

MODELAGEM DA SUSCETIBILIDADE EROSIVA LAMINAR E LINEAR NO ENTORNO DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Patrícia de Araújo Romão

Universidade Federal de Goiás – UEG
Instituto de Estudos Socioambientais, Goiânia, GO, Brasil
patricia_romao@ufg.br

Diego Tarley Ferreira Nascimento

Universidade Federal de Goiás – UEG
Instituto de Estudos Socioambientais, Goiânia, GO, Brasil
diego_nascimento@ufg.br

Maurício Martines Sales

Universidade Federal de Goiás – UEG
Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Goiânia, GO, Brasil
mmartines@ufg.br

Marta Pereira da Luz

Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC/GO
Furnas Centrais Elétricas S.A, Goiânia, GO, Brasil
martaluz@furnas.com.br; marta.eng@pucgoias.edu.br

RESUMO

O processo erosivo hídrico natural ocorre em ritmo lento e a alteração antrópica altera essas condições de equilíbrio, intensificando o processo. Dentre as características que condicionam esse processo, destaca-se a suscetibilidade à erosão laminar e à linear nas bordas do reservatório da UHE de Itumbiara (GO/MG). Nesse sentido, o objetivo geral da pesquisa é apresentar uma proposta de modelagem da suscetibilidade e da potencialidade erosiva hídrica, laminar e linear, em borda de reservatórios. Para atingir tal objetivo, além do cadastro das respectivas feições, foi realizado o processamento digital de modelos digitais de elevação e o mapeamento dos condicionantes físicos. Concluiu-se que, em geral, os processos erosivos coincidem com as classes moderadamente altas ou de média suscetibilidade. Quanto à potencialidade, ocorre o predomínio do uso agropastoril sobre alta ou moderadamente alta suscetibilidade, tanto para o processo erosivo laminar quanto para o linear.

Palavras-chave: Condicionantes físicos. Potencialidade. Morfometria. Processo erosivo.

MODELING THE LAMINAR AND LINEAR EROSIVE SUSCETIBILITY IN THE SURROUNDINGS OF HYDROELECTRIC POWER PLANT RESERVOIRS

The natural water erosion process occurs at a slow rate and the anthropic impact changes these equilibrium conditions, intensifying the process. Among the characteristics that condition this process, the susceptibility to laminar and linear erosion at the edges of Itumbiara Hydroelectric plant reservoir (GO/MG) is outstanding. In this regard, the general objective of the research is to present a proposal for modeling the susceptibility and laminar and linear water-erosion potential, at the edge of reservoirs. In order to achieve this objective, in addition to the registration of the respective land features, processing of digital elevation models and the mapping of physical conditions were carried out. The observed erosive processes coincided, in general, with moderately high or medium susceptibility classes. As for potentiality analysis, there is predominance of agropastoral use over high or moderately high susceptibility, both for the laminar and linear erosions.

Keywords: Environmental conditioning factors. Potentiality. Morphometry. Erosion process.

INTRODUÇÃO

O fenômeno da erosão hídrica pode ser entendido como um processo de desagregação e transporte de materiais terrosos ou rochosos pela ação dos rios ou das chuvas (PASTORE, 1986; VILAR e PRANDI,

1993). Isso ocorre em um ritmo lento, em um tempo correspondente à formação do solo, denominada de pedogênese. Quando esse equilíbrio é rompido por intensificação da erosão, de modo que ela seja mais veloz que a formação dos solos, observa-se a perda de diversas camadas ou horizontes, relacionada ao predomínio da morfogênese (TRICART, 1977; CREPANI et al., 2001).

Em meio rural, tal intensificação ocorre especialmente associada ao desmatamento e à implantação de estradas (ANTONELI e THOMAZ, 2016), ocasiões em que o solo fica desprotegido, passando a receber diretamente o impacto das gotas de chuva. Em relação às cidades, a impermeabilização modifica principalmente as condições de fluxo superficial, aumentando o escoamento em detrimento da infiltração (FRITZEN e BINDA, 2011; CAVALCANTE, 2019). Nesse cenário, a deflagração e a conseguinte evolução do processo erosivo ocorrem associadas a diversos outros fatores, de diferentes complexidades (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). Todavia, convém destacar a atuação inicial da gota de água da chuva sobre a superfície do terreno e o correspondente escoamento superficial, difuso ou concentrado, resultando na desagregação e no transporte de partículas do solo.

Desse breve panorama, é possível apontar os principais elementos que respondem ao desencadeamento do processo erosivo hídrico, se laminar ou linear, os quais, nas regiões tropicais, ocorrem em condições específicas, relacionadas: a) às características intrínsecas ao solo, quanto a sua origem, textura, estrutura, composição, porosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica; b) à interface clima-solo, em alusão à intensidade, à duração e à frequência das precipitações e à consequente atuação do impacto das gotas d'água da chuva na desagregação de partículas do solo, assim como às condições que se seguem, de escoamento e/ou de infiltração d'água; c) à posição do solo na superfície topográfica, associada à configuração do relevo na qual esse material se encontra, quanto à declividade; à altura em relação ao desnível, considerando a drenagem mais próxima (nível de base); às curvaturas e às formas de relevo; e ao comprimento da rampa sobre a qual atuará o correspondente fluxo de escoamento hídrico; e d) à proteção do solo decorrente da presença de vegetação ou, diante da sua ausência, de sua exposição, tendo como base o manejo do solo realizado perante algum uso antrópico (POESEN et al., 2003; LUIZ et al., 2017).

Alguns desses condicionantes correlacionam-se em específico aos processos laminares ou lineares. Um exemplo disso são as ocorrências de erosões lineares conectadas, próximas aos cursos d'água, às bordas de topos planos e associadas a propriedades específicas de profundidade dos solos e do nível freático (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012; BRAGA; FERREIRA; UAGODA, 2017). Diversos elementos determinam, assim, a suscetibilidade e a potencialidade dos terrenos à ocorrência de tais processos, inerentes às condições que atenuam ou amenizam a desagregação e o consequente transporte de partículas de solo. Considerando-se o contexto apresentado, a perda de solo pode ser qualificada e/ou quantificada por métodos diretos ou indiretos que levem em conta os elementos supracitados. Tais métodos podem envolver, respectivamente, medições realizadas diretamente (em amostras ou *in situ*) e/ou modelagens para estimativa da suscetibilidade e da potencialidade à erosão.

Quanto às metodologias de estimativa e de avaliação desses processos, coexistem na bibliografia internacional e nacional, inúmeras delas; desde as de mapeamento da suscetibilidade, de fragilidade, de vulnerabilidade à perda de solos, nas quais são considerados os atributos do terreno e/ou computados pesos diferenciados para cada um deles (ZUQUETE, 1993; CANIL, 2000; CREPANI et al., 2001; SPÖRL e ROSS, 2004, SALOMÃO, 2007; SILVA, 2009; ALMEIDA, et al. 2013; NASCIMENTO, ROMÃO; SALES, 2018; 2020); até as de estimativas da perda de solo, como as que empregam a Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* – USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978); como apresentado nos trabalhos de Fernández (1996), Albuquerque et al. (2005), Cabral et al. (2005) e Bertoni e Lombardi Neto (2010).

Na USLE são avaliados fatores de erosividade (R), erodibilidade (K), comprimento de rampa (L), declividade (S), uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P). Nessa estimativa existem algumas limitações (PRUSKI, 2006), como, por exemplo, alguns dos fatores apresentam mais influência do que outros (WEILL e SPAROVEK, 2008); ou ainda, algumas incertezas ou baixa sensibilidade, além de casos de não aplicação do modelo, como para o caso de erosões lineares (CHAVES, 2010; CARVALHO, 2019), que persistem mesmo diante da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE), conforme apontado por Amorim et al. (2010). Dessa forma, apesar de ser reconhecida a sua aplicabilidade em diversas partes do mundo, tendo em vista essas e de outras metodologias de estimativas de perda de solo, como também a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1975; Smith et al., 1984), são necessárias adequações metodológicas, no tocante às especificidades regionais e

mesmo no que diz respeito aos aspectos/atributos considerados na avaliação, principalmente para as condições tropicais.

De qualquer modo, a análise deve levar em conta os condicionantes anteriormente apontados, considerando as componentes: a) pedológica: referente às características de resistência a esses processos, que refletem na capacidade do solo em resistir à desagregação e ao transporte (erodibilidade); b) climática: correspondente principalmente à ação da energia cinética fornecida pela chuva, atuando como *input* de energia para a deflagração do processo (erosividade) e; c) topográfica: (compartimentação do relevo) condizente com a maior predisposição do terreno à infiltração ou ao escoamento superficial, à convergência ou dispersão do fluxo, ou ainda, à aceleração ou desaceleração da água de escoamento; d) cobertura e uso do solo: relacionada à proteção dada pela vegetação e à pressão antrópica determinada pelo uso do solo como indutor à potencialidade dos terrenos frente aos referidos processos.

Em continuidade a essa análise, no momento em que ocorre a desaceleração do fluxo do escoamento, as partículas em transporte tendem a se depositar, parcial ou totalmente, quando surgem condições satisfatórias, associadas às barreiras naturais ou artificiais, a meandros côncavos de cursos d'água ou a lagos, a lagoas e a reservatórios (HECKMANN et al., 2018; NAJAFI et al., 2021) – podendo culminar no assoreamento desses últimos. Assim, é possível afirmar que os impactos consistem, em geral, na perda de camadas de solo agricultáveis e no assoreamento dos mananciais hídricos adjacentes, no caso, principalmente dos processos associados à erosão laminar. Especialmente nas áreas rurais, a perda de solos envolve o carreamento da parte superficial do solo, diminuindo a produtividade e aumentando o gasto com insumos agrícolas.

De outro lado, relacionada ao escoamento superficial concentrado, em alguns casos, intensificada ou deflagrada por erosão interna, como comentado, a erosão linear associa-se a fatores, como por exemplo, a espessura do material inconsolidado, a existência de caminhos preferenciais de percolação subsuperficial da água, a profundidade do nível d'água, além de outros, que condicionam a abertura de cavidades, conectadas ou não aos cursos d'água, resultando em sulcos, ravinas e voçorocas.

A posterior deposição do solo em fundos de vales, além de intensificar a ocorrência de inundações, também tende a diminuir a capacidade de armazenamento de água em corpos hídricos. Por isso, um aspecto de grande relevância é o fato de que o assoreamento pode contribuir de modo significativo na redução da vida útil dos reservatórios destinados para abastecimento e produção de energia elétrica. Nesse contexto, vale salientar que as Usinas Hidrelétricas (UHE) são responsáveis por uma intrínseca dinâmica de ocupação das áreas do entorno dos reservatórios, que pode induzir à deflagração de tais processos (CABRAL et al., 2007; MENEZES, 2010; RAUEN et al., 2018). Isso ocorre desde a construção da barragem e o posterior enchimento do reservatório, o qual, pelo próprio espelho d'água criado, modificará os processos no seu entorno, agravando-se com a abertura de vias de acesso e construções em áreas próximas às margens do lago.

Assim, o trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de modelagem da suscetibilidade e da potencialidade erosiva, laminar e linear, voltada às bordas dos reservatórios de UHE, com o intuito de contribuir para o entendimento desses dois tipos principais de processos, tendo em vista seus distintos condicionantes (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012), bem como da geração de sedimentos em reservatórios hídricos. Para tanto, toma-se, como área em estudo, o entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itumbiara (UHEI), situado entre os estados de Goiás e Minas Gerais.

Nesse sentido, realizou-se, em análise integrada e abordagem qualitativa, uma modelagem paramétrica, por meio de recursos de geoprocessamento, partindo-se dos condicionantes do processo erosivo, tendo em vista a sua ocorrência em áreas de influência direta do reservatório. Como diferencial metodológico desta pesquisa, em relação às outras principais avaliações existentes na literatura, considerou-se a necessidade de entendimento dos processos erosivos hídricos, levando-se em conta não somente fatores topográficos, como a declividade e o comprimento de rampa (correlato ao comprimento das vertentes); mas também outros fatores associados à energia potencial para ocorrência do processo (alturas acima das drenagens mais próximas); e à convergência ou à divergência, bem como à aceleração ou à desaceleração do fluxo (forma das vertentes); de modo a contemplar elementos que subsidiem uma maior aproximação do modelo à complexidade inerente aos processos erosivos. Além disso, tais fatores foram analisados de modo diferenciado, levando-se em conta os distintos condicionantes aos processos erosivos hídricos laminares e lineares (POESEN, 2011).

