



DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL NATURAL DE EROÇÃO (PNE) E DEGRADAÇÃO DO SOLO ASSOCIADA A RODOVIAS NO MUNICÍPIO DE OURINHOS/SP

Formação

Maria Cristina Perusi  

Professora Doutora do curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciência, Tecnologia e Educação, Campus de Ourinhos
Contato: cristina.perusi@unesp.br

Julio Cesar Demarchi  

Doutor em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente
Contato: julio.demarchi@gmail.com

Edson Luís Pirolí  

Professor Doutor do curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciência, Tecnologia e Educação, Campus de Ourinhos
Contato: edson.piroli@unesp.br

Jakson José Ferreira  

Mestre em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente
Contato: jakson.ferreira@unesp.br

Edinéia Aparecida dos Santos Galvanin  

Professora Doutora do curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciência, Tecnologia e Educação, Campus de Ourinhos
Contato: edineia.galvanin@unesp.br

Daniela Fernanda da Silva Fuzzo  

Professora Doutora do curso de Geografia, Universidade do Estado de
Minas Gerais, Campus de Frutal
Contato: silva.danielaf@gmail.com

Como citar: PERUSI, M. C.; DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; FERREIRA, J. J.; GALVANIN, E. A. S.; FUZZO, D. F. S. Determinação do Potencial Natural de Erosão (PNE) e degradação do solo associada a rodovias no município de Ourinhos/SP. *Revista Formação (Online)*, v. 54, n. 29, p. 357-386, 2022.

Recebido: 10/09/2021

Aceito: 31/03/2022

Data de publicação: 02/08/2022

Resumo

Este trabalho teve como objetivo determinar o Potencial Natural de Erosão (PNE) da microbacia hidrográfica do Trevo, município de Ourinhos/São Paulo, onde foi desenvolvido quadro de erosão linear, possivelmente intensificado pela finalização da obra de implantação do trevo das rodovias BR-153 e SP-270. A demanda partiu do Ministério Público Federal. Foram usados somente os fatores físicos da Equação Universal de Perda de Solo por erosão (EUPS): erosividade das chuvas (R), erodibilidade dos solos (K) e topografia (LS). A erosividade das chuvas foi estimada por meio dos dados mensais pluviométricos do posto "Ourinhos", do período de 1981 a 2015. Utilizou-se dado médio de erodibilidade do Latossolo, oriundo do basalto, predominante no município. Para o fator topográfico: comprimento de rampa e declividade foi utilizado o modelo digital de elevação do satélite ALOS, sensor PALSAR, de resolução espacial 12,5 m. O mapa do Potencial Natural de Erosão foi obtido a partir da multiplicação dos fatores supracitados. O índice de erosividade do período foi de 6.800,36 MJ.mm.ha-1.h-1, classificado como intermediário; a erosão tem início em declividades de 12 a 20%; a classe predominante de PNE é Fraca, 0-400 t.ha-1.ano-1. Atribui-se a formação da ravina à impermeabilização da rodovia, que levou à concentração e descarga das águas pluviais em um único ponto, sem a dissipação da energia. Portanto, apesar do baixo potencial natural superficial erosivo, o planejamento inadequado da obra potencializou o processo erosivo, que resultou em forte impacto ambiental negativo.

Palavras-chave: Degradação ambiental. escoamento concentrado. Drenagem de rodovias. Perda de solo. Ação Civil Pública.

DETERMINATION OF THE NATURAL POTENTIAL FOR EROSION (NPE) AND LAND DEGRADATION ASSOCIATED WITH HIGHWAYS IN THE MUNICIPALITY OF OURINHOS IN SAO PAULO STATE

Abstract

This paper determined the Natural Potential for Erosion (NPE) of the Trevo watershed in the municipality of Ourinhos in São Paulo State, where a linear erosion framework was developed, perhaps intensified by the completion of the installation work of the BR-153 and SP-270 highways interchange. The claim was brought by the Federal Public Ministry. Only the physical factors of the Universal Soil Loss Equation (USLE) were used: rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), and the topographic factor (LS). Rainfall erosiveness was estimated based on monthly rainfall data from the "Ourinhos" service from the period 1981 to 2015. The average data of Latosol erodibility derived from basalt, and the predominant one in the municipality, was used. For the topographic factor we have used the digital elevation model from the ALOS PALSAR High-Resolution DEM - digital elevation model - of 12.5 m. The NEP map has been obtained from the multiplication of the aforementioned factors. The erosivity index for that period stood at 6,800.36 MJ.mm.ha-1.h-1, rated as intermediate. The erosion starts on slope of 12 to 20%. The predominant NPE class is Weak - 0-400 t.ha-1.year-1. The formation of ravine to road sealing, which had led to the concentration and discharge of rainwater in one single point without dissipation of energy. Despite the low NPE, the improper planning of the construction work boosted the erosive process resulting, however, in a significant negative environmental impact.

Keywords: Environmental degradation. Concentrated flow. Highway drainage. Soil loss. Public civil lawsuit.

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL NATURAL DE EROSIÓN (PNE) Y DEGRADACIÓN DEL SUELO ASOCIADA A LAS CARRETERAS EN EL MUNICIPIO DE OURINHOS/SP

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo determinar el Potencial Natural de Erosión (PNE) de la microcuenca del Trevo, ubicada en el municipio de Ourinhos, São Paulo, Brasil, donde se desarrolló un escenario de erosión lineal, posiblemente intensificado por la conclusión de la construcción del trébol entre las carreteras BR-153 y SP-270. La demanda provino del Ministerio Público Federal. Sólo se utilizaron los factores físicos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS): erosividad de las lluvias (R), erodabilidad del suelo (K) y factor topográfico (LS). La R se estimó utilizando datos mensuales de precipitación de la estación "Ourinhos", de 1981 a 2015. Se utilizó el dato promedio de erodabilidad del Latosol, proveniente del basalto, predominante en el municipio. Para

calcular el LS: longitud y grado de inclinación de la pendiente, se utilizó el modelo digital de elevación del satélite ALOS, de resolución espacial de 12,5 m por pixel. El mapa de PNE se obtuvo de la multiplicación de los factores mencionados. El índice de erosividad para el período fue de 6.800,36 MJ.mm.ha⁻¹.hr⁻¹, clasificado como intermedio; la erosión comienza en las pendientes del 12 al 20 %; la clase predominante de PNE es débil, 0-400 ton.ha⁻¹.año⁻¹. La formación de la erosión se atribuye a la impermeabilización de la carretera, que provocó la concentración y descarga de las aguas pluviales en un único punto, sin disipación de energía. Por lo tanto, a pesar del bajo potencial de erosión natural de la superficie, la planificación inadecuada de la obra potenció el proceso erosivo, que resultó en un fuerte impacto ambiental negativo.

Palabras clave: Degradación ambiental. Escorrentía concentrada. Drenaje de carreteras. Pérdida del suelo. Acción Civil Pública.

INTRODUÇÃO

O fortalecimento do grande capital industrial, eminentemente a partir dos séculos XVIII e XIX, foi um salto importante para a produção de excedentes, que acelerou as transações comerciais e a necessidade de transportar, de forma rápida e segura, os bens de consumo e de capital produzidos em diferentes regiões do país. A princípio, os rios e os sistemas terrestres exerceram essa função, mas os sistemas de transporte rapidamente evoluíram de rudimentares estradas de terra, britadas ou de paralelepípedo, para as modernas malhas rodoviárias, obviamente não de forma igualitária em todas as regiões do Brasil.

Foi nessa conjuntura que o território nacional chegou aos “56,2 mil quilômetros quadrados de rodovias pavimentadas” (CNT, 2019, p. 14), responsável por 61,1% do transporte de carga e pela movimentação interestadual e internacional de 92,5 milhões de passageiros (CNT, 2018). Para tanto, de acordo com a fonte supracitada, o processo de implantação e ampliação de rodovias compreende grandes obras de engenharia, possíveis somente com a elaboração e aprovação do Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), de acordo com a Resolução CONAMA nº 237/1997 (CONAMA, 1997) e depois de submetido ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para emissão da Licença Prévia (LP).

A construção de rodovias compreende grandes mobilizações de terra que, devido às consideráveis extensões territoriais da obra, podem encontrar diferentes características mecânicas que apresentam potencialidades e limitações diversas quanto às intervenções inerentes a esses processos. Uma vez não consideradas essas peculiaridades, bem como as recomendações para estabilização de taludes, por exemplo, a implantação de rodovias pode resultar na aceleração dos processos da dinâmica superficial, nesse caso, representado principalmente por feições erosivas lineares, como ravinas e voçorocas. Estudo realizado por Fernandes e Cerri (2011, p. 462) demonstrou que:

[...] 76% das ocorrências de processos deflagrados na Rodovia Marechal Rondon foram processos erosivos, seguidos pelas quedas de blocos e escorregamentos (8% das ocorrências), rastejos (4%), assoreamentos (2%), enchentes (1%) e solapamentos (1%), tipo específico de erosão.

