos. Caracterizando-se com moderado fator de erodibilidade.

- Depósito de mangue - Depósitos de pouca espessura compostos por sedimentos finos (argila, silte), cinza escuros, ricos em matéria orgânica, associados à areia fina, depositados por águas de rios, com influência de maré, caracterizando-se com baixo a moderado fator de erodibilidade.

- Depósitos de pântanos salinos - são compostos por areia fina e lama de mangue, com alto teor de salinidade, que estão sob efeito das oscilações de maré, principalmente as marés de sizígia, caracterizando-se com baixo a moderado fator de erodibilidade.

- Depósitos de planície de maré lamosa - denominados de coroas de lama, constituem pelitos lamosos, cinza-escuros, expostos na maré vazante. Caracterizando-se com baixo a moderado fator de erodibilidade.

4.3 Relevo/Declividade

Conforme Agência Nacional de Águas e Serviço Geológico do Brasil (2017), Bandeira et al (2018) e Barros e Bandeira (2020) a Ilha apresenta oito padrões de relevo:

- Campo de dunas fixas – Também denominadas de paleodunas, localizam-se na interface entre as praias e os tabuleiros, apresentando aproximadamente 50 a 60 m de altura e, em sua maioria, são vegetadas;

- Campo de dunas móveis - também denominadas de ativas, onde as formas mais ocorrentes são as barcanas, longitudinais e frontais. Estas são encontradas predominantemente na porção nordeste da área de estudo, na Ilha de Curupu;

- Planícies Fluviais – Apresentam declividade entre 0-3°, baixa amplitude e encontram-se no interior da Ilha do Maranhão, contornando os canais fluviais, nos fundos dos vales.
- Planícies Fluviomarinhas - áreas com terrenos baixos, quase horizontais, constituídos por sedimentos lamosos, recortados por canais de marés e inundados diariamente pelas macromarés semidiurnas;
- Planícies Lamosas (coroas de lama) - são morfologias deposicionais ocorrentes em costas planas a suavemente inclinadas, de baixa energia, que se posicionam à frente dos manguezais, visíveis na maré baixa;
- Planícies Marinhas estão representadas por uma faixa de extensão de 8km de praias. Assim como terraços marinhos encontrados a uma altura inferior a 1 metro nas bordas da planície de maré e das praias. Ainda no relevo das planícies marinhas estão as barras de areia alongadas caracterizadas por morfologias costeiras deposicionais, planas e rasas;
- Tabuleiros - Caracterizam-se por áreas planas, com altitudes máximas em torno de 70m. Ocorrem predominantemente na porção central e centro-nordeste da ilha e, em outras áreas dispersas;
- Tabuleiros dissecados – Estão preferencialmente localizados por toda a porção oeste e sul-sudoeste da ilha do Maranhão, situadas em cotas baixas entre 20 e 50 metros. Diferencia-se do conjunto dos tabuleiros devido a uma atuação mais efetiva da erosão e da dissecação fluvial promovida por uma rede de canais de média a alta densidade de drenagem.

No geral a declividade derivada do MDE-SRTM mostra que a área de estudo apresenta predominantemente terrenos com baixas declividades, em torno de 26% (15°) relacionadas a relevos planos a suavemente ondulados, como os campos, planícies e topo dos tabuleiros. Mas também é possível encontrar declividades máximas de 142% (cerca de 55°), geralmente associadas às bordas dos tabuleiros e tabuleiros dissecados. Há também declividades subverticais (90°) observadas em falésias de praia, principalmente a norte da ilha do Maranhão.