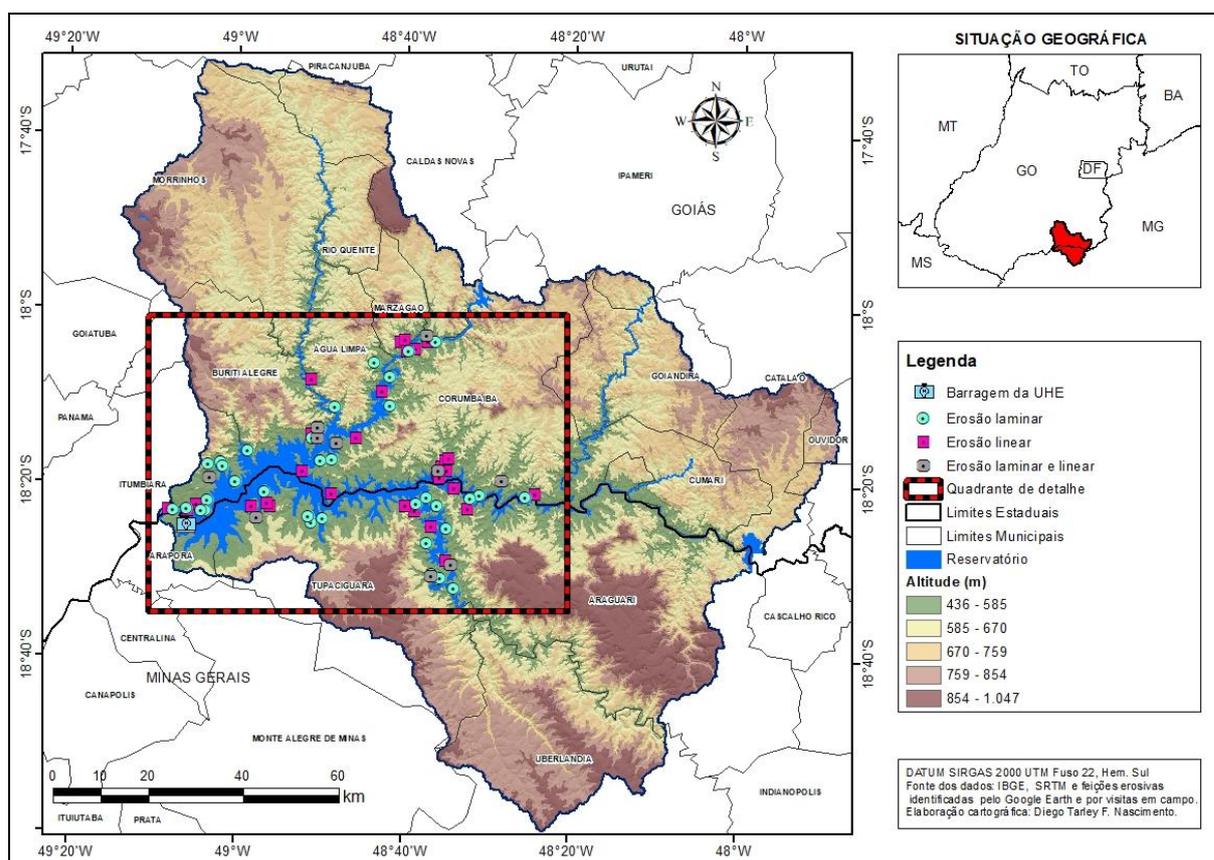
A proposta de modelagem ora apresentada foi concebida no âmbito de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&DT), intitulado “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e a Universidade Federal de Goiás (UFG) para monitorar, avaliar e mitigar os impactos de processos erosivos em bordas de reservatórios.

METODOLOGIA

Em suma, os procedimentos metodológicos compreenderam sete principais etapas, elencadas e detalhadamente descritas a seguir:

1) Organização da base cartográfica – foi realizada a compilação de dados secundários, tanto vetoriais (*shapfiles*) quanto matriciais (imagens de satélite), em diversas instituições e órgãos governamentais das esferas federais, estaduais e municipais. Nessa etapa, foi considerada, como recorte espacial, a bacia hidrográfica, delimitada, tendo como limite à jusante a barragem da UHEI (Figura 1). Os arquivos foram organizados no *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2013)., de modo a comporem um projeto georreferenciado em um sistema de referência SIRGAS 2000 UTM, Fuso 22, Hemisfério Sul.

Figura 1 - Localização da área em estudo com a hipsometria, a indicação das feições erosivas cadastradas e do quadrante de detalhe.



Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf1>.

2) Cadastro de feições erosivas – a área compreendida pelas bordas do reservatório foi inspecionada por meio de interpretação visual de imagens de alta e média resolução disponíveis no *software* Google Earth versão profissional (GOOGLE, 2015) para cadastro de tais feições, conforme metodologia discriminada por Nascimento et al. (2015). Além das atividades de gabinete, foram realizadas sete visitas de campo na UHE de Itumbiara, dentre 2012 e 2016, para reconhecimento da área, coletas de amostras de solos e detalhamento dos mapeamentos, as quais também serviram para o cadastro. Apesar da compilação de

dados secundários e do processamento digital para levantamento dos dados derivados terem contemplado a bacia hidrográfica, a etapa de cadastro das feições e também a elaboração das representações cartográficas abarcaram apenas um quadrante de detalhe envolvendo o entorno do reservatório da UHEI, delimitado pelos meridianos 49°10' e 48°22' de longitude Oeste e pelos paralelos 18° e 18°33' de latitude Sul, no limite entre os estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 1).

3) Processamento digital do MDE e geração de variáveis secundárias – por meio do processamento do modelo digital de elevação (MDE), oriundo das imagens radarmétricas do *Shuttle Radar Topography Mission*- SRTM (NASA, 2018), foram derivadas as variáveis morfométricas, declividades, formas do relevo, comprimento das vertentes (*downstream*) e altura vertical acima da drenagem mais próxima (*Height Above the Nearest Drainage* – HAND). No caso dessa última variável, foi utilizado limiar de 500 (utilizando-se o programa TerraView/TerraHidro (INPE, 2018) e agrupamento em classes que, conforme Rennó et al. (2008) e Nobre et al. (2011), associadas a classes de declividades, são capazes de representar áreas alagadas (<5m), de transição (5 a 15m), de encostas (15 a 50m) e de topos de morro (>50m);

4) Levantamento, redefinição de limites de unidades e modelagem dos condicionantes físicos – nessa etapa foram compilados e redefinidos limites de unidades do condicionante pedológico, realizado o levantamento dos dados climáticos e a modelagem dos dados de altimetria, para mapeamento da suscetibilidade dos terrenos à deflagração de processos erosivos hídricos. Assim, seguiram-se os procedimentos: (a) diante da inexistência de mapeamento de solos em escala pretendida (1:100.000), inicialmente foram redefinidos com melhor resolução, segundo a referida escala, os limites das unidades pedológicas indicados por mapeamentos em escalas menores, considerando o mapeamento que compreende o estado de Goiás realizado pela Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural, e Pesquisa Agropecuária (EMATER, 2017), em escala de 1:250.000, e, para Minas Gerais, o mapeamento desenvolvido no âmbito do convênio firmado entre a Universidade Federal de Viçosa (UFV), a Universidade Federal de Lavras (UFLA), a Fundação Centro-Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) e a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), em escala de 1:500.000 (UFV et al., 2019). O procedimento de refinamento se baseou na interpretação visual de imagens de satélite (SRTM, NASA, 2018, *RAPIDEYE*, 2012 e *Google Earth*, *GOOGLE*, 2015) e sendo observadas as altitudes, litologias, declividades e formas do relevo. Em seguida, os tipos de solos foram avaliados com relação a suas características de resistência, à desagregação e ao transporte, conforme apontamentos realizados por Salomão (2007) e Salomão, Canil e Rodrigues (2012), sendo agrupados e reclassificados em termos de erodibilidade – Quadro 1;

Quadro 1 - Classes de erodibilidade conforme as categorias de solo.

Categoria de solo	Erodibilidade
Neossolo Litólico, Cambissolo	Alta
Argissolo, Nitossolo Vermelho, Chernossolo Argilúvico	Média
Latossolo, Plintossolo Pétrico, Gleissolo, Neossolo flúvico	Baixa

Fonte - próprios autores, com base em Salomão (2007) e Salomão, Canil e Rodrigues. (2012).

(b) quanto ao condicionante climático, o recorte espacial e a quantidade de estações climáticas existentes no entorno determinaram o cálculo de um índice de erosividade para caracterização climática da área, tendo sido constatada uma variação que indicou a não viabilidade de sua espacialização. Com base nas médias mensais e anuais de precipitação para o período de 1990 a 2015, registradas pela estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (INMET, 2016) localizada em Itumbiara, foi calculado o índice de erosividade (EI). Esse índice indica a energia potencial da água da chuva passível de ocasionar a desagregação do solo, tendo sido proposto por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) para Campinas-SP e ajustado por Cabral et al. (2005) para Morrinhos-GO (município situado a 86 km de Itumbiara), segundo coeficientes para as condições climáticas regionais (Equação).

Por fim, foi utilizada a classificação do índice de erosividade anual proposto por Carvalho (2008) para o território brasileiro, conforme explicitada pelo Quadro 2.

$$EI = 67,355(p^2/P)^{0,85}$$

EQUAÇÃO

onde:

EI = índice de erosividade média mensal, dado em MJ mm.ha-1.mês-1

p = média de precipitação mensal (em mm)

P = média de precipitação anual (em mm).

Quadro 2 - Classificação do índice anual de erosividade para o Brasil.

< 2.452	Baixa erosividade
2.452 a 4.905	Média erosividade
4.905 a 7.357	Média a forte erosividade
7.357 a 9.810	Forte erosividade
> 9.810	Muito forte erosividade

Fonte - Carvalho (2008).

(c) para o condicionante associado ao relevo, foram ponderadas e cotejadas as variáveis de declividades, comprimento das vertentes, formas do relevo e altura vertical acima da drenagem mais próxima (HAND), conforme as condições que favorecem a infiltração ou o escoamento superficial, e se esse último ocorre de forma concentrada ou difusa, acelerada ou não, conforme apontado por Valeriano (2008), Silva Neto (2013), Nobre et al. (2011) - Quadro 3. Os maiores valores de declividade, bem como os de comprimento das vertentes, foram associados tanto à maior velocidade, quanto a um maior tempo de atuação do fluxo superficial, respectivamente. As demais variáveis (formas do relevo e HAND) tiveram critérios definidos considerando o processo laminar ou linear – tratadas separadamente por se considerar que são deflagrados e que evoluem por diferentes condições de escoamento superficial e de subsuperfície. Para o caso da erosão laminar, o HAND foi utilizado observando-se que os topos do morro e, em segundo lugar, as áreas alagadas (de nascentes e regiões de planícies e terraços) possuem menor energia potencial para deflagração do processo, enquanto as áreas de encostas e de transição possuem maior. Quanto à erosão linear, foi também inferido que as maiores suscetibilidades se encontram em encostas e em áreas de transição, considerando que a tendência é que a ocorrência seja à meia encosta, normalmente associada à surgência d'água, ou próxima a bordas de chapadas ou chapadões. Por sua vez, as menores suscetibilidades associam-se a principalmente às planícies e terraços, nos fundos de vale. O topo de morro foi considerado com suscetibilidade intermediária, quanto aos condicionantes da erosão linear. No que concerne às formas do relevo, a maior suscetibilidade à erosão laminar foi associada às formas que promovem maior escoamento superficial, de modo homogêneo e acelerado. A média suscetibilidade foi relacionada àquelas que resultam num escoamento homogêneo, porém com desaceleração no sopé do talude (curvaturas côncavas), enquanto a baixa suscetibilidade foi indicada por formas que condicionam escoamento concentrado e que podem ser consideradas como indicadores da desaceleração do fluxo. Para o caso das erosões lineares, a maior suscetibilidade foi relacionada às formas que condicionam um escoamento concentrado, enquanto que a menor suscetibilidade foi indicada pelas demais formas que condicionam um escoamento difuso. A partir da reclassificação das classes dos mapas de declividade, de comprimento das vertentes, de formas do relevo e do modelo HAND para os seus respectivos pesos, foi realizada uma álgebra entre os mapas, tendo sido utilizados os seguintes intervalos de 4 a 6; de 6 a 9 e; de 10 a 12 de modo a indicar a baixa, média e alta tendência de suscetibilidade associada às variáveis morfométricas.