Corroboram com esses resultados Pires e Carmo Júnior (2018), ao afirmarem que 60% dos movimentos superficiais resultantes de problemas ambientais em rodovias são as erosões, que segundo os referidos autores, podem vir a causar o colapso da estrutura viária.

De acordo com Seutloali e Beckedahl (2015), a construção de rodovias envolve inúmeros cortes e aterros, assim como valas de drenagem e bueiros que contribuem para a concentração do escoamento superficial e a degradação do solo. Os cortes e aterros geralmente possuem altas declividades que aumentam a velocidade da água pluvial, reduzem a infiltração e agravam o quadro de degradação. Os autores afirmam ainda que os processos erosivos se iniciam nas estruturas de drenagem que desviam a água das áreas impermeáveis e na superfície dos cortes. Ademais, as rodovias perpassam transversalmente as encostas, modificando sua hidrologia, e criam a necessidade de drenagem da água produzida pela impermeabilização do solo por meio de bueiros implantados em intervalos regulares, os quais promovem a concentração do escoamento encosta abaixo, nos pontos de descarga e, conseqüentemente, o desencadeamento de processos erosivos lineares (SEUTLOALI; BECKEDAHL, 2015).

Ao analisar as voçorocas que surgiram após a construção da rodovia entre Makalle e Adwa na região montanhosa de Tigray, norte da Etiópia, Nyssen et al. (2002) concluíram que elas se formaram devido à concentração do escoamento em drenos instalados nas margens e a sua transferência encosta abaixo por bueiros. O sistema inadequado de drenagem da rodovia promoveu o aumento da área de contribuição do escoamento nas bacias de drenagem, ampliando seu tamanho médio de 5,8 para 8,5 ha. Algumas voçorocas surgiram imediatamente abaixo da rodovia, enquanto outras desenvolveram suas cabeceiras entre 100 e 500 metros abaixo, devido à presença de estruturas de dispersão do escoamento instaladas nas saídas dos bueiros. Como medidas de controle dos processos erosivos, os autores propuseram a redução da distância entre bueiros, a dissipação do escoamento dos bueiros em terraços, o armazenamento temporário em bacias de detenção, barragens de terra com saída gradual e o escoamento por canais vegetados.

A erosão acelerada ou antrópica resulta da ação direta ou indireta do indivíduo ou da sociedade nos sistemas solo, vegetação e/ou água, gerando um desequilíbrio do ecossistema. Dentre os processos erosivos, os lineares, oriundos da concentração da água em locais de embaciamento, áreas deprimidas, podem se manifestar de duas formas: a) ravinas, incisões cujo

limite é o aquífero livre e; b) boçorocas ou voçorocas, quando a ravina evolui a ponto de interceptar o aquífero. Esse critério de distinção entre ravinas e voçorocas foi definido por pesquisadores do Instituto Paulista de Tecnologia (CANIL et al., 1995). De acordo com Almeida Filho e Teixeira Filho (2014), diversos pesquisadores concordam que a erosão em ravina é desencadeada basicamente pelo escoamento concentrado das águas das chuvas, ao passo que a passagem para voçoroca se dá quando aflora o aquífero freático, que tende a alargar-se e aprofundar-se até atingir o equilíbrio dinâmico. Nesse sentido, as ravinas ocorrem pela ação do escoamento superficial, enquanto as voçorocas resultam da junção da ação dos escoamentos superficial e subsuperficial.

A ocorrência de erosão no Estado de São Paulo é estimada em 200 milhões de toneladas de solo por ano, 70 % dos quais chegam aos mananciais na forma de sedimentos transportados, causando assoreamento e poluição. Os processos erosivos afetam aproximadamente 80 % da área cultivada do estado. As estradas rurais não pavimentadas contribuem para o processo com 50 % do solo carregado aos mananciais e por 70 % das erosões existentes (ZOCCAL, 2007). “A erosão ocasiona um prejuízo, no âmbito da propriedade rural, de US\$ 2,9 bilhões por ano, relativo aos custos com correção dos solos, perdas referentes à produtividade e custos de produção” (COUTINHO et al., 2014, p. 2).

O estudo desses processos deve considerar os mecanismos que interagem entre si nos diferentes estágios de evolução a partir de sulcos, passando por ravinas e chegando a voçorocas (OLIVEIRA, 2007). Essas são as formas mais graves de degradação do solo no Brasil, país com predomínio de chuvas de alta intensidade que potencializam os processos, principalmente em áreas desprovidas de cobertura vegetal, alta declividade e baixo ou nenhum emprego de medidas conservacionistas.

Nesse sentido, os processos erosivos são provocados e controlados pela interação de diversos fatores, naturais e antrópicos (THOMAZ, 2019; DEMARCHI; PIROLI, 2020; GUERRA; JORGE, 2021), sendo que estes são representados pelo uso e manejo da terra, além das práticas conservacionistas. Esses também são fatores utilizados no modelo empírico da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e suas modificações (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD et al., 1997).

No caso do Potencial Natural de Erosão (PNE), escopo desse trabalho, dado em unidade de área ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), são considerados somente fatores do meio físico da EUPS e, embora se destinem à predição dos processos de erosão laminar e em sulcos rasos, são essenciais para prever o comportamento, desdobramentos e capacidade de resiliência dessas bases físicas

quando da intervenção antrópica, em resposta à implantação de grandes obras de engenharia, como estradas de rodagem, por exemplo.

A equação (1) para cálculo do Potencial Natural de Erosão é:

$$PNE = R.K.LS \quad (1)$$

Em que:

R - fator erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$); K - fator erodibilidade do solo: $t.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$; L – fator comprimento de rampa e S - fator declividade (fator topográfico). Os fatores L e S geralmente são calculados conjuntamente e retornam valores adimensionais (SILVA, 2008).

Dada a necessidade de compreender as causas e a dinâmica dos processos erosivos lineares em uma propriedade rural localizada à jusante do trevo das rodovias BR-153 com a SP-270, esse trabalho teve como objetivo determinar o Potencial Natural de Erosão (PNE) da bacia hidrográfica do Trevo, no município de Ourinhos/SP, em atendimento à solicitação do Ministério Público Federal, Ação Civil Pública nº 0001284-20.2016.403.6125, que não tramita em segredo de justiça.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características gerais do município de Ourinhos e área de estudo

O município de Ourinhos localiza-se a sudoeste do estado de São Paulo, tendo o rio Paranapanema como divisa natural com o estado do Paraná. O município faz parte da 11ª Região Administrativa de Marília e é integrante do Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema (CBH-MP), Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 17), com destaque para os rios principais, o Pardo e o Turvo.

De acordo com o IPT (1981), o município está inserido na Unidade Geotectônica da Bacia Sedimentar do Paraná, Grupo São Bento, Formação Serra Geral. A rocha magmática extrusiva predominante é o basalto de textura afanítica, com predomínio de minerais de textura muito fina, que tende a se decompor e formar solos predominantemente argilosos. Esse processo é potencializado pelo tipo de clima, nesse caso, tropical chuvoso, “Am”, segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*. A precipitação média anual é de 1.356,8 mm e a temperatura média de 22,1°C (MIRANDA et al, 2005).

A vegetação original do município, de acordo com o IBGE (2004), era constituída pela Floresta Estacional Semidecidual, mais conhecida como Mata Atlântica de Interior, cujo sistema radicular abundante atuou de forma muito considerável no processo de intemperismo físico-biológico, contribuindo, juntamente com outros fatores, para a formação de solos profundos.

Em áreas rurais, historicamente, essa vegetação foi sendo substituída por *commodities* agrícolas, de interesse do agronegócio. Na área em questão, identifica-se o cultivo de soja (*Glycine max*) em rotação de cultura com milho (*Zea mays*), em sistema de plantio direto. Nesse sistema, a quantidade de resíduos orgânicos que retorna ao solo é maior que no preparo convencional, principalmente em classe textural argilosa (ZANÃO JÚNIOR et al, 2010). Além disso, a rotação de culturas e a baixa mobilização do solo contribuem para reduzir os processos erosivos.

Somada a essas características, a região em questão pertence à morfoescultura Planalto Ocidental Paulista, cujas formas de relevo distinguem-se por serem colinas amplas e baixas, de topos convexos, com declividade de 10 a 20 % (ROSS; MOROZ, 1997). Baseados nessas características de relevo, infere-se que numa condição natural, a infiltração seria maior que o deflúvio. Porém, há que se considerar os efeitos muitas vezes danosos da intervenção antrópica ao dizimar a cobertura vegetal, mobilizar radicalmente grandes volumes de terra, como na construção de rodovias, desviar e/ou aterrar corpos hídricos, entre outros, mesmo em detrimento da legislação vigente, o que certamente altera a dinâmica superficial, podendo resultar em processos erosivos.