4.4 Uso do Solo

Segundo Barros e Bandeira (2020) a ilha do Maranhão compõe-se de onze classes de uso e ocupação do solo:

- Mangue - Vegetação assentada em terrenos lamosos, saturados em água salobra e muito ricos em matéria orgânica;
- Restinga - Associada a diversos tipos de depósitos sedimentares litorâneos paralelos à linha de costa, a exemplo de praias, cordões arenosos e campos de dunas, assim como nos estuários dos rios;
- Mata secundária - Representam a vegetação em estágio de recuperação ecológica avançada. Tem como característica um maior espaçamento das espécies vegetais, notadamente as de maior porte, do que nas matas primárias;
- Mata secundária fragmentada - São resultantes da divisão em manchas, ou fragmentos menores, da vegetação secundária. Esses fragmentos contêm uma vegetação ainda mais esparsa que os da mata secundária, com uma tendência de supressão total devido à pressão da expansão da área metropolitana;
- Culturas agrícolas - São pequenas parcelas de terreno com cultivos de subsistência, a exemplo da mandioca, vinagreira, pequenos pomares e hortaliças, coqueiros;
- Solo exposto – Estão associadas à retirada da cobertura vegetal para implantação de culturas agrícolas, terraplenagem em área industrial e urbana, loteamentos e mineração;
- Urbano de alta densidade - Nucleações mais adensadas, onde há revestimento do solo, e conseqüente impermeabilização. Representam quase totalidade da superfície ocupada, prevalecendo o escoamento superficial das águas pluviais;
- Urbano de média densidade - Ocupação mais espaçada, mais residencial, média densidade populacional, com a presença de vegetação em terrenos baldios e quintais, com menor índice de pavimentação das ruas;
- Urbano de baixa densidade - São ocupações incipientes, no entorno das áreas de média densidade. Representam zonas de expansão urbana, de baixa densidade populacional, com vilas

e vilarejos, loteamentos em processo de ocupação, áreas mistas de residências e pequenas chácaras ou sítios. A pavimentação nessas áreas é praticamente inexistente;

- Urbano industrial - Estão relacionadas diretamente ao Distrito Industrial de São Luís e ao Sistema Portuário de São Luís;
- Corpos d'água - São representados por lagoas, barragens e pequenos lagos. O mais expressivo é a Lagoa da Jansen, no bairro de Ponta de Areia.

4.5 Chuva/Erosividade

No período de 2016 a 2020, as estações do entorno de São Luís apresentaram precipitação total média variando entre 1763,4 e 2570,7 mm. Sendo os meses de janeiro a abril, aqueles que apresentaram maior pluviosidade média, com 70,1% das chuvas ocorridas, enquanto os meses de agosto a novembro foram os de menor pluviosidade média mensal, com 2,9 % do total anual.

O Fator Erosividade (R) para a ilha do Maranhão variou de 11232,6 MJ.mm/ha.h.ano na estação de São Bento a 13550,2,8 MJ.mm/ha.h.ano na estação de São Luís, sendo o valor médio 12463,9 MJ.mm/ha.h.ano e foram considerados de potencial erosivo muito forte, conforme classificação estabelecida por Carvalho (1994). Na tabela 2 são apresentados os dados das médias mensais do índice de erosividade e do fator R para cada estação pluviométrica.

Tabela 2. Valores médios mensais de Erosividade e Fator R das estações pluviométricas do entorno da Ilha.

EROSIVIDADE DAS CHUVAS (MJ.mm/ha.h.ano)													FATOR R
ESTAÇÕES	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
Gonçalo	1188,3	2949,9	3124,4	1905,5	1435,2	140,0	96,0	8,5	0,7	1,4	85,1	297,7	11232,6
Guimarães	1098,3	2020,5	3989,4	2959,6	1350,4	1041,5	221,6	4,5	0,0	11,7	52,5	260,9	13010,9
Icatu	2162,2	2674,4	2599,8	2557,2	1446,2	477,4	367,8	37,4	28,3	20,1	97,3	616,8	13084,8
São Bento	1520,1	2259,6	3113,8	2369,9	914,7	994,1	159,2	3,9	0,1	1,4	189,3	282,9	11808,8
São Luís	1969,3	2489,7	3850,7	2787,3	1484,0	446,0	267,3	8,7	1,5	0,3	9,4	236,0	13550,2
Sítio Raposa	1596,7	2204,6	3504,1	3132,1	720,1	410,2	155,1	7,5	0,1	0,6	135,1	229,9	12096,1
MÉDIA MENSAL	1589,1	2433,1	3363,7	2618,6	1225,1	584,9	211,2	11,7	5,1	5,9	94,8	320,7	12463,9

Fonte: Autores.

