

Artigo de Pesquisa

## Utilização das geotecnologias para avaliação do potencial de erosão do solo na bacia hidrográfica do Rio Pirajibu-mirim, São Paulo, Brasil

### *Use of geotechnologies to evaluate soil erosion potential in the Pirajibu-mirim basin, São Paulo, Brazil*

Daniele FRASCARELI<sup>1</sup> , Diego da Cruz BOCHICHI<sup>1</sup> , Antônio Cesar Germano MARTINS<sup>1</sup>  & Davi Rodrigues RABELO<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Av. Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba - SP, 18087-180, Brasil. E-mail: dani.frascareli@hotmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará. Av. Dr. Silas Munguba, 1700 - Itaperi, Fortaleza - CE, 60714-903, Brasil.

**Resumo:** Estudos de erosão em bacias hidrográficas podem auxiliar nas tomadas de decisões e promover medidas que respaldem a gestão sustentável, manejo das atividades e mitigação do fenômeno, evitando o comprometimento dos usos múltiplos potenciais. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo estimar a perda de solo na bacia do Pirajibu-Mirim, Sorocaba-SP. Foram utilizadas ferramentas de análise espacial (álgebra de mapas) para calcular a perda de solo utilizando-se da Equação Universal da Perda de Solos (EUPS). Os resultados indicaram que os anos de 2003 e 2012 apresentaram os maiores valores de perdas de solo acima de 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. As perdas de solo nessa bacia estiveram associadas as classes com maior declividade e o tipo de uso e ocupação do solo. Portanto, a análise geral da perda de solo na bacia permitiu concluir que aproximadamente metade da área possui perdas de solo significativo.

**Palavras-chave:** EUPS, Perda de solos, erosão.

**Abstract:** Erosion studies in watersheds can help in decision-making and promote measures that support sustainable management, management of activities and mitigation of the phenomenon, avoiding the commitment of multiple potential uses. In this sense, this work aims to estimate soil loss in the Pirajibu-Mirim basin, Sorocaba-SP. Spatial analysis tools (map algebra) were used to calculate soil loss using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The results indicated that the years 2003 and 2012 showed the highest values of soil losses above 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Soil losses in this basin were associated with the classes with the highest slope and the type of land use and occupation. Therefore, the general analysis of soil loss in the basin led to the conclusion that approximately half of the area has significant soil loss.

**Keywords:** USLE, Loss of soil, erosion.

## 1. Introdução

Por definição, as bacias hidrográficas são um conjunto de terras drenadas por corpos d'água representando importante região para estudos qualitativo e quantitativo da água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes (Pires *et al.*, 2002). Pires (2002) salienta que a erosão dos solos é o impacto de maior ocorrência dentro de uma bacia hidrográfica, causando grandes problemas ambientais, desde perda da qualidade de água a extinção de espécies de fauna e flora. Em 1996, Gouveia já estimava uma perda de 200 milhões de toneladas de solo no estado de São Paulo.

A erosão é uma preocupante forma de deterioração do solo devido ao transporte de partículas por agentes erosivos, que são: água, vento, gelo e gravidade. Além disso, causam a sedimentação nas partes mais baixas do local ou em leitos dos cursos d'água (Li *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2016; Rabelo *et al.*, 2023). A erosão hídrica ocorre essencialmente pela ação direta da chuva no solo (Guth, 2010), sendo influenciada pela declividade e comprimento do terreno, hidrologia, e, tipo e uso do solo (Dyonisio, 2010; Bagatini *et al.*, 2011). O desgaste do solo irá depender da capacidade da chuva de causar erosão (erosividade), ou seja, a pressão que esta exerce sob o solo; e do poder de resistência do solo à chuva (erodibilidade), fator, este, que depende de suas propriedades. Essas propriedades (permeabilidade, capacidade de erosão e velocidade de infiltração) são influenciadas por suas características físico-químicas, como tamanho e distribuição dos poros e agregados, composição da matéria orgânica, textura, entre outros (Bagatini *et al.*, 2011; Dyonisio, 2010).

Esse processo pode ser intensificado pela ação antrópica, que aumenta a vulnerabilidade do solo devido ao desmatamento ou mudança da cobertura vegetal nativa (Nörnberg & Rehbein, 2021). Isso porque a vegetação protege o solo da ação direta da chuva, aumentando a infiltração da água no solo, evaporando a água retida pelas folhas e diminuindo o escoamento (Silva Matos, 2015). Como consequência do processo de erosão há a geração de sedimentos, assoreamento, perda de matéria orgânica e nutriente da superfície do solo, devido ao escoamento superficial, e, conseqüentemente perda de água não infiltrada (Anache *et al.*, 2017), ameaçando o equilíbrio ecológico, ambiental e socioeconômica (Guth, 2010; Marzen *et al.*, 2017; Anache *et al.*, 2017).

A partir de 1950, alguns estudos relacionados à erosão foram desenvolvidos, destacando-se os trabalhos de Wischmeier & Smith (1978), que elaboraram a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) a partir de dados empíricos. Para a avaliação da erosão, alguns autores utilizam-se de geotecnologias, em especial, técnicas de geoprocessamento e produtos do sensoriamento remoto combinadas com a equação universal de perda de solo em várias regiões brasileiras (Paim, 2012; Borges *et al.*, 2013; Santos, 2016; Rabelo *et al.*, 2023). A equação de perda universal do solo é um modelo que estima a perda de solo a partir de aspectos particulares em longo prazo. Isso porque as variações imprevisíveis em curto prazo podem tornar o valor expresso menos.

Aplicação desse modelo tem como vantagens o monitoramento remoto por apresentar, principalmente, baixo custo (Serio *et al.*, 2017; Rabelo *et al.*, 2023); visto que atualmente são disponibilizadas diversas imagens representativas para um maior período temporal, com disponibilidade de séries de mais 40 anos (Sousa Filho *et al.*, 2022; Rabelo *et al.*, 2022). Diante do exposto, o presente estudo propõe uma avaliação quantitativa da erosão do solo da bacia Pirajibu Mirim, no período de 2003, 2012 e 2013, utilizando de técnica de geoprocessamento e produtos do sensoriamento remoto.