A combinação de todos esses fatores e processos resultou na formação predominante dos Latossolos Vermelhos eutróféricos e distroféricos, textura argilosa, e dos Latossolos Vermelhos distróficos, textura média (ROSSI, 2017). São solos minerais, profundos, bem drenados e bastante homogêneos quanto às características físicas desde a superfície até a rocha, excetuando o horizonte A. Por serem estáveis mecanicamente, têm alta resiliência (IAC, s.d.). Cumpre destacar que essa é uma característica natural dessa classe de solo, passível de alteração se descumpridas as práticas adequadas de manejo.

É nesse cenário de bases físicas que se assenta, segundo o IBGE (2021), a população estimada de 115.139 habitantes no ano de 2021, o que configura uma pressão bastante considerável sobre os bens ambientais.

Caracterização do processo erosivo

O quadro de degradação ambiental manifestado na forma de erosão linear, ravina deflagrada em talude, desenvolveu-se na divisa entre duas propriedades rurais, localizadas a jusante do trevo de intersecção entre as rodovias Transbrasiliana (BR-153) e Raposo Tavares (SP-270), no km 619 + 900 metros (Figura 1). De acordo com dados de campo obtidos com teodolito em dezembro de 2018 e imagens visualizadas no Google Earth (GOOGLE, 2018), a referida erosão apresentava 408,73 metros de extensão e, em média, 5 metros de profundidade e largura.

Na Figura supracitada, identifica-se a presença de mais de 20 pontos para coleta de águas pluviais, cujo volume é concentrado em um duto localizado em talude dentro da propriedade rural em questão, a jusante do trevo de acesso ao município de Ourinhos. Além disso, destacam-se as péssimas condições de segurança para os transeuntes, como pode ser observado no ponto 14 (Figura 1) e a presença de resíduos sólidos urbanos (RSU) no percurso da erosão, que certamente serão carregados para o rio Pardo, a jusante da área degradada.

Figura 1 - Bacia hidrográfica do Trevo, município de Ourinhos/SP: localização da erosão, pontos de drenagem e condição ambiental do trevo entre a BR-153 e SP-270



Organização: Dos autores (2020).
Fonte da imagem: Maxar Technologies (2020).

No ano de 2012, as concessionárias das rodovias Auto Raposo Tavares (CART) S.A. e a Transbrasiliana S.A. contrataram uma empresa de engenharia, OAS, para execução da integralidade dos serviços de implantação do trevo que liga essas rodovias. Nesse contexto, o Ministério Público Federal (BRASIL, 2016) ajuizou uma Ação Civil Pública contra a Concessionária Auto Raposo Tavares (CART) S.A e a Transbrasiliana S.A. quanto ao dano ambiental. Como parte do processo, entre os anos de 2018 e 2019 foi elaborado um laudo com o intuito de identificar as possíveis causas da erosão e que também resultou nesse artigo, devidamente autorizado pelo órgão competente. Em julho de 2020, o juiz concedeu uma liminar favorável e estipulou um prazo de 60 dias para início das obras de recuperação. Porém, as empresas entraram com recurso e o processo está em trâmite, não em segredo de justiça.

A Figura 2 apresenta o início da erosão e a estrutura de alvenaria, a princípio projetada para dissipar a energia cinética da água. Porém, seja pelo dimensionamento inadequado ou volume de água subestimado, a intervenção foi visivelmente ineficiente.

Figura 2 - Galeria de águas pluviais, solapamento do solo na base do duto e início do processo erosivo na bacia do Trevo, município de Ourinhos/SP



Foto: Dos autores (2019).

Nas bordas da erosão encontram-se degraus de abatimento ativos e o colapso de volumes de terra da superfície, identificados em espaços de tempo muito curtos, o que pode ser atribuído às intensas chuvas de verão. Desta forma, pode-se afirmar que os processos são dinâmicos e constantes (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Degrau de abatimento identificado a poucos centímetros da erosão



Foto: Dos autores (2019).

Figura 4 - Volume de terra solapada a partir do degrau de abatimento identificado na Figura 3



Foto: Dos autores (2019).

Procedimentos metodológicos

Metodologia para determinação do Potencial Natural de Erosão (PNE)

O Potencial Natural de Erosão (PNE) da bacia hidrográfica que envolve a área de estudo foi obtido pelo produto dos fatores naturais da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), sistematizada por Wischmeier e Smith (1978): erosividade da chuva (fator R), erodibilidade do solo (fator K) e fator topográfico (LS), constituído pelo comprimento de rampa (L) e declividade do terreno (S).

A erosividade da chuva do município de Ourinhos foi estimada por meio dos dados pluviométricos do posto “Ourinhos”, código D6-011, localizado nas coordenadas geográficas 22°59’00”S e 49°50’00”W, com altitude de 450 m, disponíveis no Banco de dados hidrológicos do DAEE. Utilizaram-se os dados pluviométricos mensais de 32 anos, do período de 1981 a 2015, com exceção dos anos 1984, 1999 e 2014, que apresentaram falhas no registro dos dados de um ou mais meses.

Os índices de erosão (EI) mensais foram calculados pela equação ajustada por Lombardi Neto, Silva e Castro (1980) a partir de dados pluviográficos de 115 postos pluviométricos do Estado de São Paulo, determinados pelo produto da energia cinética de chuvas erosivas por sua intensidade máxima em 30 minutos. O índice EI é dado por:

$$EI = 68,86 * \left(\frac{r}{p}\right)^{0,85} \quad (2)$$

Em que: r é a precipitação média mensal (mm) e p é a precipitação média anual (mm).

O índice EI médio anual, que representa o fator R da EUPS, foi obtido pela soma dos índices EI mensais.

De acordo com o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017), o solo da área de estudo é do tipo Latossolo Vermelho Distroférico típico, A moderado ou proeminente, textura argilosa ou muito argilosa, fase relevo suave ondulado (LV-11). Como os índices de erodibilidade encontrados na literatura para essa classe de solo são discrepantes, dados os diferentes materiais de origem e demais fatores de formação, utilizou-se neste trabalho o índice de erodibilidade médio calculado por Silva e Alvares (2005) para a ordem dos Latossolos do Estado de São Paulo, de $0,0162 \text{ t.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, enquadrado na classe média, mas muito próximo do limite inferior desta classe, que é de $0,01529 \text{ t.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$.

O mapeamento do fator topográfico da EUPS utilizou o modelo digital de elevação do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), sensor PALSAR, de resolução espacial 12,5 m. Os fatores L e S foram obtidos pela calculadora raster do SIG ArcGIS 10.3.1¹ (ESRI, 2014), por meio das equações usadas na metodologia de determinação em ambiente SIG descrita por Quintero, Salazar e Melo (2017).

O fator comprimento de rampa foi determinado pela equação (DESMET; GOVERS, 1996):

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} * x_{i,j}^m * (22,13)^m} \quad (3)$$

em que: $L_{i,j}$ é o fator comprimento de rampa para a coordenada i, j ; $A_{i,j-in}$ é a área de contribuição da entrada do pixel com coordenadas i, j , expressa em m^2 , determinada pelos módulos “*Flow direction*” e “*Flow accumulation*” do ArcGIS 10.3.1; D é o tamanho do pixel, expresso em metros; m é o expoente do fator L, calculado pelo algoritmo desenvolvido por McCool et al. (1989) em função da declividade do terreno, que estabelece a relação de erosão em sulcos e entressulcos; e $x_{i,j}$ é o coeficiente do aspecto do pixel com coordenadas i, j , assumindo valor unitário de acordo com Quintero, Salazar e Melo (2017).

O mapa de declividade da área de estudo foi elaborado pelo módulo “*Slope*” do SIG ArcGIS, a partir do modelo digital do terreno gerado interpolador “*Topo to raster*” do mesmo SIG, que produz modelos hidrológicamente corretos a partir de elementos como curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem. Esses elementos foram extraídos da carta topográfica do IBGE (1973), folha SF-22-Z-A-VI-3 – “Ourinhos”, de escala 1:50.000 e equidistância das

¹ Software licenciado para o Laboratório de Geoprocessamento, curso de Geografia da UNESP – Câmpus de Ourinhos.

curvas de nível de 20 metros. O mapa de declividade foi disposto em 5 classes qualitativas propostas por França (1963): plano (0 – 3 %), suave ondulado (3 – 6 %), ondulado (6 - 12 %), forte ondulado (12 – 20 %) e montanhoso (20 – 40 %).

O fator declividade do terreno foi calculado pelas equações propostas por McCool et al. (1987):

$$S = 10,8 * \text{sen } \theta + 0,03, \text{ quando } s < 9 \% \quad (4)$$

$$S = 16,8 * \text{sen } \theta - 0,50, \text{ para } s \geq 9 \% \quad (5)$$

em que: S é o fator declividade (adimensional); θ é a declividade, medida em grau; e s é a declividade dada em porcentagem.

O mapa do fator S foi elaborado a partir de uma equação condicional, em função da declividade (%). O fator topográfico (LS) resultou do produto dos fatores L e S.

O mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE), resultante da multiplicação entre os fatores anteriormente descritos, foi fatiado em quatro classes qualitativas propostas por Valério Filho (1994): fraco (0 – 400 t.ha⁻¹.ano⁻¹), moderado (400 – 800 t.ha⁻¹.ano⁻¹), forte (800 – 1.600 t.ha⁻¹.ano⁻¹) e muito forte (>1.600 t.ha⁻¹.ano⁻¹).