Os elevados índices de erosividade encontrados na região, são enquadrados na faixa de variação de 12000 a 16000 MJ.mm/ha.h.ano, estabelecida por Silva (2004), no mapeamento de erosividade de chuva para o Brasil. Entretanto os resultados foram inferiores aos encontrados por Martins et al. (2020) para o estado do Maranhão (com variação de 16000 a 32500 MJ.mm/ha.h.ano).

Os índices de erosividade de São Luís foram bastante elevados quando comparados a outras regiões do país, como o encontrado por Carvalho et al. (2010) em Seropédica/RJ (5960,4 MJ.mm/ha.h.ano); Por Aquino et al. (2017) no município de Gilbués, Piauí (com variação de 6518,8 a 7041,1 MJ.mm/ha.h.ano); Por Oliveira (2021) em Juramento/MG (7216,0 MJ.mm/ha.h.ano); e por Eitz et al. (2011) para Encruzilhada do Sul/RS (5534,3 MJ.mm/ha.h.ano). Por outro lado, os resultados têm valores próximos aos obtidos por Oliveira Junior et al. (1992), para o município de Bragança/PA (12.350,8 MJ.mm/ha.h.ano); Por Brabo (2020) em São Miguel do Guamá (10476,2 a 13050,5 MJ.mm/ha.h.ano); por Oliveira Junior (1996) para Conceição do Araguaia/PA (11487,5 MJ.mm/ha.h.ano); e por Oliveira Júnior e Medina (1990) para Manaus/AM (14129 MJ.mm/ha.h.ano). Constatando-se que a grande variabilidade espacial da erosividade no Brasil é decorrente das diferentes variações climáticas entre as diversas regiões do País (PINHEIRO et al., 2018)

Dessa forma, comparando os resultados obtidos mês a mês, foi possível observar que o fator erosividade das chuvas variaram conforme a precipitação. E nos meses em que ocorreram valores elevados de pluviosidade houveram também maiores valores de erosividade, fatos constatados nos trabalhos de Aquino et al. (2017); Rosa et al (2016); Kubota et al. (2019); Brabo (2020).

Assim, na região da ilha, foi registrado pico de erosividade no mês de março e a partir do qual se inicia um decréscimo, chegando ao seu valor mínimo no mês de setembro. Sendo assim, no

período de janeiro a abril ocorrem as chuvas de maior potencial erosivo, quando é esperada maior perdas de solo por erosão. Enquanto nos meses de agosto a novembro ocorrem as chuvas com menor potencial erosivo, justamente durante o período menos chuvoso na região. Considerando os valores obtidos de erosividade, utilizou-se para o cálculo de potencial erosivo os seguintes intervalos: 11.000 a 12.000, 12.000,1 a 13.000 e acima de 13.000.

5. MAPA DE POTENCIAL A EROSÃO

O resultado obtido a partir da integração da hierarquização dos pesos e notas relacionadas às características de cada fator influenciador analisado (Tabela 3 e 4), conforme a metodologia AHP mostra que o uso do solo é a variável que mais contribui para o potencial a erosão, seguida da declividade e do tipo de solo, proporcionando assim que 15% das áreas da Ilha do Maranhão apresentem muito alto potencial erosivo, 18 % possuem alta potencialidade, 32 % tem potencialidade moderada e 35 % potencialidade baixa (Figura 4).