## 2. Área de Estudo

A bacia do Pirajibu-Mirim ( $23^{\circ}25'73''S$  e  $47^{\circ}24'19''O$ ) (Figura 1) está inserida na Unidade de Gerenciamentos de Recursos Hídricos 10 (UGRHI-10) que se refere à Bacia hidrográfica Sorocaba e Médio Tietê e apresenta uma área de drenagem de 11.829 km<sup>2</sup>, sendo que aproximadamente 254 km<sup>2</sup> referem-se a reservatórios (Perh, 2013; IPT, 2008). Seus principais rios são: Sorocaba, Tietê, Sorocabuçu, Sorocamirim, Pirajibu, Jundiuvira, Murundu, Sarapuí, Tatuí, Guarapó, Macacos Ribeirões Peixe, Alambari, Capivara e Araquá (Perh, 2013). Esta bacia subdivide-se ainda em 6 sub bacias, onde a sub bacia 4 - Médio Sorocaba (SB-4), está localizada a cidade de Sorocaba, que se encontra à 92 km de São Paulo (SP), nas coordenadas  $23^{\circ}17'S$  (latitude) e  $47^{\circ}16'W$  (longitude), clima tropical de altitude, precipitação em torno de 1311 mm anuais e vegetação de ecótono (Mata Atlântica e Cerrado) (Côrrea *et al.*, 2016; CEPAGRI, 2016) e com temperaturas médias variando entre mínima de 13°C e máxima de 26°C (Tarcitani & Barrella, 2009).

A área de estudo torna-se importante devido aos seus recursos hídricos, por estar completamente inserido na cidade de Sorocaba e por corresponder a 10% do abastecimento de água da cidade (Canabarro *et al.*, 2008; Côrrea *et al.*, 2016; SAAE, 2017).

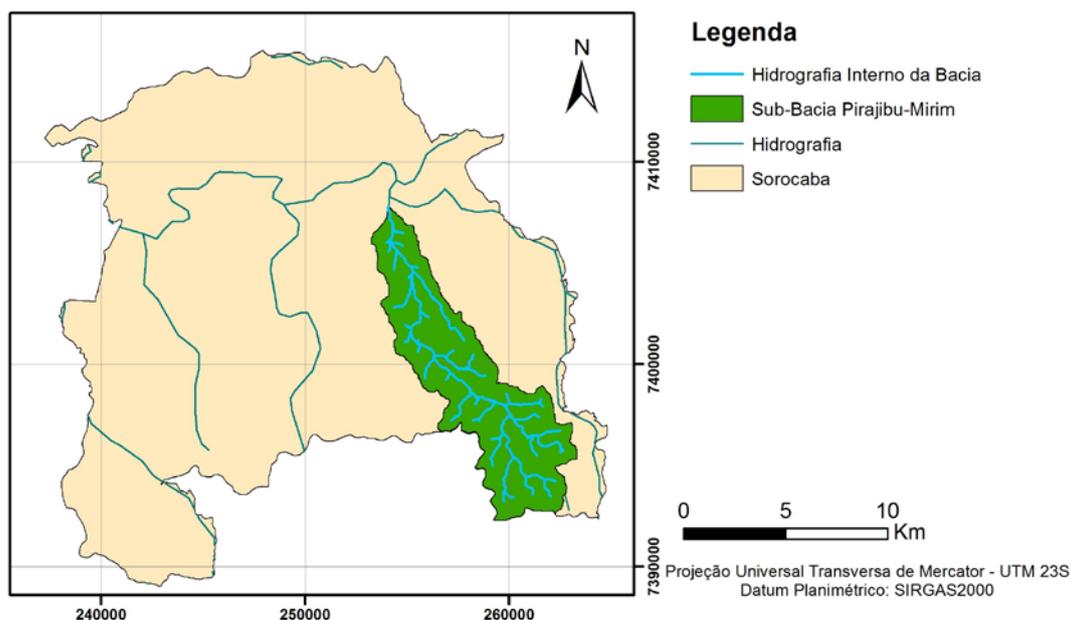


Figura 1. Município de Sorocaba com destaque para a bacia do Rio Pirajibu-Mirim.

*Figure 1. Municipality of Sorocaba with emphasis on the Pirajibu-Mirim River basin.*

A área da bacia é de aproximadamente 54 km<sup>2</sup>, com drenagem pouco densa ocorrendo variação entre ambientes lênticos e lóticos. Apresenta relevo com serras e morros, inserido na região geomorfológica de transição do Planalto Ocidental Paulista e Depressão Periférica, cuja nascente está a 1000 m de altitude e a foz a 540 m (Canabarro *et al.*, 2008; Más & Barrella, 2008; Tarcitani & Barrella, 2009). A vegetação local encontra-se amplamente degradada, sendo possível encontrar mata ciliar apenas nas nascentes, parte do distrito industrial de Sorocaba está inserido na sub bacia (Canabarro *et al.*, 2008; Más & Barrella, 2008).

## 2. Materiais

Para a obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) foram utilizados os dados da *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) disponíveis no banco de dados *USGS Explorer* que envolve diversas agências espaciais e países.

Para a delimitação da área de estudo foi utilizada a imagem 23S48\_ (articulação 1:250.000) com resolução espacial de 30 m. Trabalhando no ambiente SIG do software ArcGIS foi adicionado nesta imagem uma máscara abrangendo o município de Sorocaba e também a área da sub bacia do rio Pirajibu-Mirim, para efetuar o recorte e trabalhar apenas com a área de estudo. O MDE foi reprojetoado para UTM referenciando no datum planimétrico UTM SIRGAS 2000, Zona 23S.

