



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Modelagem da Erosão Hídrica do Solo no Brasil: Uma Revisão Sobre os Principais Métodos e Modelos

Mélory Maria Fernandes de Araujo¹, Gabriel Borges dos Santos², Maurício de Oliveira³, Karen Klitzke⁴, Stefan Domingues Nachtigall⁵, Pablo Miguel⁶, Lizete Stumpf⁷

¹ Dra. em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. mmfa.eh@gmail.com. (autora correspondente). Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8552-8407>.

² Dr. em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Anglo, Rua Gomes Carneiro, 1 – Centro – CEP 96010-610 – Pelotas, RS – Brasil. gabrielwxsantos@hotmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0013-0134>.

³ MSc. em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. agro_mauricio@outlook.com. Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-4984-528X>.

⁴ MSc. em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. karenrpklinzke@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-1498-4073>.

⁵ Dr. em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. stefan.tefo@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4623-8033>.

⁶ Dr. em Ciência do Solo, Professor Adjunto, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. pablo.ufsm@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7999-8912>.

⁷ Dra. em Agronomia, Professora Adjunta, Departamento de Solos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, Capão do Leão - RS, Brasil - 96010-610. zete.stumpf@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7760-0803>.

Artigo recebido em 12/06/2024 e aceito em 22/01/2025

RESUMO

No intuito de suprir a demanda mundial por alimentos as atividades agropecuárias vêm aumentando, principalmente em países tropicais em desenvolvimento como o Brasil, porém, a expansão dessas novas áreas tem o potencial de alterar os processos hidrológicos e de erosão do solo. Neste sentido surge a modelagem, que fornece uma abordagem quantitativa e consistente para estimar a erosão do solo e a produção de sedimentos. Para obter uma melhor compreensão da aplicação de métodos e modelos de previsão da erosão do solo no Brasil, esse trabalho teve por objetivo revisar de forma abrangente a literatura no que compete ao tema da modelagem da erosão hídrica do solo no Brasil, mais especificadamente, levantar o estado da arte, referente a identificação de métodos e modelos aplicados a perda de solo através das bases de dados da Scopus e Web of Science. No Brasil existe a aplicação de diversos métodos e modelos, sendo os principais: Universal Soil Loss Equation, Revised Universal Soil Loss Equation, Modified Universal Soil Loss Equation, Fingerprinting, Water Erosion Prediction Project, Soil and Water Assessment Tool e Erosion Potential Method. O modelo Universal Soil Loss Equation se destaca como o mais aplicado conforme bases de dados utilizada. Tais modelos desempenham um papel importante, pois servem como ferramenta de apoio e contribuição na tomada de decisão a planejamentos de práticas conservacionistas e o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Conservação do solo, Degradação do solo, Perda de solo.

Modeling of soil water erosion in Brazil: a review on the main methods and models

ABSTRACT

To meet the world demand for food, areas related to agricultural activities have been increasing, especially in tropical countries that are developing like Brazil, however, the expansion of these new areas has the potential to change hydrological processes and soil erosion. In this sense comes modeling, which provides a quantitative and consistent approach to estimate soil erosion and sediment production. In order to obtain a better understanding of the application of methods and models for predicting soil erosion in Brazil, this work aimed to comprehensively review the literature on the subject of soil water erosion modeling in Brazil, more specifically, to raise the state of the art, referring to the identification of methods and models applied to soil loss caused by water erosion through the Scopus and Web of Science databases. It was found that in Brazil there is the application of different methods and models in different areas and regions, the main ones being: Universal Soil Loss Equation, Revised Universal Soil Loss Equation, Modified Universal Soil Loss Equation, Fingerprinting, Water Erosion Prediction Project, Soil and Water Assessment Tool and Erosion Potential Method. Among such models, the Universal Soil Loss Equation model stands out as the most applied according to the database used. Such models play an important role, as they serve as a tool to support and contribute to decision-making in plans that aim at

the elaboration of conservationist practices and sustainable development linked to the management and occupation of the soil.