Tabela 3. Notas dos critérios de perigo

Resultado da matriz de comparação pareada dos critérios	
Critérios de Perigo	Nota
Uso do solo	0,4
Declividade	0,18
Solo	0,12
Formação superficial	0,11
Relevo	0,1
Erosividade	0,09

Tabela 4. Pesos dos atributos dos critérios

Resultado da matriz de comparação pareada dos Atributos			
Uso do solo	Peso	Solo	Peso
Restinga	0,2	Terreno de Dunas	0,25
Solo exposto	0,2	Neossolo Quartzarenhos	0,2
Urbano baixa densidade	0,14	Argissolos	0,15
Urbano média densidade	0,13	Urbano baixa densidade	0,13
Mata secundária fragmentada	0,12	Urbano média densidade	0,11
Urbano alta densidade	0,04	Urbano alta densidade	0,05
Urbano Industrial	0,05	Urbano Industrial	0,05
Culturas agrícolas	0,06	Gleissolo	0,03
Mata secundária	0,05	Solo de mangue	0,03
Mangue	0,01		
		Relevo	Peso
Declividade	Peso	Dunas moveis	0,2
Acima de 45%	0,3	Dunas fixas	0,15
Entre 30 a 45%	0,25	Tabuleiros dissecados	0,15
Entre 18 e 30%	0,25	Tabuleiros	0,1
Entre 10 e 18%	0,1	Planícies e terraços marinhos	0,1
Entre 5 e 10%	0,05	Planícies fluviais	0,1
Abaixo de 5%	0,05	Planícies flúvio-marinhas	0,1
		Planícies lamosas	0,1
Formação superficial	Peso	Chuva (fator R)	Peso
Dunas moveis	0,13	11000 a 12000	0,32
Dunas fixas	0,12	12000,01 a 13000	0,33
Solo-crosta	0,11	Acima de 13000	0,35
Truncada	0,1		
Depósitos marinhos antigos	0,09		
Planícies marinhas recentes	0,09		
Depósitos de planície inundação	0,09		
Depósitos de maré siltico-argilosa	0,09		
Depósitos pântanos salinos	0,09		
Depósitos de mangue	0,09		