Procedimentos de campo e levantamento de dados da erosão

Em novembro de 2018 foram realizadas atividades na área de estudo para registro fotográfico das várias feições existentes com o intuito de subsidiar as análises da dinâmica do processo erosivo. As dimensões médias da erosão, largura e profundidade, foram obtidas com o Teodolito Freiburger, modelo FG-T3 e trena marca Bosch, modelo DLE 70. A extensão foi determinada a partir de imagens disponíveis no Google Earth (MAXAR TECHNOLOGIES, 2020).

Para análise temporal do processo erosivo foram usadas imagens disponíveis no Google Earth dos anos 2002 (MAXAR TECHNOLOGIES, 2002), 2012 (MAXAR TECHNOLOGIES, 2012), 2013 (CNES-AIRBUS, 2013) e 2017 (MAXAR TECHNOLOGIES, 2017).

Os dados de precipitação pluvial (mm), diária e média mensal do período 2008 a 2018, foram obtidos no Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO, 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fatores analisados para determinação do Potencial Natural de Erosão (PNE)

Índice de erosividade da chuva (fator R)

A determinação do índice de erosividade (R) permite identificar o potencial erosivo das chuvas de uma dada região, “sem considerar o manejo, as práticas agrícolas ou a proteção deste solo” (SANT’ANNA NETO, 1995, p. 36). A energia cinética das gotas de chuva é responsável pela quebra da estrutura do solo e consequente desagregação, individualizando as partículas e tornando-as passíveis ao transporte e deposição em áreas de embaciamento. O quadro se agrava em solos degradados, pulverizados pela mecanização agrícola, desprovidos total ou parcialmente de cobertura vegetal ou mobilizados para obras de engenharia, como rodovias, sem a devida contenção.

Essas afirmações também constam do trabalho de Batista et al. (2021) ao afirmarem que dados de erosividade podem servir de subsídio para identificar áreas mais suscetíveis à erosão hídrica, importante contribuição para os gestores públicos na tomada de decisões acerca da conservação do solo e água, além de promover orientações para atividades agropecuárias, bem como outras formas de intervenção no sistema solo que podem ser fortemente influenciadas por esse fator.

Na Tabela 1 estão dispostos os dados da média mensal de precipitação, a erosividade média mensal e a porcentagem anual desse fator para o município de Ourinhos/SP.

Tabela 1 - Precipitação média e índice de erosividade das chuvas (EI), mensais e anual do município de Ourinhos/SP

Mês	Precipitação média mensal (mm)	EI médio mensal (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)	% EI anual
Janeiro	230,38	1.424,68	20,95
Fevereiro	170,37	852,96	12,54
Março	158,05	750,78	11,04
Abril	94,18	311,38	4,58
Mai	89,03	282,99	4,16
Junho	80,46	238,26	3,5
Julho	55,22	125,64	1,85
Agosto	37,21	64,22	0,94
Setembro	96,19	322,76	4,75
Outubro	149,18	680,57	10,01
Novembro	145,37	651,28	9,58
Dezembro	197,32	1.094,84	16,1
Total	1.502,96	6.800,36	100

Organização: Dos autores (2019).

Observa-se que o período com maiores índices pluviométricos vai de outubro a março, consequentemente, com maiores riscos à deflagração dos processos erosivos. É nesse período que se concentra 80,22 % da capacidade erosiva média de todo o ano. Porém, os meses de dezembro e janeiro concentram os maiores índices de erosividade, 1.094,84 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ e 1.424,68 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, respectivamente, contribuindo com 37,05 % do total anual. Importante considerar esses episódios extremos, principalmente quando se trata de grandes obras de engenharia, que se caracterizam por mobilizações de terra, disponíveis para que os agentes de transporte atuem.

Ademais, as chuvas convectivas de elevada intensidade, características do verão de clima tropical, produzem elevados volumes de escoamento superficial que, em sistemas de drenagem deficientes instalados em rodovias, podem não ser adequadamente dispersados. Sua concentração e elevada energia podem produzir ou intensificar os processos erosivos lineares existentes. O período seco é caracterizado pelos menores índices de erosividade da chuva, como era esperado, mas as precipitações podem ocasionar o destacamento e o transporte de sedimentos tanto quanto no período chuvoso, quando encontra o solo desprovido da cobertura vegetal ou pulverizado, dependendo do sistema de preparo utilizado, o que reforça a necessidade do manejo conservacionista do solo.

O valor total do EI para o referido município no período de 1981 a 2015 foi de 6.800,36 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, acima do encontrado por Sant’anna Neto (1995, p. 42), “de 1971 a 1993, 6.650 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹”, calculado a partir de dados do posto pluviométrico D6-083, desativado no ano

2004. Embora ambos os postos pluviométricos estejam localizados na mesma altitude, a diferença de índice de erosividade pode ser atribuída às diferenças de precipitação ou de registro de dados entre eles, mudanças climáticas em escala global, entre outras possibilidades, não havendo evidências suficientes para comprovar o aumento da precipitação após o ano 1993.

De acordo com o autor supracitado, o município em questão encontra-se com índice intermediário quanto ao potencial erosivo. Porém, há que se considerar outros fatores como a erodibilidade do solo e o comprimento de rampa e declividade: fator topográfico.

De acordo Ricardi (2020) as chuvas são eventos naturais que podem apresentar diferentes comportamentos a depender do tipo de clima de cada região. Além disso, são influenciadas pela altitude, latitude, longitude, relevo, estações do ano, entre outras variáveis. Podem ser bem definidas ou inconstantes. Desta forma, a erosividade da chuva pode apresentar variabilidade espacial e temporal, fundamentais de serem consideradas para fins de planejamento do controle de erosão. Em pesquisa realizada pela referida autora, ao atualizar dados de erosividade da chuva para todo o estado de São Paulo no período de 1997 a 2017, encontrou que predominam erosividade de média a alta nesse recorte territorial. Constatou-se também que o município de Ourinhos/SP apresenta um valor anual de $6.938,3 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, muito próximo do obtido nessa pesquisa, como pode ser observado na Tabela 1.

Nessas condições, sugere-se a adoção de práticas conservacionistas como a manutenção de plantas de cobertura da terra, estabilidade de talude e atenção especial à dissipação da energia da água pluvial, em especial se concentrada, quando de grandes intervenções no sistema solo/relevo.

Erodibilidade do solo (fator K)

No território brasileiro é identificada uma variedade significativa de solos, resultado de uma grande diversidade de relevo, material parental, clima, cobertura vegetal e episódios do tempo geológico. Por esse motivo, as diferentes regiões desse país continental apresentam potencialidades e limitações quanto ao uso da terra (GUERRA; JORGE, 2021) que, uma vez não considerados, em especial em classes com alta erodibilidade, contribuem para exacerbar a degradação de extensas áreas urbanas e/ou rurais.

A erodibilidade do solo, fator K da EUPS, determina o quão suscetível aos processos erosivos é o referido bem ambiental, a partir de suas propriedades tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica e permeabilidade do perfil. Comumente as propriedades físicas e

químicas do sistema solo estão diretamente relacionadas com o material parental, nesse caso, basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral (IPT, 1981), cujo processo de decomposição química e desagregação física resultam em classes de solo com uma textura que varia de argilosa a muito argilosa, a princípio mais resistentes aos processos erosivos (KLEIN, 2012).

Quanto à matéria orgânica do solo (MOS), Besen et al. (2018) afirmam que embora essa propriedade seja fundamental para agregação das partículas individualizadas e, conseqüentemente, confira-lhe maior resistência à erosão, em ambientes fortemente antropizados e com predomínio do manejo convencional, com baixo emprego de plantas de cobertura, esses serviços não prevalecem. Aliás, essa é uma realidade possível através do emprego de manejo conservacionista do solo, como o plantio direto, por exemplo, presente na área de estudo.

O plantio direto caracteriza-se por manter o solo constantemente coberto com resíduos das culturas preexistentes, o que o protege da energia cinética das chuvas; fornece alimento para a vida do/no solo que, por sua vez, o reestrutura; conserva os macroporos; e forma e estabiliza os agregados, o que aumenta a aeração e a penetração da água, evitando erosão e enchentes (PRIMAVESI, 2016; THOMAZ, 2019).

Na área em questão, de acordo com Rossi (2017), há o predomínio do Latossolo Vermelho Distroférico típico, A moderado ou proeminente, textura argilosa ou muito argilosa, fase relevo suave ondulado (LV-11). São solos profundos, bem drenados, de baixa fertilidade e altos teores de ferro (EMBRAPA, s.d.). Em trabalho organizado por Silva e Alvares (2005), esse solo enquadra-se na classe de erodibilidade média, com valor de $0,0162 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$. Infere-se que essa condição está diretamente associada à classe textural predominantemente argilosa, com teores de argila acima de 35 %, que promove maior estruturação, se comparada com a arenosa (KLEIN, 2012). De acordo com o referido autor, a menor permeabilidade dos solos argilosos, entretanto, pode fazer a taxa de escoamento superficial e a suscetibilidade à erosão aumentarem, resultado da maior tendência à compactação.