Keywords: Soil conservation, Soil degradation, Soil loss.

Introdução

O solo, com base em suas inter-relações com diversos elementos que compõem o ecossistema, detém elevada importância socioeconômica e ambiental (Cunha et al., 2016). Em FAO (2015), o solo é discutido de forma abrangente como um recurso essencial para a segurança humana no século 21, sendo a erosão a principal ameaça aos mesmos. O processo de erosão do solo depende de vários fatores climáticos (duração, intensidade e frequência da precipitação), pedológicos (profundidade, granulometria, permeabilidade, estrutura, dentre outros), topográficos (declividade, comprimento de rampa, coeficiente de rugosidade) e vegetação (tipo e densidade da cobertura vegetal) (Soares et al., 2018). Destaca-se que a erosão consiste em um fenômeno cujo impacto sobre os recursos naturais, especialmente solo e água, têm preocupado governos e instituições ao longo do tempo (Minella et al., 2008). O estudo da erosão dos solos se torna importante, pois o conhecimento antecipado do potencial de erosão do solo em uma área pré-estabelecida pode direcionar a atividade humana no sentido de um uso e manejo sustentável dos recursos naturais (Silva et al., 2020).

Estudos que buscam esclarecer a dinâmica dos processos erosivos vêm sendo realizado há diversas décadas, em todo o mundo. Conforme Borrelli et al. (2021), há mais de um século a comunidade científica vem abordando por meio de estudos como Bennett e Chapline (1928) e Smith (1914) os processos que norteiam a erosão do solo, assim como, a ocorrência de erosão acelerada do solo e seus impactos socioambientais negativos associados.

A erosão do solo acarreta uma série de consequências em várias escalas, tanto local quanto regional, afetando negativamente a produtividade agrícola, a qualidade da água e provocando alterações nos regimes hidrológicos, além de contribuir para o assoreamento de rios e reservatórios (Labrière et al., 2015). Diversos fatores influenciam esse processo, como a intensidade da chuva, a erodibilidade do solo, a cobertura vegetal, as características do relevo e os tipos de materiais presentes, além das práticas de manejo e conservação do solo em bacias hidrográficas (Dechen et al., 2015).

Nos dias de hoje, a criação de ferramentas que possam auxiliar não apenas no mapeamento e estado real da erosão, mas também na elaboração

de estratégias de mitigação, nas práticas de manejo e/ou conservação bem como na criação de cenários futuros (que envolvam as mudanças climáticas) são urgentemente necessários (Tan et al., 2018). Neste intuito surgem os diferentes modelos matemáticos, que a partir dos fatores que afetam as perdas de solos e a sua distribuição espacial, permitem por meio da modelagem identificar áreas mais vulneráveis à erosão hídrica do solo e simulam possíveis cenários futuros de gestão conservacionistas (Oliveira et al., 2023; Ayer et al., 2015). Para Borrelli et al. (2021), esses modelos desempenham um papel importante como ferramentas de apoio aos tomadores de decisão nas avaliações políticas.

Vale destacar que, se comparado a outras metodologias, a modelagem matemática da erosão do solo é uma técnica relativamente simples e barata, pois oferece resultados com base em informações disponíveis previamente (Ganasri e Ramash, 2016). Devido a tal motivo, a escala de aplicação dos modelos de erosão do solo está em um constante crescimento no mundo todo (Auerswald et al., 2014; Borrelli et al., 2017a, Borrelli et al., 2017b, Naipal et al., 2018).