As séries históricas de precipitação foram obtidas pelo Hidroweb da ANA e também pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET levando em conta os polígonos de Thiessen, conforme estudos de Sousa Filho et al (2022) e estudos de obtenção de dados pluviométricos de Rabelo *et al.* (2022). Os dados adquiridos para esse trabalho foram de precipitação diária referente aos anos de 2003, 2012 e 2013. Para os dados nulos (dias em que não houve leituras pela estação), foram obtidas estimativas a partir de estações próximas a bacia a fim de se completar essas falhas e para o caso de dados inexistentes os mesmos foram calculados estatisticamente por meio do simulador de precipitação pcpSTAT.

## 3. Métodos

O cálculo da perda de solos da bacia proposto por Wischmeier & Smith (1978) foi realizado em ambiente SIG aplicando a Equação 1, aplicando os valores previamente calculados referentes a cada ano.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

em que, A = perda de solo por erosão (Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); R = erosividade da chuva (MJ.mm. ha<sup>-1</sup>. h<sup>-1</sup>. ano<sup>-1</sup>); K = erodibilidade do solo (Mg.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>1</sup>); LS = fator topográfico (adimensional); e CP = fator de cobertura vegetal multiplicado por práticas conservacionistas (adimensionais).

Para determinação do fator R utilizou-se o MDE pronto e a bacia delimitada, a próxima etapa foi determinar a influência das estações pluviométricas na bacia. Para isso, foi utilizado a técnica de Polígonos de Thiessen em ambiente SIG, que consiste em traçar uma reta mediatriz a dois pontos adjacentes (neste trabalho as estações são esses pontos) definindo a influência de cada um, repetindo esse procedimento para os outros pontos próximos a bacia (Euclides *et al.*, 1999). Desses polígonos, verificou-se a influência de três estações (Figura 2), sendo elas Brigadeiro Tobias (02347120), Éden (02347059) e Sorocaba (02347073).

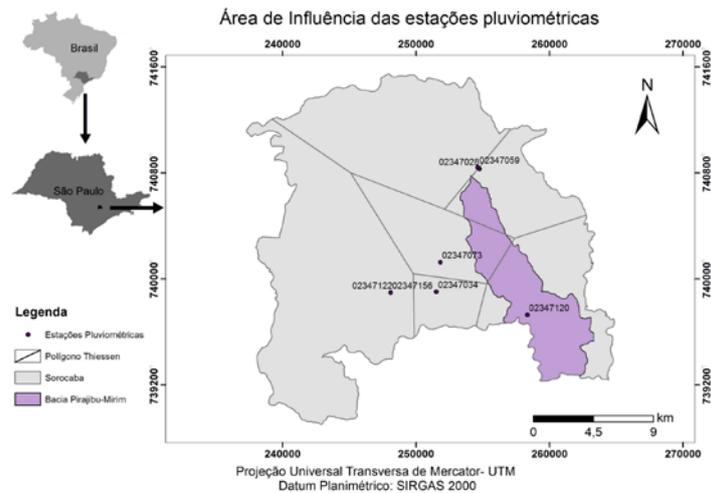


Figura 2. Polígonos de Thiessen que definem as áreas de influência das estações pluviométricas.

Figure 2. Thiessen polygons that define the areas of influence of rainfall stations.

As estações do Éden (02347059) e Brigadeiro Tobias (02347120) não foram utilizadas, pois a Estação do Éden possui muitos dados nulos no curto período de tempo amostrado (2012 a 2016), e a de Brigadeiro Tobias só possui dados até 1953. Devido a esse fato, as estações utilizadas foram a do Éden (PIRAJIBU) (02347028) no período de 2000 a 2012 e a Estação Sorocaba (02347073) que contribuiu com dados de 2012 a 2016. Assim, com os valores de precipitação total mensal e anual definidos, utiliza-se das equações 2 e 3 para obter o Fator R.

$$EI_i = \frac{125,92 \cdot \left(\frac{r_i^2}{P_i}\right)^{0,603} + 111,173 \cdot \left(\frac{r_i^2}{P_i}\right)^{0,691} + 68,73 \cdot \left(\frac{r_i^2}{P_i}\right)^{0,841}}{3} \quad (2)$$

Onde,  $r_i$  é precipitação total mensal para o mês “i” (mm);  $P_i$  é precipitação total anual (mm). Após o cálculo da média mensal do índice de erosão, foi feita a somatória entre os valores obtidos para obter-se o Fator R de erosividade da chuva através da Equação 3 (erosividade (R)).

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_i \quad (3)$$

Onde, R é o fator de erosividade ((MJ.ha-1).(mm.h-1)),  $EI_i$  é a média mensal do índice de erosão para o mês “i” específico ((MJ.ha-1).(mm.h-1)).

Para a determinação do fator K (erodibilidade do solo) na área de estudo, foi utilizado o mapa de solos do Brasil, já elaborado a partir da nova classificação de solos da Embrapa (1999) e publicado pelo IBGE em 2001 em escala 1:5.000.000. Cada tipo de solo possui um valor diferente para o fator K, no presente estudo o valor de K foi definido por Manningel *et al.* (2002).

O cálculo do fator L em ambiente SIG, é utilizado a equação 4 propostas por Desmet & Govers (1996) seguindo a metodologia de Foster & Wischmeier (1974), cujo método calcula para cada pixel a declividade, direção do fluxo e a quantidade de fluxo acumulado a montante do pixel.

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot (22,13)^m} \quad (4)$$

Onde,  $A_{i,j-in}$  é a área de contribuição de cada pixel (fluxo acumulado), D é o tamanho de um lado do pixel (m), m é a constante de declividade célula, x é o coeficiente de forma das células (x=1 para sistemas de pixel). A constante “m” foi obtida através do método de Foster (1977) combinado com McCool *et al.* (1989) expressos pelas equações 5 e 6.

$$m = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\text{sen } \theta / 0,0896}{3 \cdot \text{sen}^2 \theta + 0,56} \quad (6)$$

Onde,  $\beta$  é a razão entre a erosão causada pelo fluxo por a erosão entre-sulcos, considerando o impacto da gota da chuva como principal causa.  $\theta$  é a declividade da encosta, em graus.