Fonte: Autores

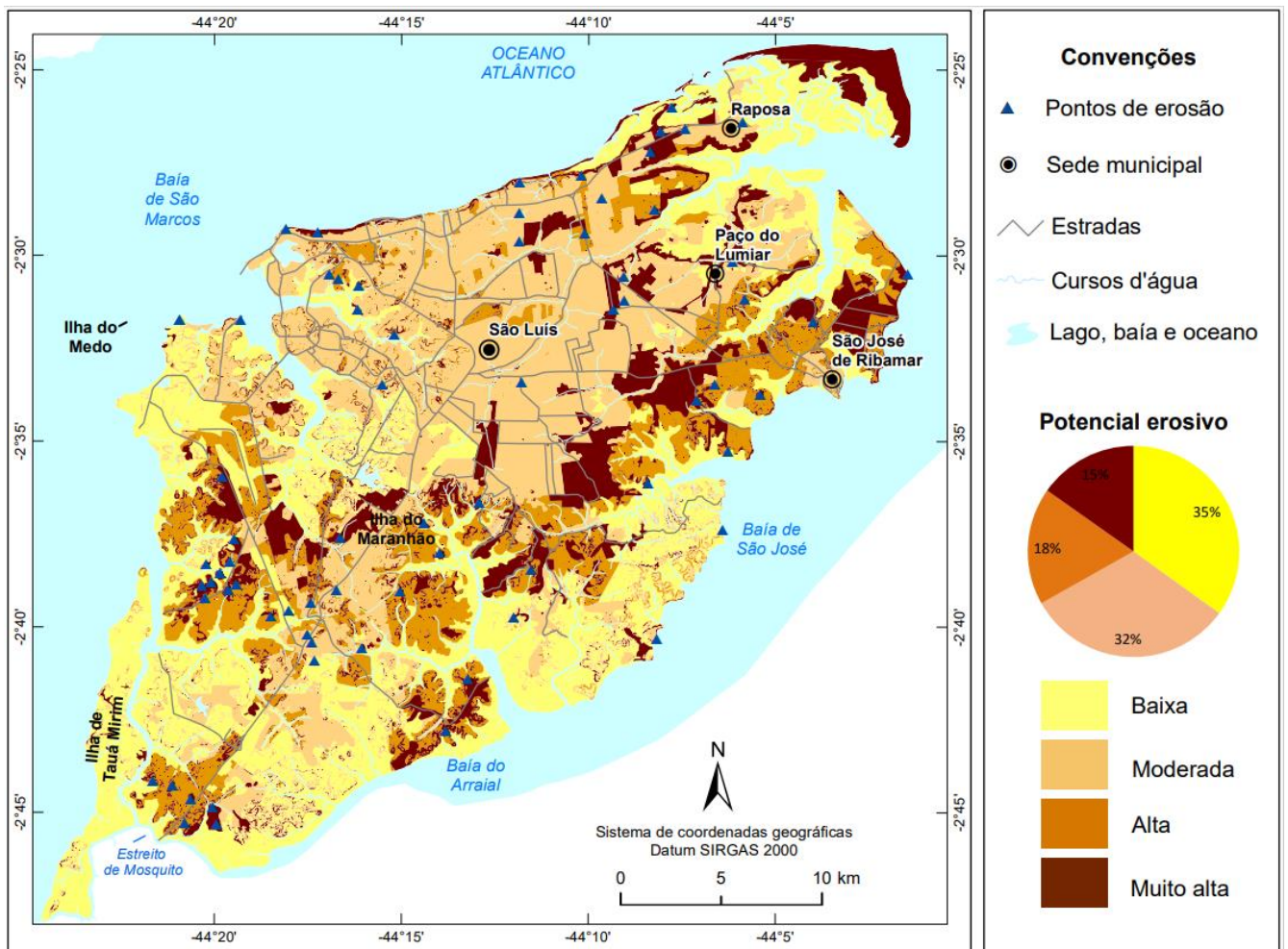


Figura 4. Mapa de potencial a erosão pluvial da Ilha do Maranhão e os pontos de erosão cadastrados.

As áreas com potencial erosivo muito alto associam-se a solos predominantemente arenosos (Dunas, Neossolos Quartizarênicos) e areno-argilosos (Argissolo Vermelho Distrófico), que estão em regiões com declividade que variam de 3 a 45%. Estes terrenos encontram-se expostos aos agentes erosivos, como a chuva e o vento, devido à ausência de vegetação, que pode ser natural, como as áreas de restinga (dunas) ou estarem desmatadas devido atividades de exploração mineral, construção de estradas e expansão urbana.

Verificou-se também que as áreas com potencial muito alto à erosão correlacionam-se com locais onde se extrai cascalho laterítico, areia, e saibro para uso na construção civil. Esses empreendimentos, em muitos casos, não apresentam licença ambiental, e conseqüentemente não possuem um plano de supressão da vegetação e nem de drenagem, favorecendo a ocorrência de processos erosivos e conseqüentemente assoreamento de drenagens a jusante das áreas mineradas.

As regiões urbanas de baixa densidade, onde ocorrem processos de expansão, também apresentam potencial erosivo muito alta, pois estão frequentemente sendo desmatadas, para realização de obras habitacionais e estradas, deixando muitos locais expostos aos agentes erosivos.

As áreas de potencial alto à erosão associam-se a solos arenosos (Neossolos Quartizarênicos) e areno-argilosos (Argissolo Vermelho Distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico), que estão em regiões com declividade abaixo de 18%. Esses locais, geralmente possuem ocupação urbana de média densidade, com pouca presença de vegetação e um menor índice de pavimentação das ruas e com muitas áreas expostas a erosão.