O uso intensivo do solo decorrente de ações antrópicas implica em impactos nas bacias hidrográficas, ocasionando a sua erosão hídrica, um processo de redução da fertilidade e alterações na estrutura do solo, prejudicial à disponibilidade de água devido ao acúmulo de sedimentos nos cursos d'água, sendo necessárias avaliações sobre a perda de solo nesse sistema (Batista et al., 2017; Madenoglu et al., 2020). Sendo assim, o desenvolvimento de estudos sobre as perdas de solo pela erosão hídrica que adote o uso dos modelos é fundamental para a definição e adoção de práticas conservacionistas de manejo e auxílio na tomada de decisão por parte dos gestores brasileiros (Oliveira et al., 2015). Com isso, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão sistemática referente à identificação de métodos e modelos aplicados para estimar as perdas de solo por erosão hídrica no Brasil. Tendo como hipótese que o uso de modelos matemáticos para estimar as perdas de solo por erosão hídrica no Brasil tem se mostrado uma abordagem eficaz e acessível para identificar áreas vulneráveis e desenvolver estratégias de manejo sustentável, facilitando a tomada de decisões políticas e ações conservacionistas, principalmente em face das

mudanças climáticas e do impacto das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas.

Desenvolvimento

Processo de seleção de artigos para revisão de literatura

Em termos metodológicos, o presente trabalho é baseado em uma pesquisa exploratória, sobre o tema da modelagem da erosão hídrica do solo no Brasil, tendo como métodos a revisão bibliográfica com base em artigos, revistas científicas, livros e trabalhos acadêmicos. Destaca-se que não se aplicou aos materiais pesquisados limite temporal de publicação.

Para a busca de referências foi selecionado duas bases de dados, que são: Web of Science e Scopus. As palavras-chave inicialmente escolhidas na busca, foram (etapa metodológica geral): erosão

hídrica do solo, modelagem da erosão hídrica do solo e Brasil. Após definir quais eram os principais modelos usados no Brasil pesquisou-se pelos seus nomes (etapa metodológica específica), que são: Universal Soil Loss Equation (USLE), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), Fingerprinting, Water Erosion Prediction Project (WEPP), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e Erosion Potential Method (EPM).

Destaca-se que, tais palavras-chave foram buscadas nos campos de “título”, “resumo” e “palavras-chave” dos trabalhos filtrados das bases de dados utilizadas. Pós-seleção do material escolhido estudou-se os mesmos no intuito de conceber este trabalho. O fluxograma apresentado na Figura 1 demonstra em aspectos gerais o processo e estrutura da revisão.

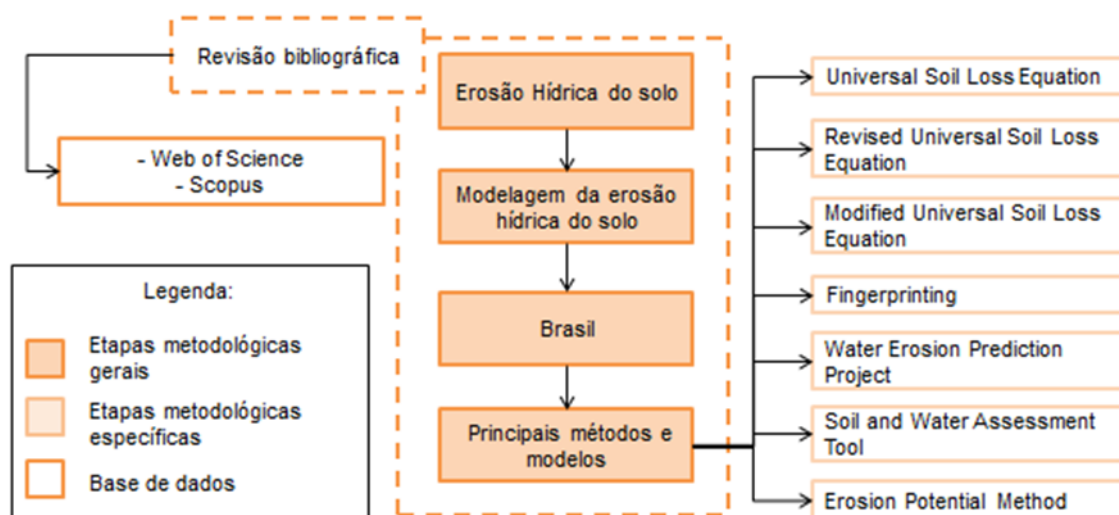


Figura 1. Processos e estrutura da revisão. Fonte: Autores (2023).