Com a valor de L calculado, calcula-se o fator S seguindo a metodologia de McCool *et al.* (1987) representada pelas equações 7a e 7b.

$$S = 10,8 x \text{sen } \theta + 0,03 \text{ para declividade } < 9\% \quad (7a)$$

$$\beta S = 16,8 x \text{sen } \theta - 0,50 \text{ para declividade } \geq 9\% \quad (7b)$$

Onde, S é o grau de declive e  $\theta$  é o ângulo de declive em graus. Diante disso, foi calculado os valores de declividade em % em ambiente SIG através do software ArcGIS® 10.0 e utilizando-se o comando Fill para a correção de pequenas imperfeições (áreas de pico e depressões). Assim, realizada a reclassificação das declividades em função das categorias definidas pela EMBRAPA (1995).

Para confecção do mapa de uso e ocupação da terra da bacia do Pirajibu-Mirim foi utilizado imagens do satélite LandSat 8 adquiridos junto ao INPE para os anos de 2003, 2012 e 2013. Foi realizada uma classificação supervisionada através do método Bhattacharya para determinação dos usos e ocupação.

Como não há informações sobre práticas conservacionistas aplicadas na área de estudo, essa foi considerada como peso 1 para que não tenha interferências no cálculos. Assim, foram atribuídos os valores para se obter o fator de uso e manejo do solo (C) a partir da literatura recomendada (Albuquerque *et al.*, 2005; Creutzfeldt, 2006), que varia de 0 a 1 (adimensional).

Esse cálculo da perda de solos também foi executado no software ArcGis® 10.0 através da álgebra de mapas gerando a perda de solos para os anos de 2003, 2012 e 2013. Após a geração dos mapas de perda de solos, foi feito a transformação dos valores para números inteiros pelo comando “int” para que pudesse ser feito as análises a partir do raster. Assim, o resultado do cálculo da perda de solos foi classificado de acordo com os

limiaries de Carvalho (2008), para nula a moderada perda para valores menores que 15 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, média para 15 a 50 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, média a forte para 50 a 120 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, forte para 120 a 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e muito forte para valores acima de 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

#### 4. Resultados e Discussão

Os valores de erosividade calculados na bacia Pirajibu-Mirim variaram de 5.706 a 7.971 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano, com média de 6.780 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano. Os valores do presente estudo ficaram próximos com as de Roque et al (2001), que encontraram valores que variaram de 3.624 à 1.2940 MJ Ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano com a média de 7.172 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano no período de 1975 à 1997 no município de Piraju (SP); e Paim (2012) que encontrou valores que variaram de 5.761,8 a 11.352,0 MJ Ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano em Balneário Piçarras em Santa Catarina.

Cabe ressaltar que no verão de 2013-2014 houve uma grave crise hídrica em São Paulo (Marengo *et al.*, 2015), fato que pode explicar a menor erosividade acumulada no ano de 2013. Fazendo-se uma análise pontual de julho de 2013 a junho de 2014, período citado como anômalo por Marengo *et al.* (2015), encontra-se um fator de erosividade de 4.653,9 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano, menor que todos os valores apresentados no presente estudo. E se comparando, por exemplo, com um período aleatório como de julho de 2011 a junho de 2012 (7.263,1 ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano) a diferença chega a aproximadamente 2.600 ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano a mais para o período de 2011 e 2012. Os valores R apresentados podem ser classificados como classe moderada a forte (4.905,0 < R ≤ 7.357,0) à forte (7.357,0 < R ≤ 9.810,0) de acordo com as classes de erosividade R propostas por Carvalho (2008). As mesmas classes foram observadas em trabalhos recentes (Rabelo *et al.*, 2018; Simonetti *et al.*, 2022), porém, apesar da classe ter sido mantida, os valores de R foram superiores atingindo valores máximos de 8.933 ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> ano, o que indica maior possibilidade erosiva.

Na área de estudo foi encontrado somente um tipo de solo o qual é definido como Argilossolo Vermelho-Amarelo (Figura 3), cujo Fator K, calculado por Manningel *et al.* (2002), é de 0,0466 Mg ha MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Logo, em termos de erodibilidade, podemos ter uma homogeneidade na forma de receber os impactos da erosividade da chuva na bacia do Rio Pirajibu-mirim.

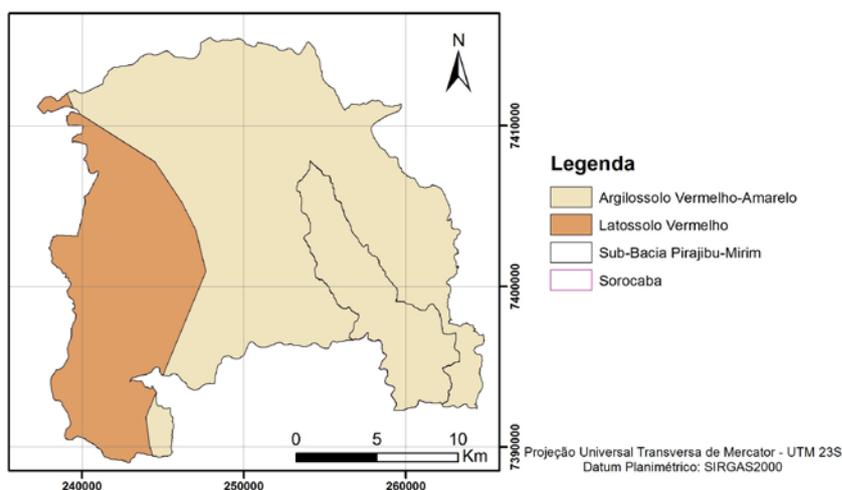


Figura 3. Mapa de solos presentes no município de Sorocaba e na sub bacia Pirajibu Mirim.

Figure 3. Map of soils present in the municipality of Sorocaba and in the Pirajibu Mirim sub-basin.