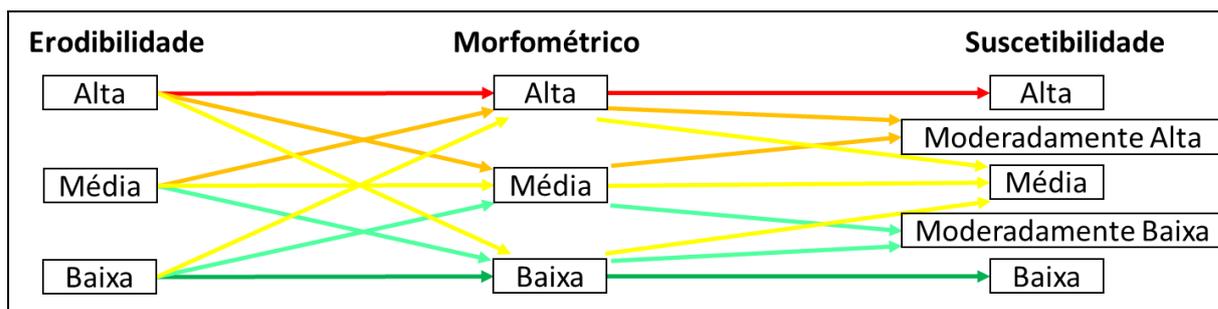
Quadro 3 - Pesos dos atributos morfométricos perante a suscetibilidade erosiva.

Pesos		ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS			
		Declividade (%)	Comprimento das Vertentes (m)	Formas do relevo	HAND (m)
Erosão Laminar	3	> que 45	> que 500	convexo-convergente, convexo-planar, convexo-divergente, retilíneo-convergente, retilíneo-divergente, retilíneo-planar	5 a 50 (transição e encosta)
	2	8 a 45	100 a 500	côncavo-planar, côncavo-divergente	< que 5 (alagadas)
	1	< que 8	< que 100	côncavo-convergente	> que 50 (topo de morro)
Erosão Linear	3	> que 45	> que 500	convexo-convergente, retilíneo-convergente, côncavo-convergente	5 a 50 (transição e encosta)
	2	8 a 45	100 a 500	Não se aplica	> que 50 (topo de morro)
	1	< que 8	< que 100	convexo-planar, retilíneo-planar, côncavo-planar, convexo-divergente, retilíneo-divergente, côncavo-divergente	< que 5 (alagadas)

Fonte - próprios autores, com base em Valeriano (2008), Silva Neto (2013), Nobre et al. (2011).

5) Modelagem da tendência à suscetibilidade a partir dos atributos morfométricos – pela sobreposição entre os mapas de erodibilidade e de tendência à suscetibilidade relacionada aos atributos morfométricos, foram elaborados os mapas de síntese referentes à Suscetibilidade à Erosão Laminar e à Suscetibilidade à Erosão Linear. Assim, foi feita uma análise integrada da fragilidade dos condicionantes físicos frente à deflagração desses processos. A Figura 2 indica as regras definidas da intersecção entre as classes de erodibilidade com a suscetibilidade dos atributos morfométricos, resultando na classificação da suscetibilidade propriamente dita, resultando nos referidos mapas de síntese.

Figura 2 - Regras da intersecção do mapa de erodibilidade com os morfométricos.



Fonte - próprios autores.

6) Mapeamento de uso e cobertura do solo – a partir de imagens do satélite RapidEye (2012), referentes ao ano de 2012 e disponibilizadas pelo Ministério de Meio Ambiente (MMA), foram realizadas a segmentação, a classificação supervisionada pelo algoritmo *battacharya* disponível no programa SPRING/INPE (CÂMARA et al., 1996) e a posterior validação do mapeamento de uso e cobertura do solo, por meio de visitas em campo. Nessa etapa, o recorte espacial utilizado foi o de um polígono respeitando as órbitas/ponto das cenas das imagens de satélite e o limite da sub-bacia hidrográfica – relativamente próximo ao retângulo envolvente anteriormente considerado, segundo a disponibilidade e a qualidade das imagens de satélite para a data da análise. O produto dessa etapa encontra-se disponível em Nascimento et al. (2017) e em Medrado et al. (2019).

7) Modelagem da potencialidade erosiva laminar e linear – por fim, o mapeamento de uso e cobertura do solo foi cotejado aos mapeamentos de suscetibilidade e reclassificados em termos de potencialidade erosiva, laminar e linear, assim como, quanto à situação de proteção da superfície terrestre pela presença de cobertura vegetal – capaz de amenizar o impacto das gotas de chuvas (e diminuir a energia cinética), além de aumentar o potencial da infiltração. Também foram analisados os usos antrópicos que tendem a expor os terrenos à desagregação e ao transporte por escoamento superficial. As regras de sobreposição, nesse caso, respeitaram os procedimentos metodológicos adotados por Bertoni e Lombardi Neto (2010), cujos critérios adotados são apresentados no Quadro 4. Conforme descrito pelos autores, a Classe I – Alto Potencial indica uso atual do solo incompatível com a suscetibilidade à erosão, refletindo locais com alta suscetibilidade, ocorrendo sob usos antrópicos ou com rarefeita vegetação; a Classe II – Média Potencialidade caracteriza os locais com uso atual incompatível com a suscetibilidade, porém passíveis de serem controlados com práticas conservacionistas adequadas, traduzindo-se em locais com média ou baixa suscetibilidade ocupados por atividades antrópicas e; a Classe III – Baixo Potencial refere-se ao uso atual do solo compatível com a suscetibilidade à erosão, como é o caso de áreas de alta ou média suscetibilidade, protegidas por cobertura de vegetal ou de áreas de baixa suscetibilidade, ocupadas por usos antrópicos menos intensivos.

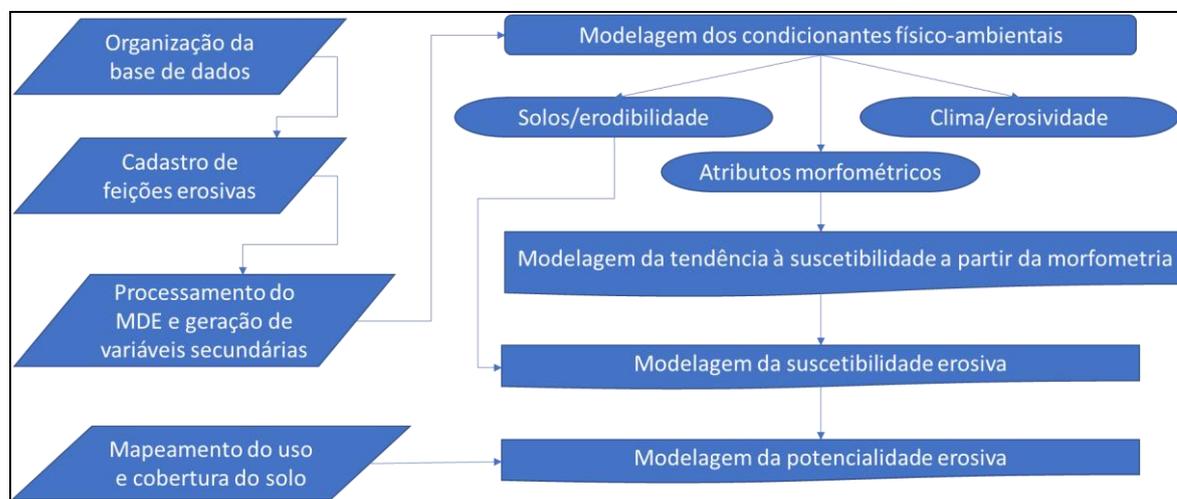
Quadro 4 - Classes de potencialidade oriundas do cotejamento da suscetibilidade e do uso do solo.

Suscetibilidade/Usos	Área Urbana e Agricultura	Pastagem	Vegetação campestre e savânica	Vegetação Florestal
Alta & Moderadamente Alta	I	I	I	III
Média	II	II	III	III
Moderadamente baixa & Baixa	II	III	III	III

Fonte - adaptado de Bertoni e Lombardi Neto (2010).

Uma síntese do percurso metodológico é apresentada por meio do fluxograma da Figura 3, a seguir, em que se pese o intuito maior do presente trabalho em contribuir com uma proposta metodológica que considere os aspectos pedológicos, climáticos e topográficos para modelagem da suscetibilidade erosiva e, a partir da incorporação do conhecimento do uso e da cobertura do solo, também fornecer indícios da potencialidade à erosão do tipo laminar e linear, tendo como escopo avaliar a produção de sedimentos no entorno de UHE.

Figura 3 - Fluxograma do percurso metodológico para modelagem da suscetibilidade e potencialidade erosiva.



Fonte - próprios autores.

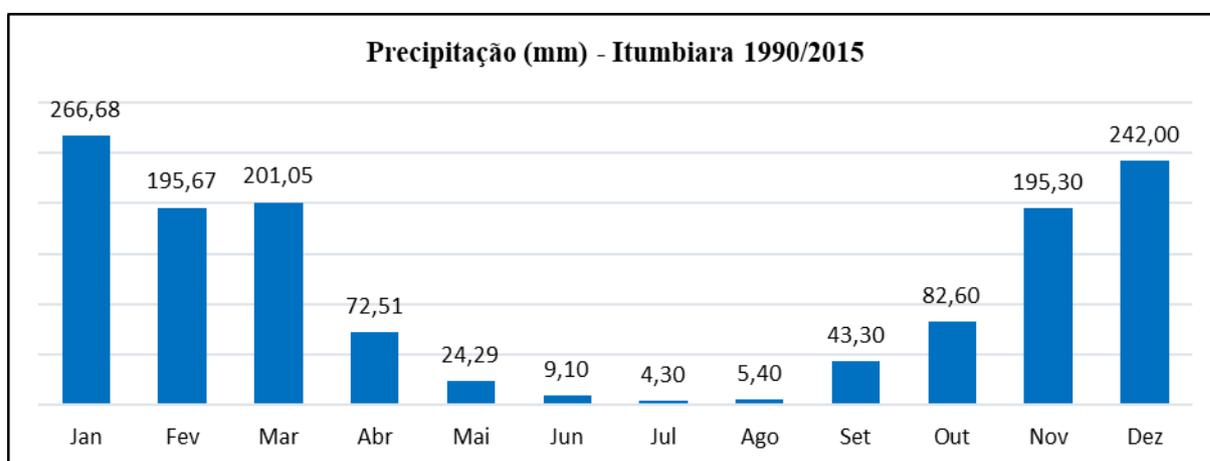
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos que seguem são caracterizados e analisados os aspectos climáticos (erosividade) e a variação espacial dos condicionantes físicos em correspondência às ocorrências de feições erosivas, no tocante aos elementos pedológicos (erodibilidade) e topográficos (morfometria). Logo na sequência, também são apresentados os mapeamentos de síntese, relacionados à modelagem da suscetibilidade e da potencialidade às erosões laminares e lineares, no entorno do reservatório da UHEI.

Aspecto climático (Erosividade)

Conforme apontado por Nimer (1979), o clima na região é o Tropical Brasil Central Subquente e semiúmido, com quatro a cinco meses secos (maio a setembro). Segundo dados do INMET (2016) para a estação meteorológica de Itumbiara, a média anual de precipitação é de 1.342,20 mm, com período chuvoso de sete meses, verificado entre os meses de outubro a abril (Figura 4).

Figura 4 - Média de precipitação mensal em Itumbiara (1990/2015).