Demarchi e Piroli (2020) contribuem com o debate no sentido de reforçar que, em geral, solos de textura argilosa e muito argilosa, como os que predominam na área da pesquisa, apresentam menores índices de erodibilidade, mesmo sendo menos permeáveis, relacionados com a menor macroporosidade. Em estudo realizado pelos referidos autores em bacia hidrográfica no município de Santa Cruz do Rio Pardo/SP, classes de solo sem mudança textural ao longo do perfil, caso dos Latossolos, “apresentaram índices médios de erodibilidade, com

valores entre 0,038 e 0,039 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹, com exceção dos solos de textura muito argilosa, cujo índice médio foi de 0,032 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹” (DEMARCHI; PIROLI, 2020, p. 127). Porém, o fato dessa classe de solo, diretamente relacionada com a textura, se enquadrar em índice que poderia sugerir menor preocupação, não descarta a necessidade da adoção de práticas conservacionistas bem como o emprego de técnicas de dissipação de energia da água no sentido da vertente.

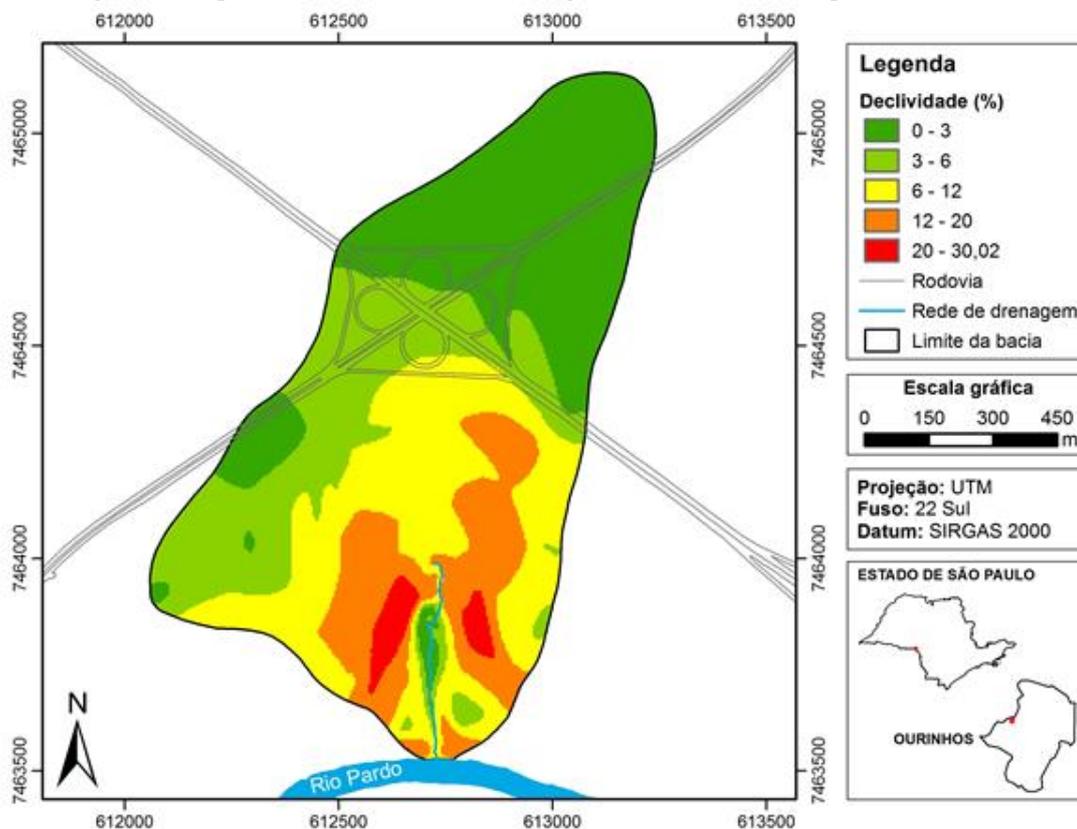
Corroboram com essas afirmações Cassuli, Martins e Silva (2019), ao determinarem a erodibilidade do solo (fator K) em Latossolo Vermelho Eutroférico, originário de rochas basálticas, em classes de declividade de muito fraca a fraca (entre 0 e 6 %), relevo plano a suave ondulado, em bacia hidrográfica no município de São Miguel do Iguaçu/PR, onde identificaram predominantemente valor médio de erodibilidade para essa classe de solo, o que contraria o senso comum de que os solos argilosos do basalto seriam “ímmunes” à erosão hídrica e, portanto “possuiriam erodibilidade potencial baixa” (CASSULI; MARTINS; SILVA, 2019, p. 43). No caso em tela, segundo os referidos autores, o fator determinante para esse resultado foram as rampas longas e retílineas, que potencializam o deflúvio em detrimento de permeabilidade.

Ao determinarem a erodibilidade de Latossolos Vermelhos Distroféricos na bacia do rio do Campo/PR, com vistas na EUPS, Gottstein, Borges Júnior e Arantes (2019) identificaram que essa classe de solo está associada ao menor fator de erodibilidade (0,0128 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹), se comparado com Argissolos e Nitossolos. Ainda assim, destacam que cada fator deve ser considerado em conjunto com outros, sejam do meio físico ou antrópico.

Comprimento de rampa e declividade: fator topográfico (LS)

Como se pode observar na Figura 5, na bacia do Trevo identificam-se classes de declividade que vão desde plana a forte ondulada, nesse caso, o que pode sugerir maior potencial erosivo. Na faixa sudoeste/nordeste da bacia predominam declividades de 0-3 e de 3-6 %, plano e suave ondulado, respectivamente. Nessas condições, desde que a área seja permeável e não esteja compactada, a infiltração deve ser maior que o deflúvio, o que reduz a probabilidade de desenvolvimento dessas feições. Porém, é na transição dessas classes de declividade que se encontram o trevo que conecta a BR-153 e a SP-270 e os pontos de captação das águas pluviais, à montante da erosão linear.

Figura 5 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Trevo, município de Ourinhos/SP



Organização: Dos autores (2020).

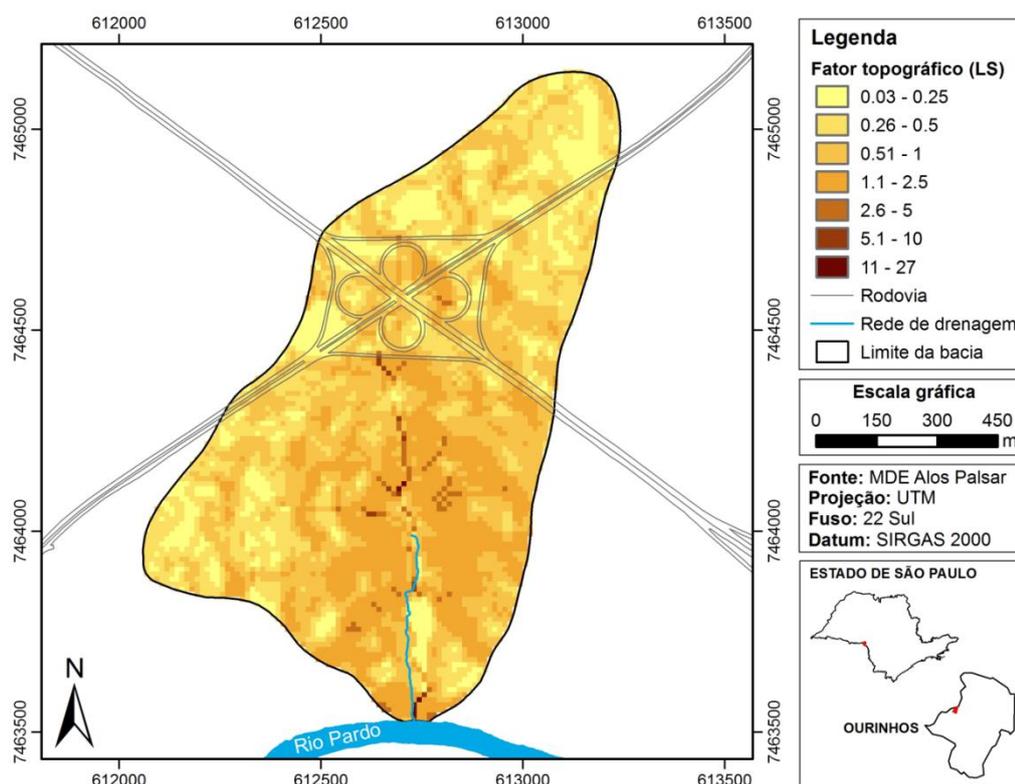
A ravina tem origem e se estende predominantemente em declive de 6-12 %, ondulado, e se conecta com a rede de drenagem em declividade de 12 a 20 %, forte ondulado. A declividade reduz consideravelmente no banhado, a jusante da erosão, 0-6 %, que caracteriza um ambiente de deposição dos sedimentos e soluções transportadas, no qual a redução da energia cria um ambiente propício para assoreamento do sistema hídrico. Comportamento parecido foi encontrado por Demarchi e Piroli (2020) em bacia hidrográfica em Santa Cruz do Rio Pardo/SP. Essa condição, somada à notória concentração da água em área desprovida de vegetação e de práticas conservacionistas, resulta no aumento da sua velocidade e maior capacidade de entalhamento vertical do terreno, podendo inclusive interceptar o aquífero. O quadro pode ser intensificado quanto maior o comprimento de rampa.