Para a determinação do Fator LS, o mapa altimétrico gerado para a bacia do Pirajibu-Mirim (Figura 4) indicou uma elevação mínima e máxima variando de 550 a 1.028 m, respectivamente. Os resultados da relação das áreas ocupadas em km<sup>2</sup> e % pelas diferentes altitudes (m) possibilitaram concluir que aproximadamente 86% da região apresenta altitudes variando de 575 a 800 m, representando uma região com um relevo dissecado.

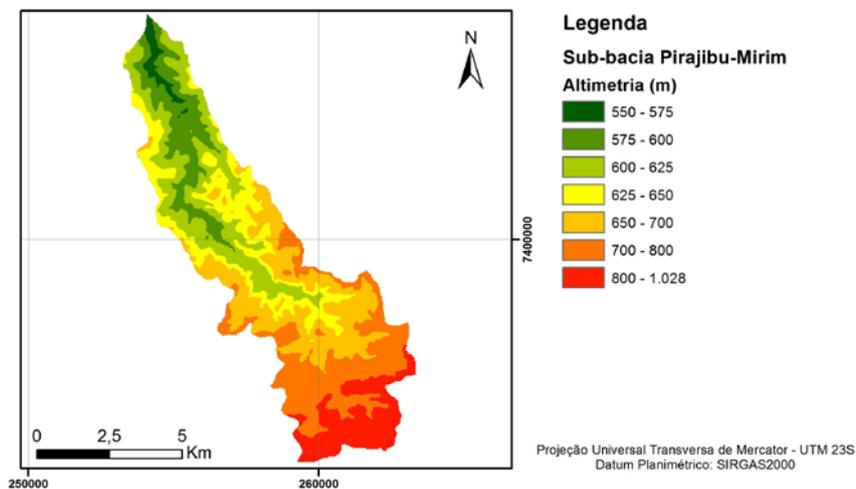


Figura 4. Mapa altimétrico para a sub bacia Pirajibu-Mirim (MDE SRTM).

*Figure 4. Altimetric map for the Pirajibu-Mirim sub basin (MDE SRTM).*

Com o entendimento das declividades do terreno da bacia, prosseguiu-se a determinar o fator LS com o auxílio das equações 4, 5, 6, 7a e 7b. Com os dois raster representando os fatores L e S, foi feito o produto desses fatores para geração do mapa do fator LS (Figura 5). Nas áreas mais próximas a montante da bacia, os maiores valores de fator LS predominou, com maior gradiente de rampa e declividade, favorecendo, assim, os processos erosivos.

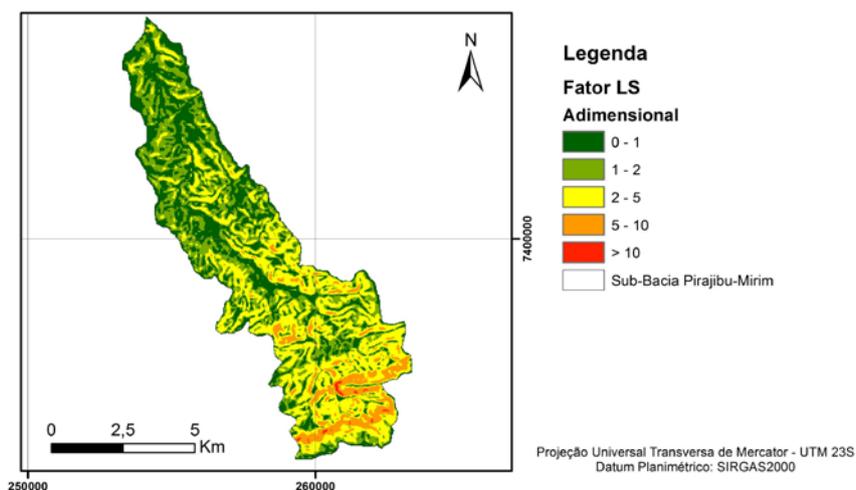


Figura 5. Mapa representativo do Fator LS.

*Figure 5. Representative map of the LS Factor.*

O fator C (uso e manejo do solo) é apresentado na Figura 6. O presente trabalho identificou cinco classes de usos: urbano (0,1); vegetação rasteira (0,02), floresta/silvicultura (0,10), solo exposto (1,00) e os reservatórios hídricos que não apresentam valores, pois são áreas receptivas. Rabelo *et al.* (2022) argumenta a importância de mostrar os diferentes usos na paisagem para estudos erosivos, pois estas atividades modificam as paisagens da região e altera a dinâmica natural. Assim, a área de estudo apresenta pouca área de solo exposto, esse como maior valor de susceptibilidade erosiva, enquanto que há um predomínio na área de Floresta/Silvicultura e áreas urbanas, apresentando baixos valores de susceptibilidade erosiva.

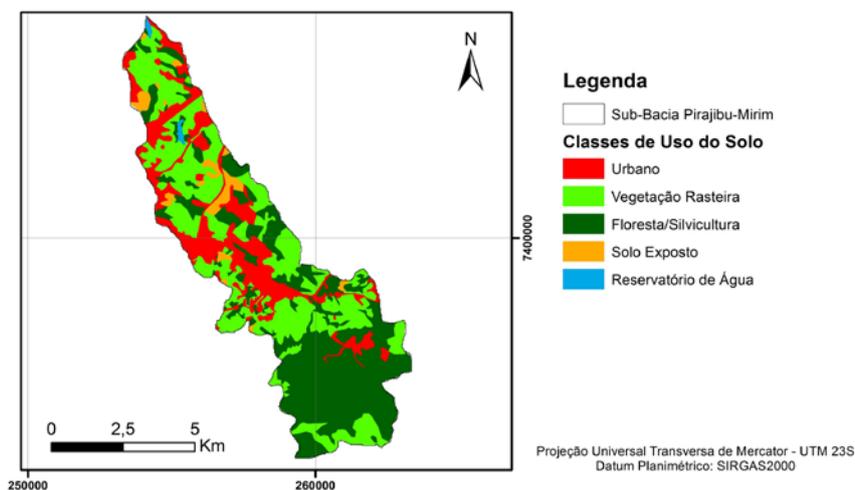


Figura 6. Mapa de uso e ocupação do solo e fator CP.