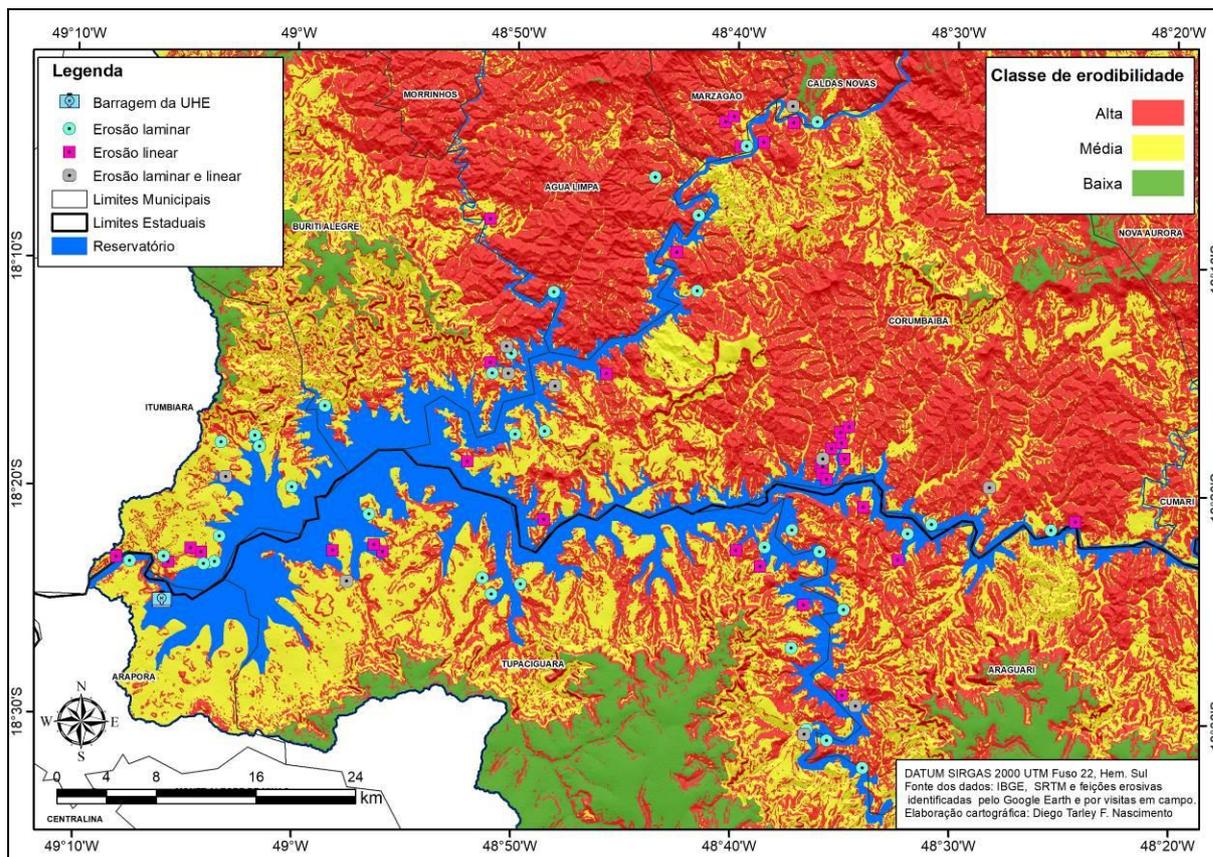
Fonte - próprios autores, com base nos dados do INMET (2016).

O maior volume de precipitação é registrado no mês de janeiro (característico do verão), quando o índice de erosividade é de 1.967,4 MJ mm.ha-1.mês-1. Na soma dos índices de erosividade média mensal, esse valor passa a alcançar 7.790,4 MJ mm.ha-1, o que representa forte erosividade, conforme indicado por Carvalho (2008). Isso indica que as chuvas na região apresentam considerável potencial de deflagrar processos erosivos, capacidade essa que pode ser traduzida pelo potencial de desagregação do solo promovido pela energia cinética gerada pelo impacto da água das chuvas numa superfície desprovida de cobertura vegetal (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Aspecto pedológico (Erodibilidade)

Na área predomina a alta erodibilidade, associada às áreas de ocorrência de Cambissolos e de Neossolo Litólico, que podem ser vistas por extensas manchas na porção nordeste do quadrante, coincidentes com os municípios de Morrinhos, Água Limpa, Mazargão, Caldas Novas, Nova Aurora e Corumbaíba. A ocorrência de média erodibilidade se dá justamente nas bordas do reservatório da UHE, principalmente mais próximo à barragem, e relaciona-se a solos do tipo Argissolo Vermelho e à associação de Cambissolos e Latossolo Vermelho, vistos no contexto dos municípios de Buriti Alegre, Itumbiara, Tupaciguara e trecho de Corumbaíba; ao passo que a baixa erodibilidade é retratada por áreas com predomínio de Latossolo Vermelho, presentes nas áreas mais planas, nos topos dos chapadões, especialmente na porção sul do quadrante, em Tupaciguara e Araguari, em Minas Gerais (Figura 5).

Figura 5 - Erodibilidade no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf05>.

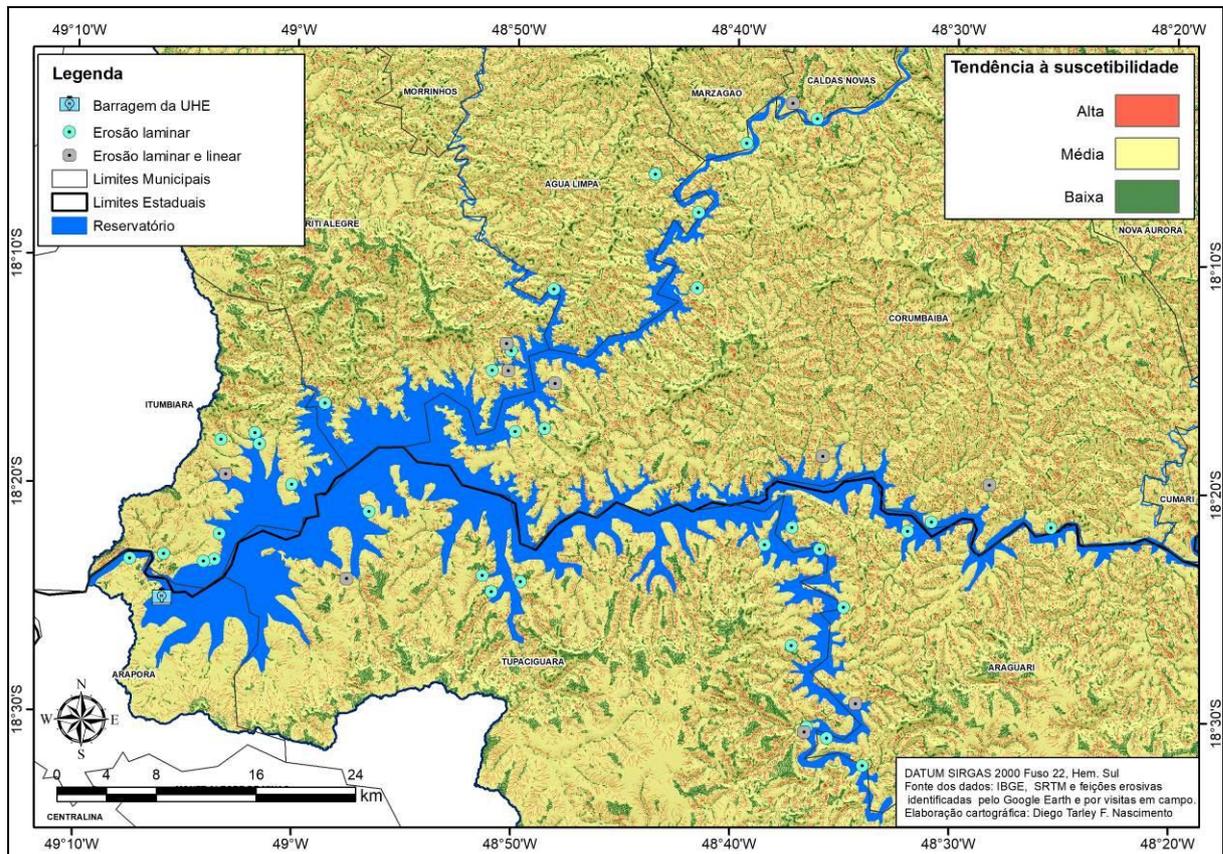
Dentre as 79 feições erosivas, 35 se referem ao tipo laminar e 34 lineares, com 10 feições laminares associadas a lineares, de forma simultânea. Desse total, 45 ocorrências coincidem com a alta erodibilidade, verificadas sobre Cambissolos, ao passo que 34 são vistas sobre média erodibilidade, especialmente sobre a associação entre Cambissolos e Latossolos Vermelhos.

Aspecto topográfico (morfométrico)

O condicionante morfométrico foi capaz de descrever as diferentes condições de tendência à suscetibilidade erosiva, a partir dos mapeamentos das variáveis, declividade, comprimento das vertentes, formas do relevo e HAND. Contudo, tendo em vista que uma variável isolada não é capaz de explicar sozinha a maior ou menor suscetibilidade, levaram-se em consideração os mapas sínteses, elaborados a partir do cotejamento entre os parâmetros morfométricos, para definição dos diferentes níveis de suscetibilidade erosiva laminar e linear. Atenta-se ao fato de que apesar de serem ponderados e cotejados, os valores numéricos dos aspectos de declividade, comprimento das vertentes, formas do relevo e HAND, o mapa de síntese denominado como morfométrico (Figura 6) expressa as classes hierárquicas referentes à baixa, média e alta tendência à suscetibilidade do relevo aos processos erosivos laminares e lineares.

No caso da suscetibilidade à erosão laminar, em relação à morfometria, os maiores valores traduzem-se em declividades superiores a 45%, comprimentos de vertentes acima de 500 m, formas que condicionam um escoamento homogêneo e acelerado, atuando mais tempo sobre as vertentes, em associação às áreas de transição ou encostas. Entretanto, grande parte das vertentes com comprimento acima de 500 m se trata do próprio canal de drenagem, além disso, na área em estudo são ínfimas as áreas com declividades superiores a 45% – por tal motivo, essas áreas se restringem a pequenas porções na encosta da vertente (Figura 6).

Figura 6 - Mapa morfométrico de tendência à suscetibilidade erosiva laminar no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



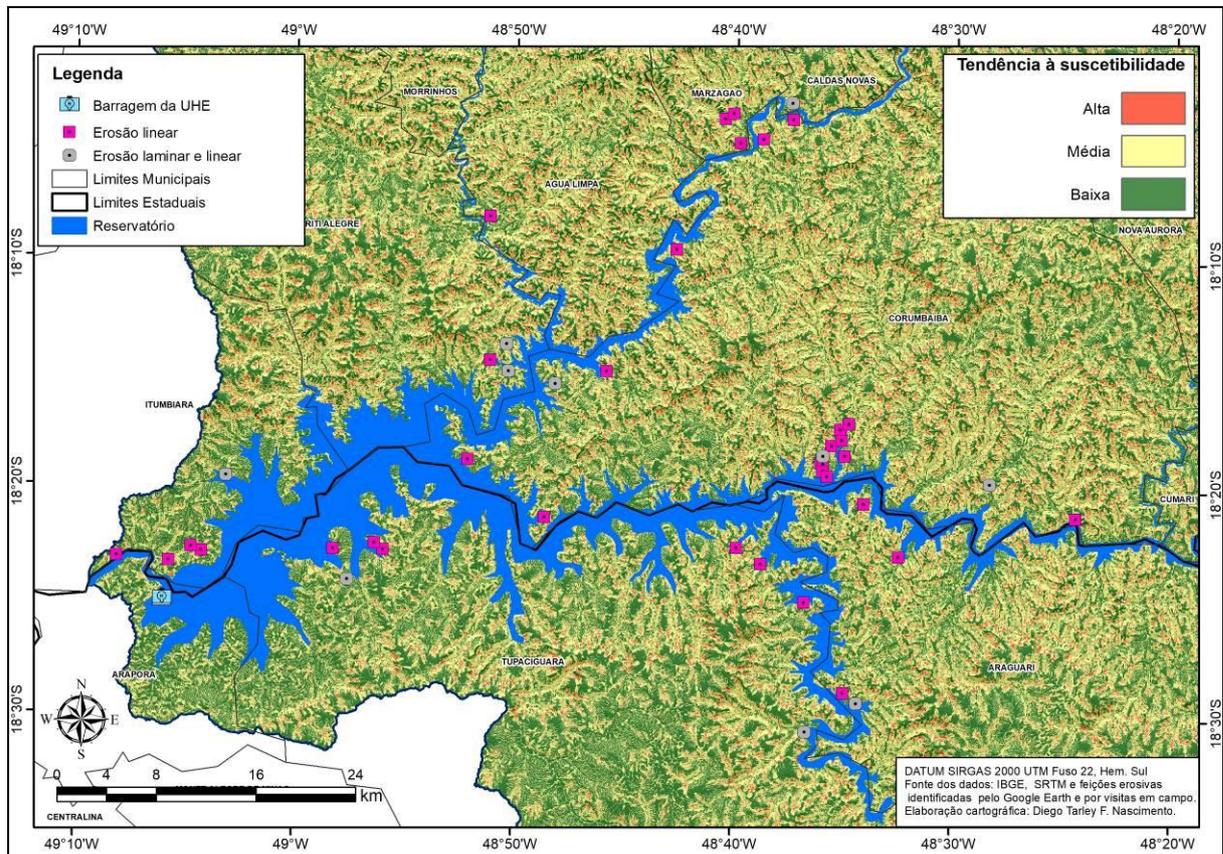
Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf06>

Por sua vez, a menor suscetibilidade em relação à morfometria é representada por declividades inferiores a 8% e comprimentos de vertentes menores que 100 m, atreladas a topos de morros e formas que ocasionam escoamento concentrado, com desaceleração no sopé das vertentes, também ocorrendo de forma bastante limitada na área em estudo, especialmente em divisores de água e em topos de morro. O predomínio é para média suscetibilidade, retratada por declividades entre 8 e 45%, vertentes variando entre 100 e 500 m, formas do relevo com escoamento acelerado e em áreas de alagamento (isto é, de até 5 m de altura com relação à drenagem mais próxima).