“O comprimento de rampa expressa a relação direta entre a projeção horizontal e a declividade. Sua ocorrência sugere a distribuição das encostas a partir de seu comprimento, o que reflete no tempo” (COUTINHO et al., 2014, p. 6) trajeto, volume e energia do escoamento superficial, aumentando a capacidade erosiva.

O produto dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S) resulta no fator topográfico (LS) da EUPS. De acordo com Moraes e Sales (2017), a identificação do fator topográfico como principal parâmetro influenciador dos processos erosivos frente à condição de excessiva erosividade das chuvas evidencia o alto risco de erosão a que estão submetidas as áreas que apresentam declividade acentuada. Resultado semelhante foi obtido por Silva (2008), que verificou que quanto maior o comprimento de rampa e declividade, maior a velocidade da água e, conseqüentemente, maior o potencial erosivo.

Na Figura 6 é possível constatar que à montante da erosão predominam as classes de menor LS, de 0,03 a 1, coerentes com a menor declividade. Porém, como representado na Figura 2, é nessa área que o volume das águas pluviais é captado e concentrado num único ponto, onde se identificam classes de 2.6 a 27, justamente onde foi deflagrado o processo erosivo.

Figura 6 - Mapa do fator LS da bacia hidrográfica do Trevo, município de Ourinhos/SP



Organização: Dos autores (2020).

Potencial natural de erosão da bacia do Trevo, município de Ourinhos/SP

O Potencial Natural de Erosão (PNE) resulta do produto de alguns elementos do meio físico considerados na EUPS: pedológicos, erodibilidade do solo; climáticos, erosividade da

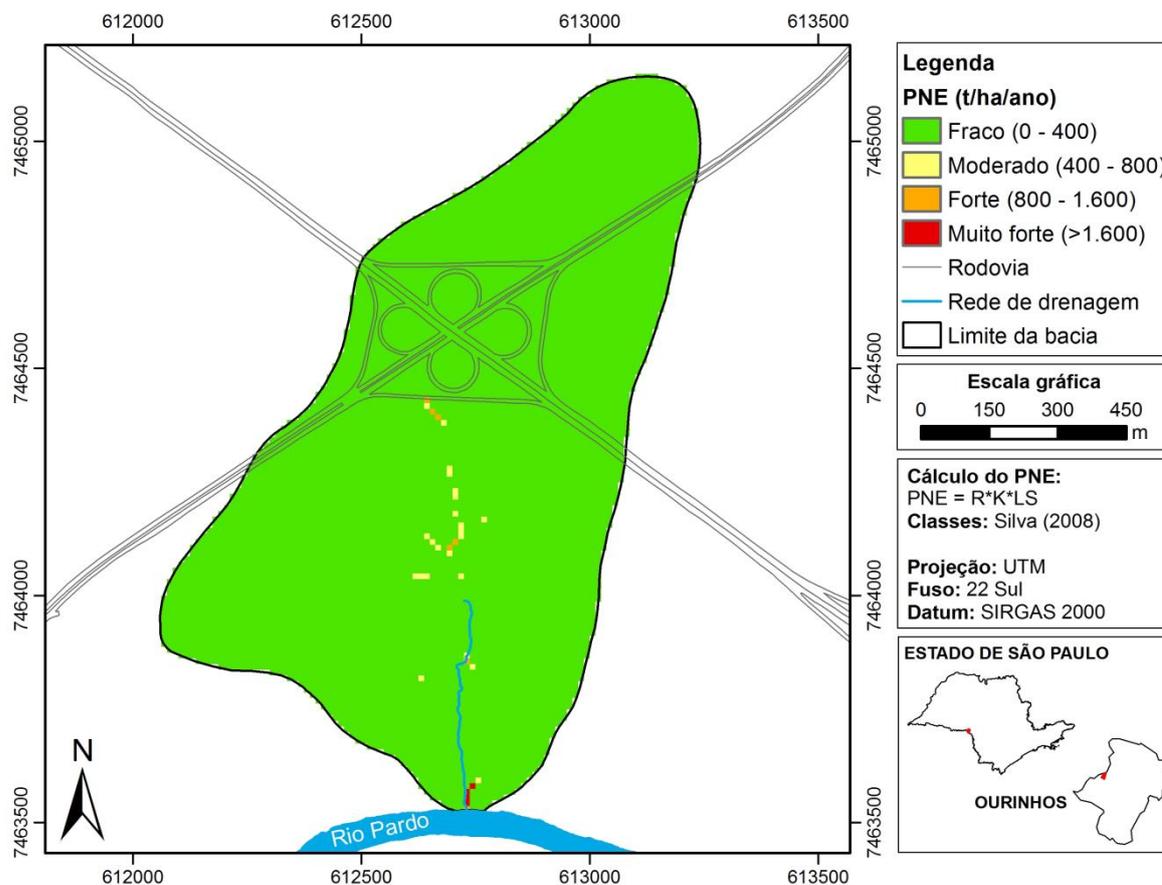
chuva; e relevo, comprimento de rampa e declividade. O produto final é dado em $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ e, uma vez espacializado, permite determinar o grau de fragilidade de uma região à possível deflagração e/ou agravamento de processos erosivos. Considerando obras de construção civil, manutenção ou duplicação de rodovias, quando um grande volume de terra é mobilizado, essa prática pode contribuir sobremaneira para evitar a implantação desses processos ou propor medidas mitigatórias eficientes.

Na Figura 7 verifica-se que a classe predominante de PNE da bacia do Trevo é Fraca, $0-400 t.ha^{-1}.ano^{-1}$. Valores mais altos, Moderado a Forte, $400 a 800$ e $800 a 1.600 t.ha^{-1}.ano^{-1}$, respectivamente, foram identificados na forma de pequenas manchas nas imediações da ravina, associados ao fator topográfico. Resultados parecidos foram obtidos por Silva (2008) em pesquisa realizada no município de Sorocaba/SP, onde a PNE predominante foi $< 400 t.ha^{-1}.ano^{-1}$ e, ao fazer uma análise entre o mapa de PNE e seus condicionantes, verificou ampla semelhança entre o fator topográfico e o resultado obtido, e muito pouca semelhança entre a espacialização do PNE e os solos.

Ao avaliar o PNE na bacia do rio Nioaque, em Aquidauana/MS, com predomínio do Latossolo Vermelho Distrófico em relevo plano, Falcão e Leite (2018) obtiveram o valor médio de $400 t.ha^{-1}.ano^{-1}$, considerado Potencial Natural de Erosão “fraco”. Ademais, assim como Silva (2008) e na pesquisa em tela, o fator LS foi o que mais influenciou nas perdas de solo, embora a erosividade tenha sido determinada como forte, variando entre $8.394 a 9.045 MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$ (FALCÃO; LEITE, 2018).

Reflexão importante de Morais e Silva (2020) reforça as contribuições dos autores anteriormente citados e corroboram com os resultados obtidos nessa pesquisa. Em trabalho realizado na bacia do rio Longá, ao norte do estado do Piauí e parte no Ceará, concluíram que mais de 70 % da referida bacia predominantemente apresenta muito baixo índice de PNE ($0-200 t.ha^{-1}.ano^{-1}$) e baixo ($201-400 t.ha^{-1}.ano^{-1}$), apesar do notório quadro de degradação do solo e da água. Desta forma, os referidos autores sustentam que os processos erosivos e o consequente assoreamento dos corpos hídricos devem estar associados às ações antrópicas, como as que determinam o uso da terra e práticas de conservacionistas. Além disso, concluíram também que nas poucas áreas onde o PNE é maior, está diretamente relacionado com as vertentes inclinadas do reverso da cuesta da Ibiapaba, entre os referidos estados, denotando mais uma vez maior influência do fator topográfico em detrimento dos demais fatores analisados.

Figura 7 - Mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE) da bacia hidrográfica do Trevo, município de Ourinhos/SP



Organização: Dos autores (2020).

Apesar de predominar Fraco Potencial Natural de Erosão na bacia, ainda assim o desenvolvimento da ravina é uma realidade. Desta forma, há que se considerar outras possíveis variáveis envolvidas no processo, a exemplo da concentração das águas pluviais em um único ponto no terreno, sem as devidas medidas dissipadoras de energia, contenção ou aproveitamento da água.