*Figure 6. Representative map of the LS Factor.*

De acordo com os resultados da perda de solos anual, observa-se que para os anos de 2003 e 2012 as perdas de solo acima das 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> foram encontrados em grande parte da área da bacia. Tal motivo se deve pelo fato de que foram anos com chuvas excepcionais, refletindo na erosividade. Essa análise também é válida para o inverso, observa-se que em 2013 ocorreu o menor índice de erosividade, refletindo em menor área com perdas acima das 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e a maior área com perdas na faixa de 0 a 15 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

A Figura 7 ilustra de forma nítida essa maior perda de solo ao observar a quantidade de região em vermelho (>200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), laranja (120 a 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>) e amarelo (50 a 120 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>) para os anos de 2003 e 2012 em relação a 2013. É possível notar que boa parte das áreas ao Sul da bacia diminuíram a potencialidade de perda de solo durante os anos analisados. Rabelo e Araújo (2019), obtiveram valores de erosão, obtida pelo cálculo da USLE, de 0 a 165 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> entre 1994 até 2015 na região do semiárido brasileiro, muito próxima dos valores do presente estudo.

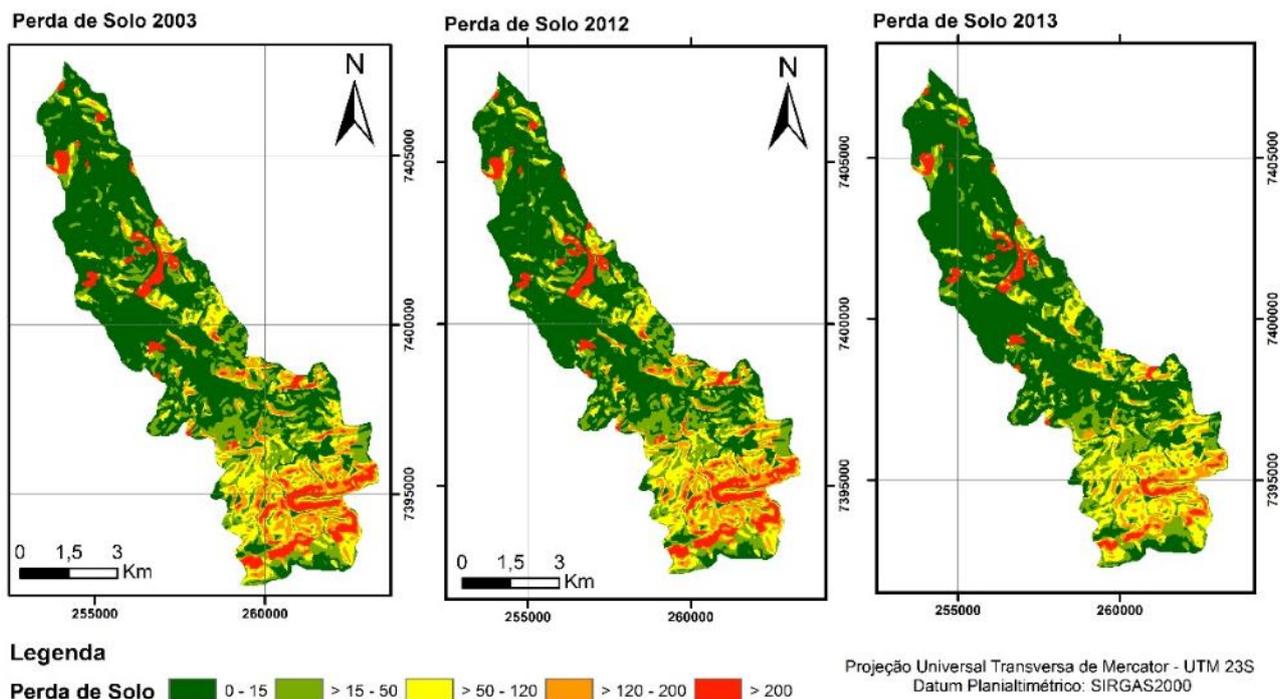


Figura 7. Comparação entre os períodos com maiores e menores perdas de solo.

Figure 7. Comparison between periods with higher and lower soil losses.

A maior mobilização de sedimentos oriundos do alto curso pode se dar pelas intervenções antrópicas observadas. A degradação ambiental fornece implicações ao ambiente, e como esse é dinâmico, faz com que os processos se acentuem. A retirada de vegetação, compactação dos solos, e os mesmos expostos aos agentes erosivos, fazem com que haja maior disponibilidade de sedimentos.

A taxa de erosão na bacia está um pouco acima dos limites de tolerância na formação e renovação dos solos. Trabalhos como de Wischmeier & Smith (1978) nos Estados Unidos, indicaram valores de tolerância de perda de solo de 4,5 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>- a 11,5 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>-. No Brasil, em solos tropicais de horizonte B textural e latossólico, Lombardi Neto & Bertoni (1975) encontraram valores de tolerância de perda de solo de 4,5 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>- a 13,4 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>- (solos com B textural) e 9,6 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>- a 15,0 ton.ha<sup>1</sup>.ano<sup>1</sup>- (solos com B latossólico).

Trabalhos recentes corroboraram a ação dos solos expostos no potencial de degradação dos solos da bacia do Pijajibu-Mirum (Marques, 2017; Nery *et al.*, 2019; Simonetti *et al.*, 2022). Ainda, Simonetti *et al.* (2022) faz uma análise do carreamento de nutrientes e outros elementos pela ação do processo de erosão e observa perdas significativas em relação ao cálcio, ferro e matéria orgânica. Devido aos resultados aqui apresentados e embasados por trabalhos recentes, podemos apontar um histórico crescente de aporte de solo na bacia do Pirajibu-Mirim, com alto potencial para prejudicar os usos múltiplos e serviços ecossistêmicos prestados por esse ambiente à sociedade.