Do total de 45 feições erosivas laminares (apenas laminares ou associadas às lineares), a maioria (34 – isto é, 75,6%) incide sobre a classe de média suscetibilidade à erosão laminar da morfometria, obviamente, por conta de essa classe predominar na área do entorno do reservatório da UHE de Itumbiara. Contudo, há o registro de oito feições na classe alta e três sobre a baixa suscetibilidade erosiva no contexto do mapa morfométrico. As feições laminares coincidentes à classe de alta suscetibilidade da morfometria à erosão laminar estão atreladas às áreas com comprimentos de vertentes superiores a 100 m, áreas de transição (entre 5 e 15 m de altura com relação à drenagem mais próxima), declividade variando até 15%; ao passo que aquelas que ocorrem na classe de baixa suscetibilidade coincidem com áreas com declividade de até 8%, comprimentos de fluxo de até 100 m e áreas de alagamento.

No caso da suscetibilidade à erosão linear, a mais elevada quanto à morfometria (Figura 7) é indicada por declividades superiores a 45% e comprimento das vertentes acima de 500m, em áreas de transição e de encostas e formas do relevo que indicam uma tendência ao escoamento concentrado; enquanto que a menor suscetibilidade refere-se a menores declividades e comprimento de vertentes, correlacionados a áreas de alagamento e formas que tendem a um escoamento difuso.

Figura 7 - Mapa morfométrico de tendência à suscetibilidade erosiva linear no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf07>

Conforme observado, o predomínio é das classes de baixa e média suscetibilidade para as feições de erosões lineares na área em estudos, com a coincidência espacial de 32 (das 44 feições) sobre a classe de média suscetibilidade, cinco ocorrências sobre a alta e sete sobre a baixa suscetibilidade. As erosões lineares verificadas em condição de alta suscetibilidade coincidem com áreas com declividades superiores a 8%, comprimentos superiores a 100 m, situados em áreas de transição e de encosta, em formas do relevo côncavo-convergente, enquanto que as sete erosões encontradas junto à classe de baixa suscetibilidade representam áreas com declividades inferiores a 8% e comprimentos inferiores a 100 m, situados em áreas de transição e de encosta, em formas de relevo diversas.

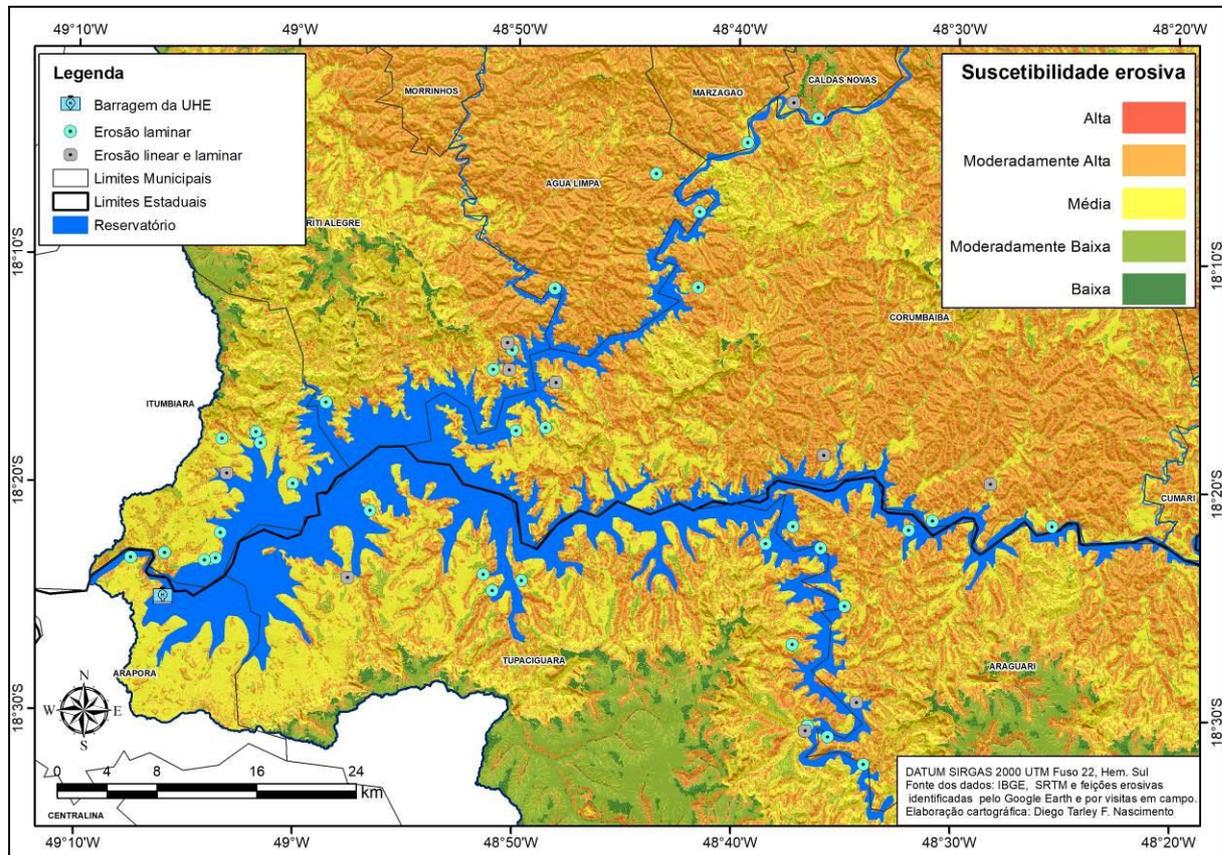
Modelagem da suscetibilidade à erosão laminar e linear

Os mapeamentos da suscetibilidade à erosão laminar e linear foram levantados a partir da intersecção entre o mapa das condições de fragilidade das coberturas pedológicas (erodibilidade) e o de suscetibilidade da morfometria do relevo (morfométrico), com pontos de vistas distintos por se considerar que as feições do tipo laminar e linear são deflagradas e evoluem por processos distintos. Enquanto as primeiras associam-se principalmente aos processos gerados por escoamento laminar homogêneo acelerado, as segundas podem ser deflagradas pelo fluxo superficial concentrado, associado a reativações de canais de drenagem (erosão regressiva) ou ainda à erosão interna.

A Figura 8 a seguir retrata o mapeamento da suscetibilidade à erosão laminar, com o perceptível predomínio da suscetibilidade moderadamente alta, na porção norte, noroeste, oeste e sudeste do quadrante em estudo, concentrando dentre os municípios de Morrinhos, Água Limpa, Marzagão, Caldas Novas e Corumbaíba; e da média suscetibilidade, a leste e sudeste da área, coincidindo com os municípios de Itumbiara, Araporã, Tupaciguara e Araguari, estando essas classes especialmente relacionadas aos Cambissolos e à associação de Latossolo Vermelho e Cambissolo, respectivamente. Na

porção sul e sudoeste da área, isto é, em Tupaciguara e Araguari, ocorrem manchas com suscetibilidade moderadamente baixa e, em menor proporção, baixa, correspondente às áreas planas de topos de morros e chapadões.

Figura 8 - Mapa de suscetibilidade à erosão laminar no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf08>

Do total de 45 feições, a maior incidência corresponde às classes de suscetibilidade moderadamente alta (25) e média (16), quanto à modelagem da suscetibilidade à erosão laminar. As ocorrências correlatas à classificação em suscetibilidade moderadamente alta refletem áreas com alta erodibilidade (Cambissolos) e média suscetibilidade relacionada aos parâmetros morfométricos (em áreas de transição e de encosta, declividades superiores a 8% e comprimentos de vertente acima de 100 m).

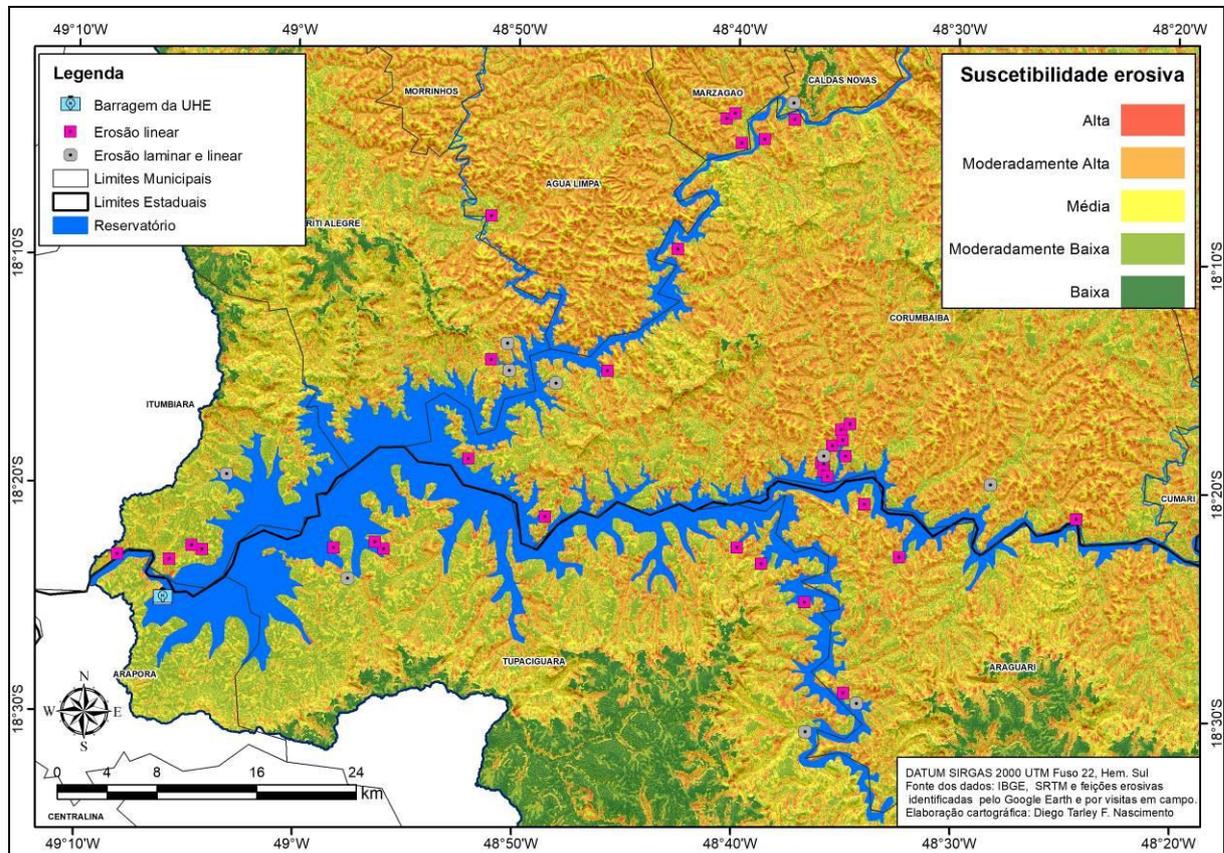
O caso das erosões incidentes na classe de média suscetibilidade reflete a associação de média erodibilidade (pela associação de Latossolo Vermelho com Cambissolos) e de média suscetibilidade dos parâmetros morfométricos (sob as condições de declividades inferiores a 8% e de comprimentos de fluxo de até 100 m).