Evolução espaço-temporal e características do processo erosivo

Nas Figuras 8 a 11 identifica-se a área onde se desenvolveu a erosão, conforme as elipses amarelas. Nota-se que não houve mudanças consideráveis entre os anos de 2002 e 2012. No ano de 2013 (Figura 10), após a conclusão das obras do trevo e com as rodovias duplicadas, é possível verificar que o processo erosivo já está instalado e avança consideravelmente nos anos seguintes. Na Figura 11 é possível identificar o processo de erosão remontante, responsável pelos danos causados à estrutura de alvenaria destinada a dissipar a energia da água (Figura 2).

Figura 8 – Área da erosão em 18/08/2002, durante as obras de construção do trevo, Ourinhos/SP



Fonte: Maxar Technologies (2002).

Figura 9 - Imagem 03/05/2012, Ourinhos/SP



Fonte: Maxar Technologies (2012).

Figura 10 – Obra concluída e intensificação da erosão. Imagem de 11/09/2013, Ourinhos/SP



Fonte: CNES-AIRBUS (2013).

Figura 11 – Intensificação da erosão remontante. Imagem de 11/12/2017, Ourinhos/SP



Fonte: Maxar Technologies (2017).

Conforme pode ser observado na sequência de imagens de satélite, documentação fotográfica e *in loco*, constata-se que a água das chuvas que precipita sobre a área de contribuição é quase totalmente canalizada para um único ponto, exatamente onde surgiu o processo erosivo e que ainda se encontra ativo. Além disso, a partir do ano de 2013, com a conclusão do trevo, a área impermeabilizada pela rodovia passou a ser de 57.800 m². Nessa área a água da chuva não infiltra e, ao escoar superficialmente e de forma concentrada pelos dutos, resulta no processo erosivo linear.

O volume de terra, uma vez desprendido, é facilmente transportado pela ação da água e, nesse caso, tende a se acumular nas áreas alagadas a jusante da erosão, na planície aluvial do

Rio Pardo (Figura 12). A quantidade total de chuvas ocorridas na área de contribuição entre os anos de 2013 e 2018 foi de 9.830,1 mm. De posse desses dados, verifica-se que precipitou sobre toda essa área durante o referido período, um total de 568.179.780 litros de água ou 568.179 m³, o que perfaz uma média anual de 94.696,63 m³. Nessas condições, sem um adequado dimensionamento de obras de dissipação ou captação de água, nenhum solo mecanicamente estável suportaria.

Acrescenta-se a essas ocorrências os danos à vegetação, como a presença de árvores dentro da erosão que, graças à energia da água, não conseguem fixar suas raízes, como pode ser observado na Figura 13. Além disso, destaca-se a grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU), possivelmente oriundos da rodovia, que no decorrer do tempo tende a alcançar o Rio Pardo e, na sequência, o rio Paranapanema (Figura 14).

Figura 12 - Nascente localizada à jusante da erosão, Ourinhos/SP



Foto: Dos autores (2019)

Figura 13 - Árvore com raízes expostas dentro da erosão, Ourinhos/SP



Foto: Dos autores (2019)

Figura 14 - Lixo acumulado dentro da erosão, à montante do rio Pardo, Ourinhos/SP



Foto: Dos autores (2019)

Identifica-se nas figuras citadas uma dinâmica própria da erosão linear: num primeiro momento há o processo de entalhamento, que pode atingir o aquífero livre, formando uma voçoroca, o que agravaria e muito a situação. Na sequência ou concomitante, o alargamento da ravina que, nesse caso, certamente atingiria a área de cultivo de soja, o que geraria prejuízos ao agricultor. Em campo foi obtida a profundidade do poço tipo cacimba ou caipira, localizado na sede da propriedade, na mesma altura do início da erosão, 18,55 m. Somada a essa informação, um dos pontos mais críticos da erosão apresenta a profundidade de 7 m. Sendo assim, caso nenhuma medida seja adotada, o aprofundamento de mais 11,55 m fará a ravina evoluir para uma voçoroca, com o aquífero aflorado, o que implicará em medidas dispendiosas de recuperação, além da aplicação da legislação específica para o caso.

Cumpra alertar também que o notório colapso de solo no duto da galeria, distante não mais que 4 m da alça de acesso da BR-153 para a SP-270, pode resultar em comprometimento na estrutura da rodovia, inclusive com risco grave de acidentes e à vida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo estimou o Potencial Natural de Erosão da bacia hidrográfica do Trevo, constituído dos fatores erosividade da chuva, erodibilidade do solo e fator topográfico, como indicador de suscetibilidade natural aos processos erosivos, para compreender as causas da erosão em ravina instalada no local, objeto da Ação Civil Pública movida pelo Ministério Público Federal contra as concessionárias que administram as rodovias.

A erosividade da chuva calculada para o município de Ourinhos/SP no período de 1981 a 2015 foi de 6.800,36 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, considerado como índice intermediário de potencial erosivo, próximo dos resultados encontrados em produções recentes para o estado de São Paulo que, a princípio, sugerem apenas medidas convencionais de conservação do solo, principalmente se mobilizados entre os meses de maior índice pluviométrico e/ou, caso a intervenção antrópica resulte em concentração de grandes volumes de águas pluviais. Deve-se considerar, entretanto, para fins de manejo agrícola e das águas pluviais, que 37,05 % da erosividade média anual das chuvas ocorre em apenas dois meses, dezembro e janeiro.

A montante da erosão predominam as classes de menor fator topográfico, LS de 0,03 a 1, coerentes com relevo plano a suave ondulado, que sugerem maior infiltração em detrimento do deflúvio. É nessa área que foram construídos os drenos de captação de águas pluviais que desembocam de maneira concentrada à jusante do trevo. A erosão percorre declividades maiores, sobretudo em relevo ondulado (6 – 12 %) e de grande comprimento de rampa, onde se identificam classes de fator topográfico de 2,6 a 27. Desta forma, esse fator guarda relação direta com o mapa do PNE e com os processos confirmados *in loco*.

A literatura consultada é unânime em classificar o Latossolo, classe presente na área de estudo, como de “baixa erodibilidade”, se comparado com os Argissolos, Cambissolos e Neossolos, por exemplo. Porém, fato é que a área em questão se apresenta fortemente degradada por erosão hídrica linear. Nesse sentido, parte-se do princípio de que todas as classes de solo podem ser altamente erodíveis caso medidas conservacionistas não sejam adotadas; caso suas peculiaridades físicas, químicas, biológicas, mecânicas e mineralógicas não sejam consideradas; quando obras de grande impacto ambiental tenham medidas mitigadoras mal

dimensionadas ou quando não se considera o maior número possível de variáveis, seja do meio físico ou antrópico.

O produto de todos esses fatores resultou na determinação do PNE de classe predominante Fraca, 0-400 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Porém, há que se considerar que apesar do resultado favorável, a erosão encontra-se ativa. Portanto, mesmo que a bacia apresente baixo Potencial Natural de Erosão, o planejamento inadequado da obra resultou em forte impacto ambiental negativo.

Embora o PNE seja indicado para estimar o potencial natural do solo à erosão laminar e em sulcos e utilize somente alguns fatores do meio físico, para o objetivo em questão e demanda do Ministério Público Federal, a metodologia contribuiu sobremaneira para afirmar que a área degradada teve como agravante a ação antrópica, manifestada na conclusão da obra do trevo.

Os resultados obtidos demonstram que a impermeabilização da rodovia e o direcionamento das águas pluviais concentradas em um único local intensificaram a incisão, em área de fraco Potencial Natural de Erosão. Mesmo que houvesse alguma cicatriz anterior à obra, possível pela característica do terreno, principalmente associado ao fator LS, mais especificamente o comprimento de rampa, a mesma deveria ter sido considerada ao dimensionar o escoamento das águas pluviais e o dissipador de energia.

Importante destacar que a transferência de volumes de solo por erosão é sinônimo de comprometimento econômico, social e ambiental, além de, nesse caso, incorrer em riscos à vida humana. Além disso, a parceria entre o Ministério Público Federal e a Universidade pública deverá contribuir para reverter ou mitigar impactos ambientais negativos na área em questão e prevenir possíveis impactos em outras bacias hidrográficas como consequência da drenagem inadequada de rodovias.