Erosão hídrica do solo

A degradação dos solos é um processo que afeta diretamente as terras agrícolas diminuindo a sua produtividade, deteriorando a cobertura vegetal do solo e dos recursos hídricos, além de proporcionar graves problemas relacionados com o meio ambiente. Tanto a erosão hídrica como a eólica são responsáveis por cerca de 56% da degradação dos solos no Mundo (Guerra et al., 2012). Cerca de 33% dos solos agricultáveis do mundo apresentam algum tipo de degradação e o principal motivo é a erosão acelerada (FAO, 2015). Portanto, um solo degradado pode ser considerado como aquele que, por processos naturais e/ou antrópicos tem sua qualidade química, física e biológica reduzida.

O processo de erosão hídrica do solo começa a partir do impacto das gotas de chuva sobre a sua superfície, sendo que, após a desagregação, o escoamento superficial transporta as partículas de solo soltas e as depositam em outros locais (Silva et al., 2019). Vale destacar que, a erosão hídrica constitui uma das principais causas de degradação do solo nas condições brasileiras, ao qual geralmente está associada ao manejo incorreto do solo e ausência de práticas conservacionistas (Ferreira et al., 2010).

O uso de técnicas e práticas de cultivo inadequadas, a alteração das condições hidrológicas, desmatamentos, a marginalização e o abandono das terras são exemplos de práticas que intensificam a erosão hídrica do solo (Soco, 2009).

Os impactos negativos da erosão hídrica do solo são mais graves em regiões semiáridas, por possuírem solos rasos atrelados à constante remoção da sua vegetação nativa (caatinga) para implantação principalmente de pastagens (Freitas et al., 2008; Aguiar et al., 2006), sendo que essas áreas de caatinga têm importantes funções ecológicas como sumidouros de carbono (Silva et al., 2017).

Uma maneira de estimar a erosão hídrica do solo de forma indireta, com baixo investimento e em grandes áreas é a modelagem matemática. As medições diretas englobam períodos longos de análise e investimentos elevados, enquanto a modelagem proporciona resultados em um período curto e custos menores, além de conceder avaliações confiáveis de predições de perdas de solo que contribuem para adoção de técnicas para o controle da erosão (Batista et al., 2017). Desta forma, os programas de política ambiental utilizam de modelagens e mapeamentos em grande escala de erosão do solo como ferramentas acessíveis para combater o processo de degradação do solo (Alewel et al., 2019).

Modelagem da erosão hídrica do solo

De modo geral, os modelos desenvolvidos para estimar a erosão do solo podem ser classificados em três grupos: empíricos, conceituais (ou mistos) e baseados em processos físicos. No Brasil alguns estudos sobre erosão do solo vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, estes envolvem principalmente a quantificação de alguns parâmetros, tais como: a erodibilidade do solo no campo sob chuva natural e o desenvolvimento de nomogramas para solo subtropical (Cassol et al. 2018); a erosividade (Avanzi et al., 2019); o uso e manejo e práticas conservacionistas (Silva et al., 2020). Neste mesmo contexto existem outros que envolvem o

monitoramento do impacto do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacias hidrográficas para identificação de fontes de sedimentos (Miguel et al., 2014; Rodrigues et al., 2018; Valente et al., 2021), efeito de plantas de cobertura na erosão do solo (Beniaich et al., 2020), práticas de manejo e relação com perda de solo, água e nutrientes (Reichert et al., 2019), volume erodido em voçorocas (Cândido et al., 2020), erosão em áreas degradadas (Siqueira Junior et al., 2019), relação posição relevo solo com erosão e propriedades do solo (Almeida et al., 2019), e modelagem hidrossedimentológica em bacias hidrográficas (Mauri et al., 2020; Ebling et al., 2021).