Das feições laminares, três coincidiram com a classe de alta suscetibilidade, relacionadas à alta erodibilidade (Cambissolos) e à alta suscetibilidade dos atributos morfométricos (com declividades superiores a 8% e comprimentos acima de 100 m), ao passo que apenas uma correspondeu à classe de moderadamente baixa suscetibilidade erosiva. Esse último fato justifica-se pela correspondência à média erodibilidade (associação de Latossolo Vermelho e Cambissolos) e à baixa suscetibilidade sugerida pelo mapa morfométrico (com declividade abaixo de 8%, forma côncavo-convergente e área de alagamento).

Por sua vez, a Figura 9 representa o mapeamento da suscetibilidade às erosões lineares, indicando uma menor proporção de áreas delimitadas como sendo de moderadamente alta suscetibilidade e de maior presença da classe de baixa suscetibilidade, em comparação ao caso das erosões laminares. Das 44 feições de erosões lineares, ou em associação às laminares, a maior proporção (77,3%) incide sobre as classes de moderadamente alta (22) ou de média (12) suscetibilidade. Das erosões restantes, três

coincidem com a classe de alta suscetibilidade e sete, com a classe de moderadamente baixa suscetibilidade.

Figura 9 - Mapa de suscetibilidade à erosão linear no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf09>

As três erosões coincidentes com a classe de alta suscetibilidade erosiva condizem com a associação entre alta erodibilidade (Cambissolo) e alta ou média suscetibilidade dos parâmetros morfométricos (com declividade superior a 8%, comprimentos de vertentes acima de 100 m, ocorrendo em áreas de transição e em formas côncavo-convergente). Para o caso das 22 erosões relacionadas à classe de moderadamente alta suscetibilidade, verifica-se a combinação de alta ou de média erodibilidade (Cambissolos ou associação de Latossolo Vermelho e Cambissolos), com o predomínio da média suscetibilidade dos parâmetros morfométricos (com predomínio de formas côncavo-convergente).

Por sua vez, as 12 feições erosivas verificadas sobre a classe de média suscetibilidade se referem à condição de média erodibilidade (associação) e de média suscetibilidade dos parâmetros morfométricos (com declividade de até 8%, predomínio de comprimentos inferiores a 100 m, em áreas de encosta), ao passo que as sete feições que ocorrem sobre a classe de moderadamente baixa suscetibilidade correspondem à combinação de média erodibilidade e de baixa suscetibilidade dos atributos morfométricos (declividades inferiores a 8%, predomínio de comprimentos de vertente menores que 100 m e de formas convexo-divergente).

Modelagem da potencialidade à erosão laminar e linear

Conforme o mapa de uso e cobertura do solo, elaborado a partir da classificação de imagens do satélite RapidEye de 2012 (NASCIMENTO et al., 2017; MEDRADO et al., 2019), na UHE de Itumbiara há o predomínio de cobertura antrópica (56,46%) com relação à natural (43,54%). A pastagem tem maior representatividade no quadrante de detalhe ao longo do reservatório da UHE de Itumbiara, representada por uma grande e uniforme mancha ao longo das porções norte, nordeste, leste e sudeste, vinculadas aos municípios de Buriti Alegre, Morrinhos, Água Limpa, Marzagão, Caldas Novas, Corumbaíba, Cumari e Araguari; ao passo que áreas agrícolas ocorrem em menor proporção, margeando as bordas do

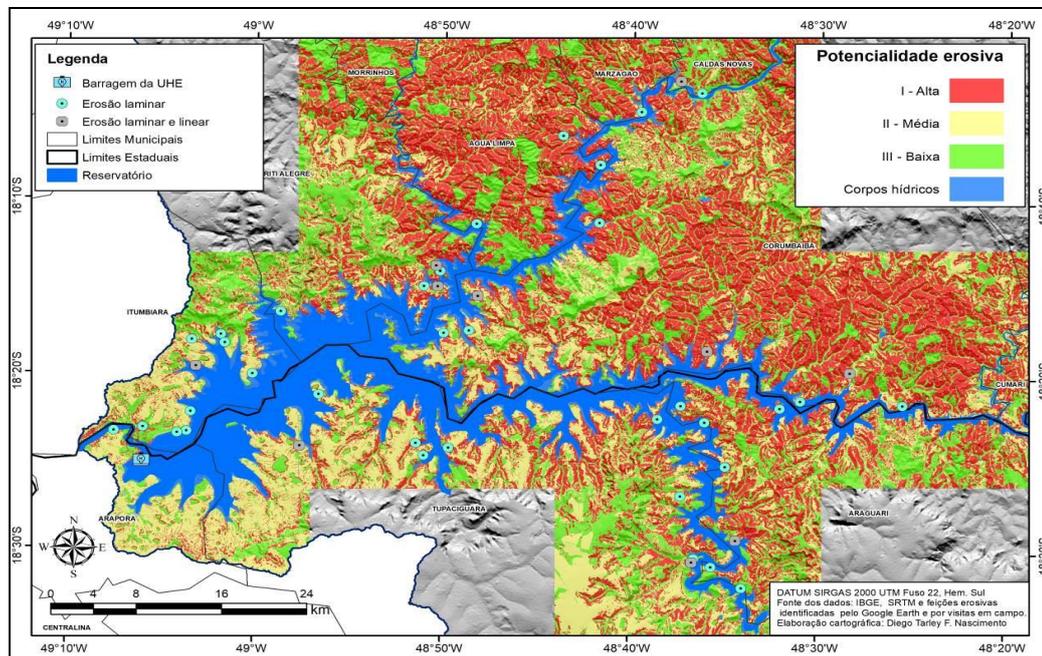
reservatório, principalmente ao sul, ao sudoeste e a oeste, mais próximo à barragem da UHE, junto aos municípios de Itumbiara, Araporã e Tupaciguara. Apesar de uma ocorrência irrisória, também vale destacar a presença de áreas urbanizadas próximas ao reservatório da UHE de Itumbiara, que ora tratam-se de sedes municipais (como de Tupaciguara) ou de condomínios de casas ou chácaras implantados às bordas do reservatório (conforme visto no município de Corumbaíba).

Mesmo retratando uma intervenção antrópica, oriunda do represamento de trecho do Rio Paranaíba, o reservatório da UHE de Itumbiara foi considerado como cobertura natural, uma vez que o Manual Técnico de uso da terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013) considera reservatórios artificiais pertencentes à classe de corpos hídricos que, aliás, se destaca na área em apreço, podendo alcançar segmentos de até 18 km. Com relação às coberturas vegetais, as fitofisionomias florestais predominam, com menor proporção da campestre e da savânica, verificadas em pequenos fragmentos próximos à borda do reservatório. Convém destacar que a região compreende um trecho do bioma da Mata Atlântica encravado no bioma Cerrado.

Considerando que a suscetibilidade diz respeito à capacidade natural dos materiais existentes no terreno em serem desagregados e transportados pelo processo erosivo, com relação às suas características pedológicas, climáticas e topográficas, a suscetibilidade do terreno aos processos erosivos foi comparada ao tipo de uso e ocupação do solo (urbana, agrícola, pastoril, vegetação natural) existente na localidade, o que remete às condições de manejo, de proteção ou de exploração do solo. Dessa forma, a partir do cotejamento dos mapeamentos de cobertura do solo com os de suscetibilidade à erosão laminar e linear, foram elaborados os mapeamentos de Potencialidade Erosiva à Erosão Laminar e Linear, apresentados e descritos na sequência.

Por influência da correspondência das classes de moderadamente alta ou alta suscetibilidade erosiva com a classe de agricultura, pastagem ou vegetação campestre (essa última em menor proporção), a classe (I) de alta potencialidade à erosão laminar predomina na área em estudos (Figura 10). Justamente sobre essa classe é que incidem 35,6% das feições erosivas laminares (16) cadastradas.

Figura 10 - Mapa de potencialidade à erosão laminar no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



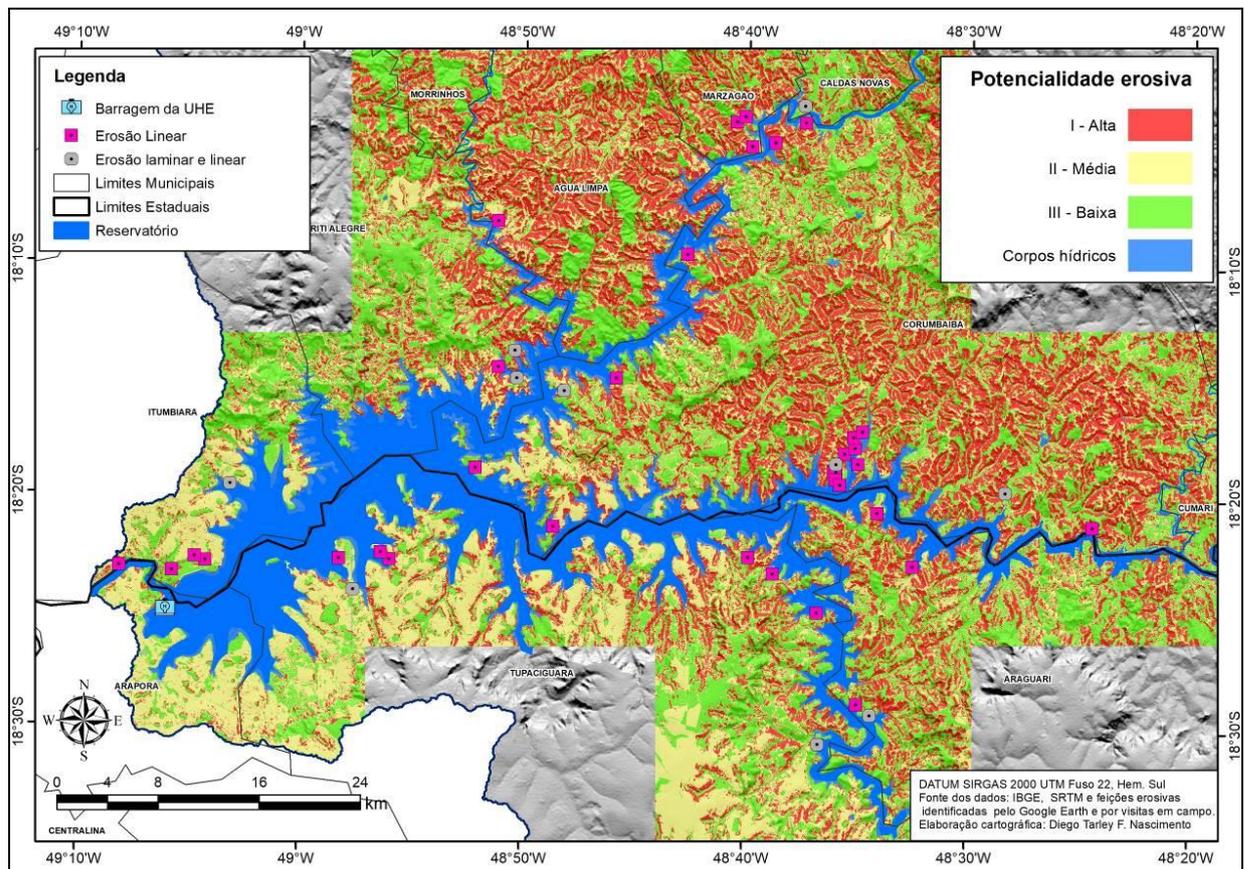
Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf10>.

Associada à média suscetibilidade e áreas de agricultura ou pastagem, a classe (II) de média potencialidade ocorre em pequenos fragmentos ao norte do reservatório ou em manchas mais extensas ao sul e a oeste. Sobre essa classe incidem 10 feições erosivas, contribuindo para o fato de que 57,8% delas situam-se em condição de média ou alta potencialidade à erosão laminar, enquanto 15,6% (isto é, sete feições) encontram-se sobre a classe (III) de baixa potencialidade, caracterizada pela correspondência da moderadamente alta e da média suscetibilidade, com as coberturas vegetais florestais ou campestres.

Vale destacar que 12 focos erosivos (26,7% das 45 erosões laminares) incidiram sobre a classe de corpos hídricos delimitada a partir do mapeamento de cobertura e uso do solo que, na proposta de Bertoni e Lombardi Neto (2010), não é considerada no cotejamento com os níveis de suscetibilidade erosiva. Essa sobreposição com a classe de corpos hídricos pode estar associada ao período de aquisição das imagens do satélite RapidEye de 2012, que foram utilizadas no mapeamento, possivelmente em um período de maior nível do reservatório.