As áreas de vulnerabilidade média à erosão apresentam Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, associados a relevos de topo plano e vertente menor que 30%, onde geralmente existe uma mata secundária fragmentada.

As áreas de potencialidade baixa à erosão apresentam solos mais argilosos (solo de mangue, Gleissolos, Argissolos), associados a relevos planos de baixa declividade, cobertos por vegetação de mangue, mata secundária, culturas agrícolas e pequenas porções de ocupação urbano industrial, que proporcionam áreas menos expostas a erosão.

É importante ressaltar que na comparação dos pontos de erosão observados em campo e por imagens de satélite, com as classes de potencialidade a erosão, pôde-se constatar que 44 pontos (60,3%) estão localizados na classe muito alta, 17 (23,3%) na classe alta, 7 (9,5%) na classe moderada e 5 (6,9%) na classe baixa.

No geral observa-se que os solos e formações superficiais da Ilha mostram-se na maioria muito suscetíveis à erosão, uma vez que são constituídos por material com baixo índice de plasticidade, com predominância de textura arenosa fina a silte, e argilas caulínicas (SATHLER et al., 2009). Estes materiais quando descampados, sem vegetação, sob índices pluviométricos elevados e associados a relevo de tabuleiros e tabuleiros dissecados com topo plano e bordas com declividades acima de 18% estão condicionados a formação de feições erosivas (sulcos e ravinhas), devido a atuação do vento, mas principalmente das águas pluviais.

Este terreno que já apresenta suscetibilidade natural à erosão está sendo ocupado de forma desordenada, onde ocorrem desmatamento e lançamento de lixo e água servida, que favorecem a desestabilização do solo e a ampliação de feições erosivas. Segundo Conceição et al (2017) nestas regiões os moradores podem apresentar perdas materiais ou de vida, por residirem em áreas muito próximas as feições erosivas (ravinhas e voçorocas), que estão se ampliando e aprofundando. Estas são consideradas áreas de risco e, portanto, devem ser alvo de ações de manejo da terra, através de um controle da ocupação e da erosão a fim de minimizar ou extinguir qualquer dano.

6. CONCLUSÕES

O mapa produzido evidenciou que o uso do solo foi um dos critérios determinantes para que houvesse um número maior de áreas com alta e muita alta potencialidade a erosão. Isto evidencia que a falta de vegetação ou cobertura vegetal insipiente, combinado com elevadas declividades e solos de alta erodibilidade, proporciona áreas com alta e muita alta potencialidade erosiva. Portanto, diante dos resultados encontrados, sugere-se que seja feita uma gestão do território, através do reflorestamento de regiões com solo exposto, fiscalização das áreas que estão sendo desmatadas de forma desordenada e sem planejamento ambiental, sensibilização da população sobre a importância da conservação dos recursos naturais, sobre o descarte correto do lixo e da água servida no solo. Além da implantação de um sistema de esgoto e drenagem eficientes, capazes de evitar que partículas do solo sejam erodidas e causem assoreamento dos mangues e das planícies fluviais.

Observa-se ainda que o mapa elaborado, associado a outros, como por exemplo os de áreas de preservação permanente, suscetibilidade a inundações e a deslizamentos, possa ser utilizado no plano diretor municipal e auxilie nas diretrizes de ocupação das áreas de expansão urbana da Ilha do Maranhão, onde áreas com alta declividade, solos muito erodíveis e elevado índice pluviométrico sejam preservadas e sua ocupação evitada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico - CPRM pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. Estudos hidrogeológicos da região metropolitana de São Luís – MA: Subsídios para uso sustentável dos recursos hídricos. Relatório parcial 04 (RP 04): Relatório de geomorfologia, solos e uso do solo. São Luís – MA, 2017.

AQUINO, C. M. S.; OLIVEIRA, J. G. B.; AQUINO, R. P. 2017. Erosividade das Chuvas do Município de Gilbués, Piauí, Brasil. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. Campinas-SP.