Para Tricart (1977) a base da morfodinâmica estabelece a relação entre a morfogênese e pedogênese com intuito de determinar o grau de instabilidade da paisagem. Assim, a força morfogenética é estabelecida pela relação entre os componentes perpendiculares e paralelos. O primeiro representa a ação da infiltração, favorecida pela cobertura vegetal, a qual implica em alterações de natureza bioquímica e facilita o processo

pedogenético. O segundo caracteriza-se pelo efeito erosivo, favorecido pela retirada da cobertura vegetal e abrindo caminho para ação direta dos agentes morfoesculturais (Cassetti, 1991). A erosão do solo potencializado pelo forte impacto na retirada da cobertura vegetal, e quando associada com a dinâmica ambiental, acarreta em degradação do solo.

As formas de apropriação do relevo pelo homem como recurso ou suporte são responsáveis por alterações substanciais do seu estado natural ou de equilíbrio. Tomando-se como base o materialismo histórico de Karl Marx, entende-se que os danos dos processos erosivos não são somente atividades que acontecem atualmente, mas sim efeito cumulativo das atividades pretéritas de uso e ocupação do solo, resultante da apropriação do capital sobre o recurso natural.

## 5. Conclusão

Os resultados do presente estudo apresentam uma metodologia que foi viável na integração de técnicas de geoprocessamento e bancos de dados no levantamento e monitoramento ambiental. Com potencial de ser aperfeiçoado à medida que haja a integração de dados e pesquisas de campo e om imagens de melhores resolução. Vale ressaltar a importância da EUPS na determinação de áreas críticas dentro de uma bacia hidrográfica, norteando assim as regiões onde se deve ter uma maior atenção e/ou análises de campo afim de um melhor manejo do solo e preservação do ambiente.

A perda potencial de solo na bacia apresenta valores menores que  $15 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  em 50% da área. Muito se deve ao fato de ser uma região com áreas destinadas a vegetação rasteira e por vezes silvicultura e floresta. Apesar disso, ocorreu grandes variações de perdas de solo e a ocorrência foi maior em localidades com maiores declividades e ocorrência de solo expostos. Por isso, o presente estudo reforça a necessidade de aplicações de técnicas conservacionistas na região, a fim de promover umas medidas de restauração ecológica, garantindo a sustentabilidade dos usos múltiplos da bacia. Faz-se sugestões de ampliação de práticas conservacionistas como: conservação e expansão de vegetação nativa, plantio direto, e criação de terraços para diminuir o comprimento de rampa e auxiliar no controle da erosão.

**Contribuições dos Autores:** Concepção, Diego da Cruz Bochichi e Daniele Frascareli.; metodologia, Diego da Cruz Bochichi e Antônio Cesar Germano Martins; validação, Davi Rodrigues Rabelo, Y.Y. e Z.Z.; preparação de dados, Diego da Cruz Bochichi e Daniele Frascareli.; escrita do artigo, Diego da Cruz Bochichi e Daniele Frascareli; revisão e supervisão, Davi Rodrigues Rabelo. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## Referências

- Albuquerque, A.W., Filho, G.M., Santos, J.R., Costa, J.P.V. & Souza, J.L. 2005. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. *Rev. Bras. Eng. Agríc.e Amb.*, 9(2): 153-160. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200001>
- Almeida, L.T. De; Figueiredo, F.P. & Oliveira, F.G. 2016. Estimates of volume and sedimentation of the reservoir of the Itacarambi River dam, Minas Gerais, Brazil. *Nativa*, 4(4): 231-237. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n04a08>
- Anache, J.A.A.; Wendland, E.C.; Oliveira, P.T.S.; Flanagan, D.C. & Neraring, M.K. 2017. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena*, v.52: 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>

- Bagatini, T., Cogo, N.P., Gilles, L., Portela, J.C., Portz, G. & Queiroz, H. T. 2011. Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança no tipo de uso da terra, em dois métodos de preparo do solo e dois tipos de adubação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 35(3): 999-1011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300034>
- Canabarro, L., Toledo, M.T. & Barrella, W. 2017. Peixes do Rio Piragibu-Mirim em Sorocaba/SP. *Revista Eletrônica de Biologia*, 1(3): 31-49.
- Caraminan, L.M. & De Moraes, E.S. 2022. Explorando à álgebra de mapas com a EUPS e a sua utilidade para a gestão integrada: a bacia hidrográfica do córrego Pindaúva, PR, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1), 2034. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2034>
- Carvalho, N.O. 2008. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM – Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais, 600 p.
- Cassetl, V. *Geomorfologia*. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>> Acesso em: 05/08/2022.
- Centro De Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas A Agricultura - CEPAGRI. 2016. *Clima dos municípios paulistas*. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_584.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_584.html)>. Acesso em: 24 abr. 2017.
- Creutzfeldt, B.N.A. 2006. *Remote sensing based characterisation of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northesaat of Brazil*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Potsdam, Potsdam, abril.
- Desmet, P.J.J. & Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5): 427-433.
- Dyonisio, H.A.F. 2010. Erosão híbrida: suscetibilidade do solo. *Revista Eletrônica Thesis*, v.7, n.13, p.15-25. Disponível em: <[http://www.cantareira.br/thesis2/ed\\_13/2\\_hidrica.pdf](http://www.cantareira.br/thesis2/ed_13/2_hidrica.pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2017.
- Euclides, H.P., Souza, E.F. & Ferreira, P. A. Rh 3.0. 1999. *Regionalização hidrológica: manual do programa*. Viçosa, MG: UFV/DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS, 1999, 149p.
- Ferreira, L.M. & Ferreira, A G. 2015. Aplicação de um modelo de erosão hídrica do solo à escala da unidade de intervenção florestal com a utilização de um Sistema de Informação Geográfica. *Rev. De Ciências Agrárias*, 38(4): 587-598. <https://doi.org/10.19084/RCA15141>
- Foster, G.R., & Wischmeier, W. 1974. *Evaluating irregular slopes for soil loss prediction*. Transactions of the ASAE, 17(2): 0305-0309. <https://doi.org/10.13031/2013.36846>
- Guth, P.L. 2010. *Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas de culturas oleaginosas*. Santa Maria. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Centro de ciências rurais, Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Dissertacoes/PAULO-LUIS-GUTH.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2017.
- Li, Q., Liu, G.B., Zhang, Z., Tuo, D.F., Bai, R.R. & Qiao, F.F. 2017. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil. *Catena*, v.53: 61-65. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.037>
- Mannigel, A.R., De Passos, M., Moreti, D., & Da Rosa Medeiros, L. 2008. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 24(5): 1335-1340.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Seluchi, M.E., Cuartas, A., Alves, L.M., Mendiondo, E.M. & Sampaio, G. 2015. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, 106: 31-44. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>
- Marques, V.V. 2017. *Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP*. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). ICTS, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba. 2017. 104p
- Marzen, M., Iserloh, T., Lima, J.L., Fister, W. & Ries, J. B. 2017. Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of The Total Environment*, 590-591: 502-513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.190>
- Más, B.A. & Barrella, W. 2008. Ocorrência de Macrófitas na Estação de Tratamento do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), Sorocaba-SP. *Revista Eletrônica de Biologia*, 1(4): 1-16.

McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C.K., & Meyer, L.D. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>

Meneses, B.M. 2014. Avaliação da perda de solo por erosão hídrica no Concelho de Tarouca (Portugal) e sua influência na morfogênese atual. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 5(4): 493-504. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i4.501>

Miqueloni, D.P., Beuno, C.R.P. & Ferraudo, A.S. 2012. Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes. *Pesq. agropec. bras.*, 47(9): 1358-1367. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900021>

Nery, L.M., Ribeiro, M.V.C., Souza, M., Oliveira, R.A., Silva, D.C.C. & Simonetti, V.C. 2019. Estudo da capacidade de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibú-Mirim. In: Andrade, D.F. (Org.), *Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia*. Editora Poisson, Belo Horizonte: pp. 52-62. <https://doi.org/10.36229/978-85-7042-203-3.CAP.07>

Nörnberg, S.O. & Rehbein, M.O. 2021. Fragilidade ambiental e vulnerabilidade à perda de solos no município de Pelotas/RS: Aplicação e comparação de modelos. *Caminhos de Geografia*, 22(81): 42-59. <https://doi.org/10.14393/RCG228155365>

Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S. & Geetha, N. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>

Rabelo, D.R. & Araújo, J.C. 2019. Estimativa e Mapeamento da Erosão Bruta na Bacia Hidrográfica do Rio Seridó, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(2): 361-372. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1414>

Rabelo, D.R., Araujo, J.C. & Cavalcante, A.A. 2022. Utilização dos produtos do sensoriamento remoto para delimitação do uso e cobertura da paisagem na bacia hidrográfica do rio Seridó. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 12(2): 56-62. <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.253463>

Rabelo, D.R., Araujo, J.C. & Cavalcante, A.A. 2023. Sediment yield in a basin in Brazilian Semiarid Regions: A discussion on positive allometry. *Catena*, 221(Part A): 106749. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106749>

Rabelo, D.R., Girao, I.R.F. & Araujo, J.C. 2018. Processos erosivos superficiais: o caso da erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Seridó RN/PB. *Revista de Geociências do Nordeste*, 4: 45-57. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2018v4n0ID13222>

Rabelo, D.R.; Santos, M.R.S. & Sousa Filho, M.R.P. 2022. Análise comparativa dos dados pluviométricos de satélite e de superfície em bacia hidrográfica semiárida. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 3: 63-75.

Roque, C.G., Carvalho, M.P. & Prado, R.M. 2001. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(1): 147-156. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100016>

Santos, L.P. Dos & Aquino Martins, P.T. 2016. Mudanças temporais no uso e cobertura do solo na bacia do reservatório de Peixe Angical, Tocantins. *Ciência e Natura*, 38(1): 137-145. <https://doi.org/10.5902/2179460X19073>

SÃO PAULO (Estado). 2008. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). *Plano de bacia da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10) - Revisão para atendimento da deliberação CRH 62 – Relatório final*. São Paulo, 352 p.

SÃO PAULO (Estado). 2013. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. *Coordenadoria de Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH): 2012/2015*. São Paulo: SSRH/CRHi.

Silva Matos, T.V. 2015. *Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)*. Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais.

Simonetti, V. C., Silva, D.C. da C. & Rosa, A.H. 2022. Reflexos Ambientais da Perda de Nutrientes do Solo por Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim (SP). *Caminhos de Geografia*, 23(87): 84-102. <https://doi.org/10.14393/RCG238758895>

Sousa Filho, M.R.P., Rabelo, D.R., Santos, M.R.S. & Girão, I.R.F. 2022. Uso do geoprocessamento na espacialização de dados pluviométricos na região metropolitana de fortaleza. *International journal of development research*, 12, ID: 24158 7 p. <https://doi.org/10.37118/ijdr.24158.03.2022>

Tarcitani, F.C. & Barrella, W. 2009. Conhecimento Etnoictológico dos Pescadores Desportivos do Trecho Superior da Bacia do Rio Sorocaba. *Revista Eletrônica de Biologia*, 2(2): 1-28.

Tricart, J. 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro. IBGE, Dir. Técnica – SUPREN.

Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook n. 537. 1978. 67p.

Zanetti, N., Galembeck, O. & Rodrigues, V.R. 2010. Utilização de SIG para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos: uma aplicação no município de Sorocaba-SP. In: *Experiências Em Gestão Dos Recursos Hídricos Por Bacia Hidrográfica*. Atibaia. *Anais...* Atibaia:, p. 1-13.