No caso da modelagem da potencialidade à erosão linear, houve ocorrência relativamente equilibrada entre as classes de (I) alta, (II) média e (III) baixa potencialidade – Figura 11. A primeira classe ocorre ao norte, a nordeste e a leste, associada à alta ou à moderadamente alta suscetibilidade e aos usos agropastoris e à cobertura vegetal de fitofisionomia campestre, sobre a qual incidem 23 erosões (52,3% do total de erosões lineares). A (II) média potencialidade é verificada especialmente ao sul e a oeste do reservatório, sobre os quais podem ser vistas 10 ocorrências erosivas, associadas à média ou à moderadamente baixa suscetibilidade e aos usos agropastoris. Por sua vez, a classe (III) de baixa potencialidade ocorre de maneira fragmentada, sob praticamente todo o quadrante de análise, com a incidência de nove erosões atrelada à média ou à moderadamente baixa suscetibilidade, com áreas pastoris ou de vegetação campestre e florestal.

Figura 11 - Mapa de potencialidade à erosão linear no quadrante de detalhe no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



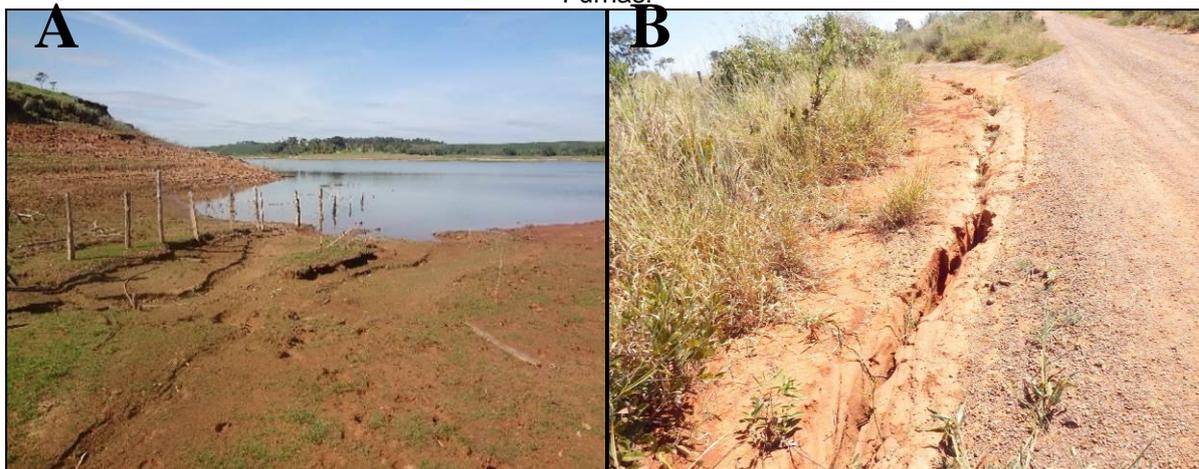
Fonte - próprios autores. Obs.: para visualizar o mapa com maior resolução, acesse: <https://abre.ai/mapaf11>

Ao ser observado no entorno do reservatório da UHE de Itumbiara o predomínio de usos agropastoris sobre terrenos demarcados como alta ou moderadamente alta suscetibilidade, tanto para ocorrência de erosões laminares quanto lineares, salienta-se o uso atual do solo incompatível com a suscetibilidade à erosão. Isso pode significar a ocorrência de perdas de solo de até 38.000 kg, por hectare, por ano, tendo em vista o tipo de cultura predominante nessas regiões. Sobre isso, Crepani et al. (2001) destacam que os usos antrópicos podem:

umentar em até 175 vezes, no caso das pastagens cultivadas, ou em até 9500 vezes, no caso de algumas culturas anuais, a perda anual de solo por hectare. [...] A contribuição humana para acelerar este processo se dá no aumento de oferta de material para transporte, que acontece sempre que o desmatamento indiscriminado e a compactação do solo, no Planalto, favorecem a disponibilidade de massas de água em superfície, promotoras do 'runoff'. (CREPANI et al., 2001, p.33).

Com a implantação de reservatórios de UHE, fazendas vizinhas se reorganizam implantando pastos margeando o reservatório, uma vez que os animais terão uma nova fonte de dessedentação de fácil acesso, ocasionando formação de trilhas e o consequente pisoteio, especialmente sobre terrenos que tendem a acelerar e/ou concentrar o escoamento superficial (Figura 12-A). Outro fato bastante comum é a implantação de condomínios, explorando usos para fins de recreação do reservatório, mas que traz impactos ao longo das vias de acesso e em locais em que há o lançamento de água pluviais no lago, que, caso ocorram sobre solos mais erodíveis ou em condições topográficas que apresentem maior suscetibilidade erosiva, tende a deflagrar e/ou intensificar processos erosivos – Figura 12-B.

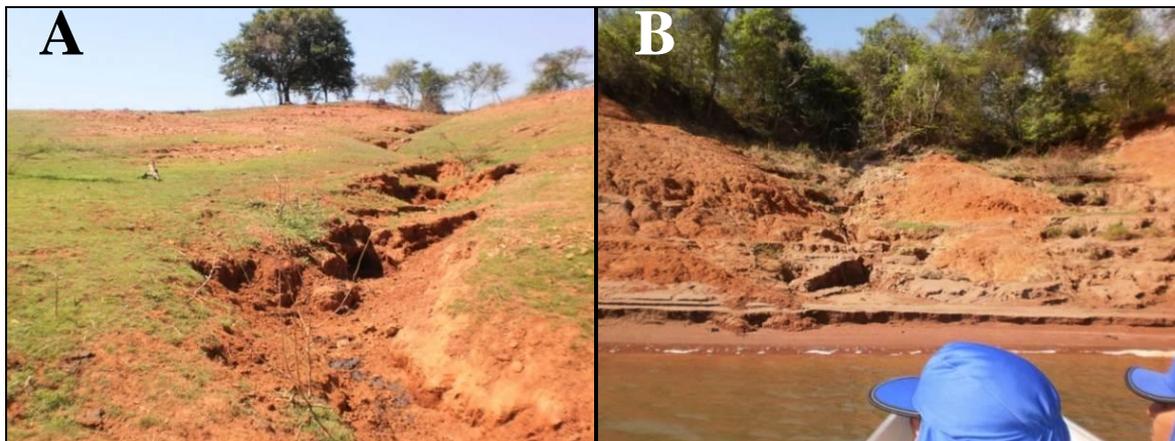
Figura 12 - Erosões decorrentes do pisoteio de gado (A) e abertura de vias de acesso (B) na UHE de Furnas.



Fonte - Diego Tarley Ferreira Nascimento (2013).

Algumas feições do tipo linear, conforme ilustrado pela Figura 13-A, são constituídas por solos frágeis, como é o caso dos tipos, Cambissolo e Neossolo Flúvico, e por pouca ou nenhuma vegetação local, estando o solo exposto ao agente climático (erosividade) – o que acelera o processo erosivo. Em algumas margens mais degradadas, junto a erosões encontram-se ainda processos de deslizamento de massas, como é o caso do exemplo da Figura 13-B, o que pode ser associado também à fragilidade do material inconsolidado. Esse desmonte deixa o solo desestruturado e sem resistência, ficando disponível para o arraste para o interior do reservatório, seja pelas ondas, seja pela oscilação do nível do reservatório ou por enxurradas.

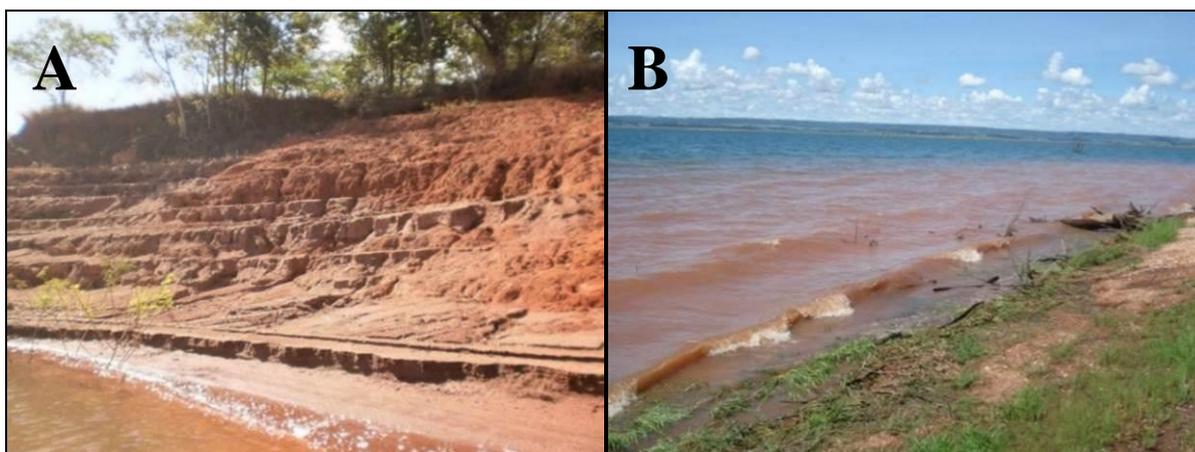
Figura 13 - Erosões associadas a solos mais erodíveis (A) ou movimentos de massa (B) na UHE de Itumbiara.



Fonte - Diego Tarley Ferreira Nascimento (2013).

Ainda, conforme comentado na introdução e apesar de alguns fatores não terem sido considerados, em específico, na metodologia apresentada, é possível ressaltar que a implantação dos reservatórios também interfere com modificações na condição do terreno e na dinâmica do fluxo das águas superficiais e subsuperficiais. Essas alterações, por sua vez, implicam na deflagração de processos erosivos ao longo das bordas dos reservatórios. Isso decorre, especialmente, por conta do solapamento da base de talude em virtude do aumento e diminuição do nível do reservatório durante sua operação (Figura 14-A), resultando em desagregação e no transporte em suspensão das partículas de solo, pela ação contínua das ondas (Figura 14-B), associada à direção e à velocidade dos ventos e à extensão em linha reta ("fetch") do reservatório.

Figura 14 - Solapamento do talude pelo rebaixamento do nível do reservatório (A) e atuação das ondas no reservatório da UHE de Itumbiara (B).



Fonte - Diego Tarley Ferreira Nascimento (2013).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi apresentada a proposta metodológica de mapeamento da suscetibilidade e potencialidade à erosão em uma região de entorno de reservatórios de UHE, seguindo-se uma metodologia qualitativa, com a inserção de critérios para a sobreposição entre os mapas temáticos e derivados, e com a definição dos diferentes níveis de suscetibilidade erosiva laminar e linear.

Os elementos e critérios utilizados na metodologia foram definidos com base na documentação cartográfica existente e na análise das condições naturais do terreno realizada nas visitas de reconhecimento das áreas de estudo, bem como na análise dos processos atuais, que estão associados à dinâmica geológica externa e que têm sido acelerados por atividades antrópicas, levando-se em conta metodologias propostas na literatura considerada (KERTZMAN et al., 1995; SENA, 2008).

A suscetibilidade às erosões laminares e aquela associada às feições lineares foram tratadas separadamente, por se considerar que são deflagradas e que evoluem por processos distintos. Enquanto as primeiras associam-se principalmente aos processos gerados por escoamento laminar homogêneo acelerado, as segundas podem ser deflagradas pelo fluxo superficial concentrado, associado a reativações de canais de drenagem (erosão regressiva) ou ainda à erosão interna.

Assim considerou-se para a suscetibilidade à erosão laminar e à linear, a correspondência de mapas que representassem as condições de fragilidade dos materiais inconsolidados (erodibilidade) e as de suscetibilidade da morfometria do relevo, frente à deflagração e à intensificação dos processos erosivos, com abordagens distintas considerando as feições erosivas, laminares ou lineares. Ou seja, a suscetibilidade foi levantada a partir da intersecção entre o mapa de erodibilidade com o mapa morfométrico.

Por isso, destacam-se alguns fatos observados a partir dessa sobreposição. A ocorrência principalmente de solos do tipo Cambissolo, de alta erodibilidade com parâmetros morfométricos associados a áreas de transição e de encosta, com declividades superiores a 8% e comprimentos de vertente acima de 100 m, apresentou correspondência expressiva com as áreas mais suscetíveis, enquanto as condições morfométricas relativas aos topos de morros e aos chapadões e com o predomínio de solos do tipo Latossolo Vermelho associaram-se às áreas menos suscetíveis ao processo erosivo laminar.