- BANDEIRA, I. C. N.; BARROS, J. S.; OLIVEIRA FILHO, J. M.; TEIXEIRA, S. G.; SIMÕES, P. M. L. Mapa de geodiversidade da Ilha do Maranhão, MA. [S. l.]: CPRM, 2018. 1 mapa, color. Escala 1:80.000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20597>. Acesso em: 15 jun. 2019.
- BARROS, J. S.; BANDEIRA, I. C. N. Geodiversidade da Ilha do Maranhão, Escala 1:50.000. Nota explicativa. CPRM, 2020. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20597>. Acesso em: 10 abr. 2020. 149p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo. 7. ed. Editora: Ícone. 2010. 355p.
- BOUYOUCOS, G. J.. The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, 27: 738-741. 1935.
- BRABO, L. S. 2020. Vulnerabilidade erosiva em São Miguel de Guamá, nordeste paraense; 2020; Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres na Amazônia) - Universidade Federal do Pará.
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J.P.C. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.12, n.04 (2019) 1415-1430.
- CARVALHO, N. O., *Hidrossedimentologia Prática*, Eletrobrás, CPRM, Rio de Janeiro, 1994.
- CARVALHO, D.F.; MACHADO, R. L; EVANGELISTA, A. W. P; KHOURY JÚNIOR, J. K.; SILVA, L. D. B. da. Distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno dos índices de erosividade EI30 e KE>25 em Seropédica – RJ. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 2,p. 244-252, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000200006>
- CONCEIÇÃO, R. A. C.; SIMÕES, P. M. L.; QUEIROZ, L. J.; BANDEIRA, Í. C. N.; MOURA, E. M.; OLIVEIRA FILHO, J. M.; MELLO, L. B.; BARROS, J. S. Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: São Luís, Maranhão. [S. l.]: CPRM, 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/20715>. Acesso: 30 out. 2020.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; PALMEIRA, J.S. DE.; SILVA, E. F. Zoneamento ecológico-econômico. In: FLORENZANO, T. G (org). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Texto, 2008.
- FLORENZANO, T. G.. Cartografia. In: FLORENZANO, T. G. (Org), *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- FURTADO, M. S.; BEZERRA, J. F. R.; LIMA, N. F. C.; MENDONÇA, J. K. S.; GUERRA, A. J. T.; FEITOSA, A. C. 2004 . INSTALAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL COMO SUBSÍDIO PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR EROSÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS – MA. V Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia UFSM - RS, 02 a 07 de Agosto de 2004.
- GUERRA, A.J.T.; MARÇAL, M.S. *Geomorfologia Ambiental*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.
- IWASA, O.Y.; FENDRICH, R. Controle de Erosão Urbana. In: OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. (Orgs.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE 1998. p. 271-282.
- KUBOTA, N. A.; PRATA, T. C.; LIMA, I. F.; LIMA, A. M. M. 2019. HIDROGEOMORFOLOGIA E SUSCEPTIBILIDADE A EROSÃO DA BACIA DO RIO GURUPI (PA-MA). *Rev. Geogr. Acadêmica* v.13, n.2, p. 67-89.
- LISBOA, G. Serra et al. Análise morfológica das áreas degradadas por voçorocamento na bacia do Rio Bacanga–São Luís/MA. *REVISTA GEONORTE*, Manaus. vol. 5 n. 14, p. 15-20, 2015.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas-SP. *Bragantia*. Campinas, 51(2):189-196, 1992.

MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO A.G. Clima e Relevo. Oliveira. In: OLIVEIRA, A. MS; BRITO, SNA. (Orgs). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 1998.

OLIVEIRA JÚNIOR, R.C.; MEDINA, B.F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). R. Bras. Ci. Solo, 14:235-239, 1990.

OLIVEIRA JUNIOR, RC. de; RODRIGUES, T. E.; MELO, A. da S. A erosividade das chuvas nos municípios de Bragança e Marabá no Estado do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Série Ciências da Terra, Belém,n.4, p.45-57, 1992.