Segundo Nachtigall et al. (2020), para um adequado controle da erosão hídrica do solo é necessário um parâmetro que forneça indicativos mensuráveis para estipular uma taxa de perdas de solo. Pois no Brasil, a erosão hídrica é a forma mais significativa de degradação do solo, com estimativa do volume de solo perdido anualmente na ordem de 500 milhões de toneladas (Bertoni E Lombardi Neto, 2010).

Métodos e modelos para a estimativa da erosão hídrica do solo aplicados no Brasil

Após a filtragem de artigos nas bases de dados (Web of Science e Scopus) foi observado a partir da utilização das palavras-chaves da etapa metodológica geral (erosão hídrica do solo, modelagem da erosão hídrica do solo e Brasil), que a base de dados Scopus possui mais artigos científicos com as palavras mencionadas do que na base de dados da Web of Science, 1.427 e 1.039 artigos, respectivamente (Figura 2). Na etapa específica, foi observado os principais métodos e modelos para a estimativa da erosão hídrica do solo aplicados no Brasil, aos quais são apresentados na Tabela 1.

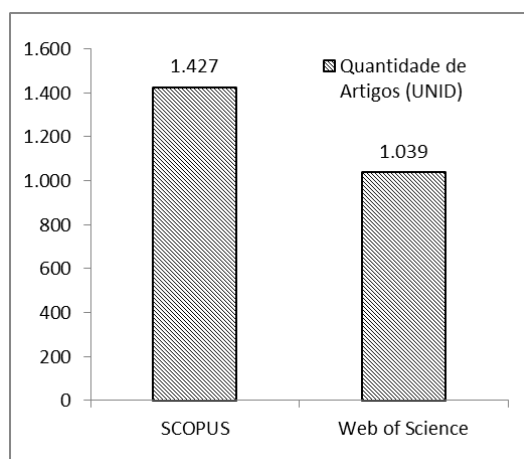


Figura 2. Quantidade de artigos por base de dados conforme filtragem por meio das palavras-chaves da etapa metodologia geral. Fonte: Autores (2023).

Tabela 1. Principais métodos e modelos para a estimativa da erosão hídrica do solo aplicados no Brasil.

Métodos ou Modelos	Sigla	Referências
Universal Soil Loss Equation	USLE	Wischmeier e Smith (1965) e Wischmeier e Smith (1978)
Revised Universal Soil Loss Equation	RUSLE	Renard et al. (1997)
Modified Universal Soil Loss Equation	MUSLE	Willians (1975) e Williams e Berndt (1977)
Fingerprinting	-	Klages e Hsieh (1975), Wall e Wilding (1976) e Walling et al. (1979)
Water Erosion Prediction Project	WEPP	Laflen et al. (1991)
Soil and Water Assessment Tool	SWAT	Ardold et al. (1998); Neitsch et al. (2005)
Erosion Potential Method	EPM	Gavrilovic (1962)

Fonte: Autores (2023).

Destaca-se ainda que, na etapa metodológica específica, foi observado que o modelo USLE é o mais aplicado no Brasil, tanto na base de dados Scopus quanto na Web of Science, conforme é apresentado na Figura 3. Pode-se

observar ainda que o modelo menos utilizado a nível nacional é o MUSLE, onde foi filtrado apenas 7 artigos na base de dados Scopus e 4 na base de dados da Web of Science.