Outro fato que merece destaque trata-se da correspondência entre a maior ocorrência das feições lineares associada às áreas com maiores suscetibilidades à erosão linear, coincidentes com o predomínio de solos do tipo Cambissolo ou associação de Latossolo Vermelho e Cambissolo, em intersecção especialmente com formas côncavo-convergente em áreas de encosta. Já as áreas menos suscetíveis aos processos erosivos lineares coincidiram com solos com média erodibilidade e com formas de relevo convexo-divergente. De modo geral, foi coincidente com a ocorrência de feições erosivas lineares, a existência de declividades de até 8% e o predomínio de comprimentos de vertentes inferiores a 100 m.

Quanto à modelagem da potencialidade à erosão laminar, correspondente à boa parte das ocorrências das feições erosivas, o uso do solo associado às classes de pastagem, de agricultura ou de vegetação campestre, nessa ordem, condiciona o predomínio das classes de maiores potencialidades, na área em análise, coincidente com as áreas de maiores suscetibilidades a esses processos. Por outro lado, a existência de coberturas vegetais florestais ou campestres resultou em classes de menores potencialidades aos processos erosivos laminares e à menor ocorrência de feições erosivas correlatas.

No que se refere às correspondências das feições erosivas lineares, bem como ao padrão de ocorrência da potencialidade à erosão linear, apesar de não ser observado o predomínio de uma classe de potencialidade em relação à outra, tais feições predominam nas classes de maior potencialidade, coincidentes com as áreas mais suscetíveis aos referidos processos, cujos usos equivalem também às classes de pastagem, de agricultura e de fitofisionomia campestre.

Desdobra-se dessa constatação o fato preocupante de que o predomínio de usos por pastagem e pela agricultura, em condições de alta ou moderadamente alta suscetibilidade aos processos erosivos, tanto laminares quanto lineares, demonstra uma incompatibilidade quanto ao manejo do solo, que inadequadamente pode incorrer em perdas de solo expressivas, que inevitavelmente atingem o reservatório e redundam em sedimentação e diminuição de sua vida útil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras Furnas e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) pela coordenação técnica e financiamento, no âmbito do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”, P&D ANEEL Sedimentos, código ANEEL PD.0394-1705/2017”.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 153-160, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200001>
- ALMEIDA, W. S.; SOUZA, N. M.; REIS JÚNIOR, D. S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Análise morfométrica em bacias hidrográficas fluviais como indicadores de processos erosivos e aporte de sedimentos no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 135-149, 2013. <https://doi.org/10.20502/rbg.v14i2.251>
- AMORIM, R. S. S., SILVA, D. D., PRUSKI, F. F., MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1046-1049, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600006>
- ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Perda de solo em estradas rurais em área de cultivo de tabaco na bacia do arroio Boa Vista – Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 227-240, 2016. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i2.769>
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2010.
- BRAGA, L.; FERREIRA, R. S.; UAGODA R. E. Mapeamento de feições erosivas e análise dos fatores controladores da erosão na bacia hidrográfica do ribeirão Contagem – Distrito Federal. **Espaço & Geografia**, v.20, n.1, p. 99-121, 2017.
- CABRAL, J.B.P. et al. Estudo da erosividade e espacialização dos dados com técnicas de geoprocessamento na carta topográfica de Morrinhos-Goiás/Brasil para o período de 1971 a 2000. **GeoFocus (Artículos)**, n. 5, p. 1-18, 2005.
- CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; ASSUNÇÃO, H. F.; RAFAELLI NETO, S. L. Monitoramento da erosividade na área do reservatório da hidroelétrica de Cachoeira Dourada, GO/MG. **Geosul**, Florianópolis, v. 22, n. 44, p 47-65, 2007.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. D. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A., SILVA FILHO, F. C. Considerações sobre as propriedades e comportamentos dos solos não saturados. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. D. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A., SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. p. 733- 759.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, n.20, v.3, pp.395-403, 1996. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)
- CANIL, K. **Processos erosivos e planejamento urbano: carta de risco de erosão das áreas urbana e periurbana do município de Franca, SP**. São Paulo. 2000. 96 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- CARVALHO, M. B. de. **Comparação de abordagens metodológicas para avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú, Aparecida D'Oeste – SP**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2019.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CAVALCANTE, L. R. **Análise da evolução da paisagem urbana de Goiânia (GO) e a distribuição dos focos erosivos hídricos de 1992 a 2016**.2019. 219 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- CHAVES, H. M. L. Incertezas na predição da erosão com a USLE: impactos e mitigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 34, v. 6, p. 2021-2029, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600026>
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 2001. 25 p.

EMATER – Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária. **Base de Dados: Refinamento do mapeamento de solos para escala de 1:250.000.** Disponível em: <http://dados.sieg.go.gov.br/Sieg/produtos/IMB.asp?cod=4715> Acesso em: 03 fev. 2017.

ESRI. **Software ArcGIS for Desktop Version: 10.1.** 2013.

FERNÁNDEZ, G. Á. V. **Análise da erosão do solo usando a EUPS, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.** 1996. 163 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, GO. v. 5, n. 3, p.239-254. 2011.
<https://doi.org/10.5216/ag.v5i3.16703>

GOOGLE. **Google Earth Professional.** Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/versions/> Acesso em: 03 jan. 2015.

HECKMANN, T.; CAVALLI, M.; CERDAN, O.; FOERSTER, S.; JAVAUX, M.; LODE E.; SMETANOVA, A.; VERICAT D.; BRARDINONI F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. **Earth-Science Reviews**, n.187, p. 77–108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Contínua.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=downloads> Acesso em: 30 set. 2019.

_____. **Manual técnico de uso da terra.** Rio de Janeiro: IBGE – Manuais técnicos em Geociência, 2013.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> Acesso em: 25 abr. 2016.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TerraView 4.1.0.** São José dos Campos, SP: INPE, 2010. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/terraview> Acesso em: 30 set. 2018.

KERTZMAN, F. F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X.; GOUVEIA, M. I. F. Mapa de erosão do estado de São Paulo. **Revista do Instituto de Geológico**, São Paulo, volume especial, p. 31-37, 1995.
<https://doi.org/10.5935/0100-929X.19950008>

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Rainfall erosivity — its distribution and relationship with soil loss at Campinas, state of São Paulo, Brazil. **Bragantia**, n. 51, p. 189–196, 1992.
<https://doi.org/10.1590/S0006-87051992000200009>

LUIZ, G.C.; GITIRANA JÚNIOR, G.F.N.; ROMÃO, P.A.; ALMEIDA, F.P. Interação solo-atmosfera e a sua relação com erosão em borda de reservatórios. In: SALES, M. M., CAMAPUM DE CARVALHO, J., MASCARENHA, M.M., LUZ, M.P., ANGELIM, R.R., SOUZA. N.M. (Org.). **Erosão em bordas de reservatório.** Goiânia-GO: Gráfica-UFG, 2017. p. 127-151. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/385/o/ebook-erosao-em-borda-de-reservatorio.pdf> Acesso em: 12ago. 2018.

MEDRADO, L. de C.; ROMÃO, P. R. de; NASCIMENTO, D. T. F.; SALES, M. M. Vulnerabilidade ambiental à perda de solo nas bordas do reservatório da UHE de Itumbiara-GO. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A. (Orgs.). **Geografia física e as mudanças globais.** Fortaleza: Editora UFC, 2019. Disponível em: <http://www.editora.ufc.br/catalogo/28-geografia/982-geografia-fisica-e-as-mudancas-globais> Acesso em: 10 out. 2020.

MENEZES, P.H. B. J. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do Lago Paranoá.** 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

NAJAFI, S.; DRAGOVICH D.; HECKMANN, T.; SADEGHI, S. H. Sediment connectivity concepts and approaches. **Catena**, n.196, p.1-30, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.** Sioux Falls: USGS, 2018. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> Acesso em: 30 set. 2018.

- NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A. de.; SALES, M. M. Emprego de dados geomorfométricos na análise da suscetibilidade erosiva. **Élisée, Revista de Geografia da UEG**, Porangatu, v.9, n.1, e912008, jan./jun. 2020.
- NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A. de; SALES, M. M. Erosividade e erodibilidade ao longo de dutovia cortando os estados de Minas Gerais e Goiás – Brasil. **Ateliê Geográfico**, Goiânia-GO, v. 12, n. 1, p. 97-117, 2018. <https://doi.org/10.5216/ag.v12i1.46152>
- NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A. de; SALES, M. M.; ALMEIDA, F. de P. Mapeamento de cobertura do solo em bordas de reservatório e processos erosivos associados. In: SALES, M. M., CAMAPUM DE CARVALHO, J., MASCARENHA, M.M., LUZ, M.P., ANGELIM, R.R., SOUZA, N.M. (Org.). **Erosão em bordas de reservatório**. Goiânia-GO: Gráfica-UFG, 2017. p. 323-344. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/385/o/ebook-erosao-em-borda-de-reservatorio.pdf> Acesso em: 05 de agosto de 2018.
- NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A.de; SILVA, S. B.; SALES, M. M.; VARGAS, C. A. L.; LUZ, M. P. Emprego do Google Earth no cadastramento de processos erosivos lineares e laminares. In: ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 15., 2015, Cuba. **Anais [...]**. Cuba, 2016.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422p.
- NOBRE, A. A.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNO, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the nearest drainage - a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, 2011, p. 13-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- PASTORE, E.L. Contribuição ao Tema Geotecnia e Meio Ambiente: Erosão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., v. 5., **Anais [...]**, Porto Alegre, RS, 1986, p.43-54.
- POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, n.50, p.91– 133, 2003.
- POESEN, J. Challenges in gully erosion research. **Landform Analysis**, v. 17, p.5–9, 2011. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- RAPIDEYE. **Satellite imagery product specifications**. Disponível em: www.rapideye.com Acesso em: 18 nov. 2012.
- RAUEN W. B.; SILVA M. G.; HILGERT S.; SOTIRI K.; KNAPIK H. G.; FERNANDES C. V. S.; DZIEDZIC M.; SCHEER M. B.; BLENINGER T. B. Avaliação do assoreamento em reservatórios: análise crítica com base em reservatório de abastecimento público em região urbanizada. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS - ABRH, 12., 2018, Vitória. **Anais [...]**. Vitória, 2018.
- RENNO, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA et al. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand do Brasil, 2007. Cap. 7, p. 229-267.
- SALOMÃO, F. X. T.; CANIL, K. RODRIGUES, S. P. Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 39-56, 2012.
- SENA, J. N. **O uso de sistemas de informação geográficas na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de suscetibilidade a erosão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008
- SILVA, E. C. S. **Estudo regional para avaliação da erosão laminar potencial na bacia hidrográfica do reservatório Corumbá IV**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Revista Geografia**, v. 22, n. 1, p. 5-25, 2013.

<https://doi.org/10.5380/raega.v25i0.28014>

SMITH, S. J.; WILLIAMS, J. R.; MENZEL, R. G.; COLEMAN, G. A. 1984. Prediction of sediment yield from Southern Plains Grasslands with the Modified Universal Soil Loss Equation. **Rangeland Ecology & Management Journal**. v. 37, n. 4, p. 294-297, 1984. <https://doi.org/10.2307/3898697>

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

TRICART, J. **Ecodinâmica**, Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977.91p.

UFV - Universidade Federal de Viçosa; UFLA - Universidade Federal de Lavras; CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais na escala 1:500.000**. 2010. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/> Acesso em: 02 fev. 2019.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata**: Guia Para Utilização De Dados. Brasília: Inpe, 2008.

VILAR, O.M.; PRANDI, E.C. **Erosão dos Solos** – Solos do Interior de São Paulo. São Paulo: Abms/EESC-USP, 1993.

WEILL, M.A.M; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, n. 32, p. 801-814, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034>

WILLIAMS, J.R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: USDA-ARS (Ed.). **Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources**. Washington, 1975. p. 244 - 252.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses** – A guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p.

ZUQUETE, L. V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e na ocupação do meio físico**: fundamentos e guia para elaboração. 1993. 369p. Tese de Livre Docência, – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

Recebido em: 05/01/2021

Aceito para publicação em: 01/06/2021