OLIVEIRA JUNIOR, RC. 1996. índice de Erosividade das Chuvas na Região de Conceição do Araguaia, Pará. Belém: EMBRAPA-CPATU. Boletim de Pesquisa, n 165, 20p.

OLIVEIRA, J.A.M. Erosividade da chuva no município de Juramento-MG no período de 1987 a 2019. Revista Brasileira de Geografia Física. Revista Brasileira de Geografia Física v.14, n.04 (2021) 1852-1860.

PINHEIRO, A. G., SANTOS, J, C, N, DOS., PALÁCIO, A. DE Q., ARAUJO NETO., J. R., ANDRADE, E. M, 2018. Eficiência da cobertura vegetal na redução das perdas de água e solo no município de Iguatu. Irriga [online] 23, 133-142.

PINTO, K.S; CONCEIÇÃO, A. O. 2009. LEVANTAMENTO DE ÁREAS ERODIDAS POR VOÇOROCAMENTO NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS – MA. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. A geografia física aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza. 2009. Universidade Federal de Viçosa. Disponível em : http://www.geomorfologia.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/resumos_expandidos/eixo10/011.pdf. Acesso 9/10/2020.

RAMOS. M. A. B.; DANTAS, M. E.; MAIA. M. A. M.; BANDEIRA, I. C. N.; BARROS, J. S.; FERNANDES, V. A. C.; PFALTZGRAFF, P. A. S.; FERREIRA, C. E. O. (2020). Mapping of superficial formations: a methodological proposal for systematic cartography of the Brazilian territory. Journal of the Geological Survey of Brazil. Vol. 3. n. 3, p.169-188.

ROSA, A. G.; SOUSA, A. M. L.; COSTA, J. A.; SOUZA, E. B. Erosividade da chuva em Rondon do Pará, PA, Brasil de 1999 a 2015 e projetada para 2035. Rev. Ambient. Água. v. 11, n. 4, p. 1006-1021, 2016.

SAATY, T. L. What is the Analytic Hierarchy Process? In: Mathematical Models for Decision Support. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. v. 147p. 109–121.

SATHLER, R.; POLIVANOV, H.; GUERRA, A. J. T.; BARROSO, E. V. 2009. Caracterização de voçorocas na ilha do Maranhão. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, vol. 32 n. 1, p. 34-45. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908.

SANTOS, I. R. M. 2014. GÊNESE E EVOLUÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS NO BAIRRO DO JUÇARA, RAPOSA – MA. In: VII Congresso Brasileiro de Geógrafos. Vitória-ES. ISBN: 978-85-98539-04-1.

SCHMIDT, A. M. A. Processo de apoio à tomada de decisão abordagens: AHP e Macbeth. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

SILVA, A.M. da. Rainfall erosivity map for Brazil. Catena, v.57, p.251-259, 2004. DOI: 10.1016/j.Catena. 2003.11.006.

SOUZA, L. C.; PORTELA, A. K. O.; LISBOA, G. S.; BEZERRA, J. F. R. 2017. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS EM PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO RIO ANIL, ILHA DO MARANHÃO. In: XVII Simposio Brasileiro de Geografia Aplicada, I Congresso Nacional de Geografia Física. Campinas-SP.

STEIN, D. P., DONZELLI, P. L, GIMENEZ, A. F.,PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na bacia do Peixe – Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO,3., 1987, Marília. Anais...ABGE/DAEE, 1987. v.1, p. 105-135.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. Mapeamento do uso do solo da Ilha do Maranhão: relatório técnico. São Luís: UEMA, 2016. 12 p.

VIEIRA, M. N. F.; VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; CHAVES, R. S.. Levantamento e conservação do solo. 2. ed. Belém: FCAP, Serviço de documentação e informação. 2000. 320 p.

ZUQUETE, L. V. 1987. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras. Tese doutorado. UNESP. São Carlos-SP.