AGRADECIMENTOS

Ao Ministério Público Federal - Procuradoria da República no município de Ourinhos, na figura do Procurador da República, V. Ex.^a Dr. Antônio Marcos Martins Manvailier.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, G. S.; TEIXEIRA FILHO, J. A importância da diferenciação dos processos erosivos lineares dos tipos ravina e boçoroca. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, 2014. P. 1-15.
- BATISTA, R. A. W.; NERY, L. M.; MATUS, G. N.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Estimativa do fator de erosividade do solo da região do Vale do Ribeira Paulista, Brasil. **Formação (Online)**, Presidente Prudente, v. 28, n. 53, p. 441-460, jan./abr. 2021.
- BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; MONTEIRO, A. N. T. R.; IWASAKI, G. S.; PIVA, J. T. Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuaria**, Trujillo, v. 9, n. 3, p. 429-439, jul./set. 2018.
- BRASIL. Ministério Público Federal. **Ação civil pública nº 0001284-20.2016.403.6125**. Ourinhos, 2016. p. 256.
- CANIL, K.; IWASA, O. Y.; SILVA, W. S.; ALMEIDA, L. E. G. Mapa de feições erosivas lineares do estado de São Paulo: uma análise qualitativa e quantitativa. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 5., 1995, Bauru. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE, 1995. p. 249-251.
- CASSULI, D. C.; MARTINS, V. M.; SILVA, B. A. A erodibilidade do solo na bacia hidrográfica do rio Pinto, São Miguel do Iguçu/PR. **Geografia em questão**, Marechal Cândido Rondon, v. 12, n. 2, p. 28-46, jul./dez. 2019.
- CIAGRO, CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. **Monitoramento Climatológico**: Início da Estação: 01/05/2000 a 27/10/2020. Município: Ourinhos-SP. Portal do Governo do Estado de São Paulo. 2020. Disponível em: https://www.udop.com.br/indices-pluviometricos-arquivos/35/2000a2020_historico_ourinhos.pdf. Acesso em: 30 out. 2020.
- CNES-AIRBUS. **Imagem do satélite SPOT-5 11/09/2013**. Lat. - 22.924402, Long. - 49.900933. 2013. Disponível em: Google Earth. Acesso em: 15 dez. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília, DF: CNT: SEST SENAT, 2019. 236 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário**: Rodovias Esquecidas do Brasil. Brasília, DF: CNT, 2018. 55 p.
- COUTINHO, L. M.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; XAVIER, A. C.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Cálculo do fator LS da equação universal de perdas de solos (EUPS) para a bacia do rio da Prata, Castelo-ES. **Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 8, n. 1, p. 1-9, jan./abr. 2014.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Dados Hidrológicos.** Chuva mensal. Posto pluviométrico Ourinhos (D6-011). 2020. Disponível em: <http://www.hidrologia.daae.sp.gov.br/>. Acesso em: 22 abr. 2020.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L. Modelagem de erosão e aporte de sedimentos em bacia hidrográfica com o modelo WaTEM/SEDEM. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 78, p. 117-137, dez. 2020.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeni, v. 51, n. 5, p. 427-433, set./out. 1996.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Latossolos Vermelhos.** Brasília, DF: Ageitec, s. d. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0q43a0r9rz3uhk.html. Acesso em: 25 abr. 2020.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. **ArcGIS / ArcMap 10.3.1 for desktop.** Redlands: ESRI, 2014. [programa de computador]

FALCÃO, K. S.; LEITE, E. F. Avaliação do potencial natural à erosão hídrica na bacia do rio Nioaque. **Revista GeoAraguaia**, Barra do Garças, v. 8, n. 3, p. 79-97, dez. 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7792/pdf>. Acesso em: 22 ago. 2021.

FERNANDES, F. M.; CERRI, L. E. S. Elaboração da carta geotécnica de suscetibilidade de um trecho da Rodovia Marechal Rondon – SP-300 (SP, Brasil). **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 457-465, jul./set. 2011.

FRANÇA, G. V. A classificação de terras de acordo com sua capacidade de uso com base para um programa de conservação de solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1., 1963, Campinas. **Anais [...]** São Paulo: Secretaria da Agricultura, Divisão Estadual de Máquinas Agrícolas, 1963. p. 399-408.

GOOGLE LLC. **Google Earth para web.** Mountain View: Google, 2018. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 29 nov. 2018.

GOTTSTEIN, P.; BORGES JUNIOR, M. A.; ARANTES, E. J. Uso de sistema de informação geográfica para determinação do potencial erosivo de bacias hidrográficas: estudo de caso na bacia do Rio do Campo/PR. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracajú, v. 10, n.3, p.352-367, abr./maio 2019.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Degradação dos solos – abordagens teóricas e estudos de casos, ao longo de 25 anos (1994–2019), no âmbito do Lagesolos. **Revista Humboldt**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 1-29, e57375, jan./jun. 2021.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Latossolos.** Campinas: IAC/APTA/Secretaria de Agricultura e Abastecimento, s. d. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solospdf/Latossolos.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2020.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Ourinhos**: região sudeste do Brasil. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do IBGE, 1973. 1 carta topográfica, color., jpeg. Escala 1:50.000. Projeção UTM. Datum horizontal: Córrego Alegre, MG, Datum vertical: marégrafo Imbituba, SC. Folha SF-22-Z-A-VI-3, MI 2738-1.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. v. 1. 1 mapa. Escala: 1:5.000.000.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades@ - Ourinhos: população. 2021**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ourinhos/panorama>. Acesso em: 02 set. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. 2 v. 1 mapa. Escala: 1:500.000.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2. ed. Passo Fundo: UPF Editora, 2012. 240 p.

LOMBARDI NETO, F.; SILVA, I. R.; CASTRO, O. M. Potencial de erosão de chuvas no Estado de São Paulo. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3., Recife, 1980. **Anais [...]**. Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1980. p. 159.

MAXAR TECHNOLOGIES. **Imagem do satélite RadarSat-2 03/05/2012**. Lat. -22.924402, Long. -49.900933. 2012. Disponível em: Google Earth [programa de computador]. Acesso em: 15 dez. 2018.

MAXAR TECHNOLOGIES. **Imagem do satélite RadarSat-2 11/12/2017**. Lat. -22.924402, Long. -49.900933. 2017. Disponível em: Google Earth [programa de computador]. Acesso em: 15 dez. 2018.

MAXAR TECHNOLOGIES. **Imagem do satélite RadarSat-2 18/08/2002**. Lat. -22.924402, Long. -49.900933. 2002. Disponível em: Google Earth [programa de computador]. Acesso em: 15 dez. 2018.

MAXAR TECHNOLOGIES. **Imagem do satélite Worldview-3 25/05/2020**. Lat. -22.926619, Long. -49.902058. 2020. Disponível em: Google Earth [programa de computador]. Acesso em: 30 jun. 2020.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 1387-1396, set./out. 1987.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 5, p. 1571-1576, set./out. 1989.

MIRANDA, M. J.; PINTO, H. S.; ZULLO JR., J.; FAGUNDES, R. M.; FONSECHI, D. B. **Clima dos municípios paulistas: Ourinhos**. CEPAGRI/UNICAMP, 2005. Disponível em:

<<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>.

Acesso em: 12 maio 2019.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 1 (número especial), p. 84-105, 2017.

MORAIS, R. C. S.; SILVA, A. J. O. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Longá, Piauí, Brasil. **GEOTemas**, Pau dos Ferros, v. 10, n. 2, p. 116-137, maio/ago. 2020.

NYSSSEN, J.; POESEN, J.; MOEYERSONS, J.; LUYTEN, E.; VEYRET-PICOT, M.; DECKERS, J.; HAILE, M.; GOVERS, G. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 27, n. 12, p. 1267-1283, nov. 2002.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 57-99.

PIRES, R. R.; CARMO JÚNIOR, G. N. R. Processos erosivos em rodovias: uma revisão sistemática sobre os métodos de previsão e monitoramento. **E&S Engineering and Science**, Cuiabá, v. 4, n. 7, p. 2-23, dez. 2018.

PRIMAVESI, A. **Manual do solo vivo: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio**. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2016. 205 p.

QUINTERO, A. F. C.; SALAZAR, L. A. L.; MELO, O. R. Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. **Revista de Investigación Agraria y Ambiental**, Bogotá, v. 8, n. 1, p. 17-26, jan./jun. 2017.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, D. K.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. (coord.). **Predicting soil erosion by water: guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: US Gov. Print Office, 1997. 404 p.

RICARDI, A. M. **Variabilidade espacial e temporal da erosividade das chuvas (EI₃₀) no Estado de São Paulo, Brasil**. 2020. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: USP-FFLCH/IPT/FAPESP, 1997. v. 1. 1 mapa. Escala: 1:500.000.

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118 p. Escala: 1:750.000.

SANT'ANNA NETO, J. L. A erosividade das chuvas no Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 9, p. 35-49, nov. 1995.

SEUTLOALI, K. E.; BECKEDAHN, H. R. A review of road-related soil erosion: an assessment of causes, evaluation techniques and available control measures. **Earth Sciences Research Journal**, Bogotá, v. 19, n. 1, p. 73-80, jun. 2015.

SILVA, A. M. Potencial Natural de Erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, Mayagüez, v. 8, n. 1, p. 5-14, 2008.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 33-41, jan./abr. 2005.

THOMAZ, E. L. **Erosão do solo**: teorias, métodos e perspectivas. Curitiba: CRV, 2019. 260 p.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: PEREIRA, V. P.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (ed.). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: FCAV – UNESP/SBCS, 1994. p. 223-242.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537).

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; CARVALHO-ZANÃO, M. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.3, p. 429-438, maio/jun. 2010.

ZOCCAL, J. C. **Adequação de erosões**: causas, consequências e controle da erosão rural. Presidente Prudente: CODASP, 2007. 62 p.