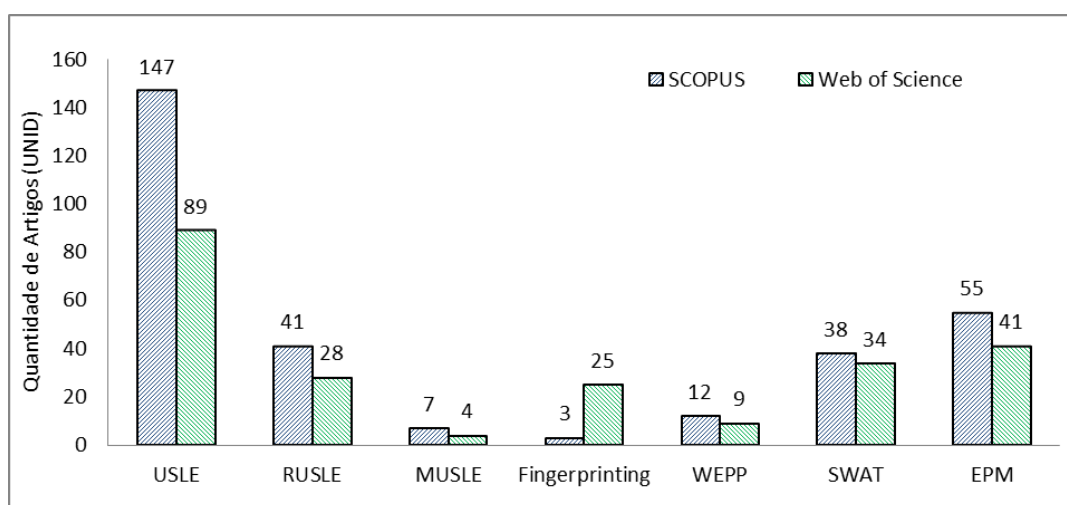


Figura 3. Quantidade de artigos por base de dados conforme filtragem por meio das palavras-chaves (método e modelos) da etapa metodológica específica. Fonte: Autores (2023).

Deste modo seguindo os critérios pré-estabelecidos para a metodologia utilizada este artigo baseou-se na consulta de 106 artigos científicos. Essa pesquisa bibliográfica foi orientada com o objetivo de obter uma visão ampla e aprofundada sobre o tema em estudo, visando à identificação das principais tendências e perspectivas na literatura científica.

Universal Soil Loss Equation (Equação Universal de Perda de Solo) - USLE

O modelo foi desenvolvido por Wischmeier e Smith (1962) e publicado pela primeira vez no Agricultural Research Service (ARS). Esta equação consiste no produto de seis fatores principais, que estima a erosão de solo por unidade de área (Wischmeier e Smith, 1978).

A maior parte das pesquisas que aplicam essa equação para estimar as perdas de solo são executadas em áreas com relevo suave a ondulado e com predomínio de solos profundos (Anache et al., 2017; Durães e Mello, 2016). A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) trata de estimar a erosão de uma determinada área por meio das variáveis de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), fator topográfico (LS), uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P) empregadas.

Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos para estimar a perda de solo com base na USLE no Brasil (e.g., Braz et al., 2014; Volk e Cogo, 2014; Graça et al., 2015; Medeiros et al., 2016; Silva et al., 2017; Schick et al., 2017; Cassol et al., 2018; Avanzi et al., 2019; Weiler et al., 2021; Oliveira et al., 2023; Schwambach, et al., 2024).

Por exemplo, Graça et al. (2015), buscou analisar o comportamento multi-temporal da perda de solo por erosão hídrica superficial na bacia hidrográfica do rio Mourão na região centro-oeste do estado do Paraná (Brasil). A avaliação foi baseada na aplicação da USLE com a integração de dados e estimativas dentro de um Sistema de Informação Geográfica (GIS), onde foi apresentado que a bacia em questão possuía potencial natural para baixa erosão superficial.

Assim como, Weiler et al. (2021) buscaram determinar estratégias metodológicas, com auxílio da USLE, de modo a sugerir o melhor uso do espaço em função de variáveis erosivas, utilizando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, em um estudo de caso da Bacia da Cachoeira Cinco Veados no estado do Rio Grande

do Sul. Com o avanço da tecnologia e aumento da capacidade de processamento de dados a USLE sofreu atualizações e modificações, dando origem ao modelo revisado Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) e modificado Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE).

Revised Universal Soil Loss Equation (Equação Universal de Perda de Solo Revisada) - RUSLE

O modelo RUSLE, versão revisada do modelo USLE, é um modelo paramétrico já testado e validado em diferentes condições (Kumar et al., 2014; Tang et al., 2015; Napoli et al., 2016; Benchettouh et al., 2017; Wei et al., 2018; Toubal et al., 2018; Fayas et al., 2019; Guedes, et al., 2022; Gouveia & Camara, 2024). De acordo com Renard et al. (1997) a RUSLE considera como parâmetros de entrada do modelo as mesmas variáveis da USLE (erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), fator topográfico (LS), uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P) empregada).

Os fatores R, LS, C e P têm mostrado ter influência na magnitude do processo erosivo no Brasil (Didoné et al., 2014; Gaubi et al., 2017; Barros et al., 2018). Apesar da RUSLE ser um modelo empírico, ela apresenta estimativa de uma perda de solo mais precisa, por permitir a aplicação da equação a nível de bacia hidrográfica (Cunha et al., 2017). Considerado um modelo simples, a RUSLE permite estimar a erosão hídrica do solo com base na interação entre os fatores a partir da utilização de ferramentas SIG – Sistemas de Informações Geográficas (Silva et al., 2020). No Brasil, o modelo demonstrou excelente aplicabilidade para as características climáticas do país (Beskow et al., 2009; Mello et al., 2016; Medeiros et al., 2016), principalmente associado a escalas maiores, por meio de SIG (Minella e Merten, 2011; Panagos et al., 2015).

Um exemplo de aplicação do modelo RUSLE, foi no estudo de Zanchin et al. (2021), onde foi estimado os fatores RUSLE na sub-bacia hidrográfica do rio Candiota (CRWsub), localizada no sul do Brasil. O valor médio anual da erosividade foi de 9960,52 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, o que conforme os autores está de acordo com os valores obtidos por outros autores para locais próximos à área deste estudo (Peñalva-Bazzano et al., 2007; Martins et al., 2009).

Modified Universal Soil Loss Equation (Equação Universal de Perda de Solo Modificada) – MUSLE

O modelo MUSLE foi proposto por Williams (1975) e Williams e Berndt (1977), tal modelo se diferencia de USLE e RUSLE no fator R, ou seja, se diferencia no fator de precipitação que foi substituído pelo fator de escoamento superficial direto, substituindo assim, a energia cinética da precipitação pelo efeito da vazão de pico e volume escoado para eventos isolados na produção de sedimentos (Williams, 1975). Williams e Berndt (1977) abordam que, de maneira eficiente, referindo-se ao potencial de perda de solo na saída na bacia hidrográfica para um único evento de chuva, esta alteração prevê a produção de sedimentos.

O modelo de produção de sedimentos MUSLE tem sido aplicado amplamente em todo o mundo, contudo diferentes desempenhos têm sido relatados de seu sucesso em relação aos dados medidos como aborda o estudo de Sadeghi et al. (2014). No Brasil, conforme Paiva et al. (2019), o modelo MUSLE é amplamente utilizado e aplicado em diferentes estudos (Santos et al., 2014; Siqueira; Vanzela, 2018; Mantovani et al., 2018). Avanzi et al. (2008), aplicaram o modelo MUSLE na região dos Tabuleiros Costeiros em Aracruz no estado do Espírito Santo, mais especificadamente, em uma microbacia hidrográfica ocupada por plantações de eucalipto e floresta nativa. Como conclusão, Avanzi et al. (2008) relatam que o modelo MUSLE mostrou-se apropriado para predições das perdas de solo na microbacia estudada, além disso, a utilização da umidade antecedente do solo, embora não incluída no modelo da MUSLE, teve sua influência confirmada nos resultados encontrado pelos autores, ao qual sugeriram que em estudos futuros sua utilização deveria ser considerada.

Santana et al. (2021), aplicaram o modelo MUSLE para estimar a perda de solo em eventos de chuva durante o período de um ano em áreas de cultivo de café localizadas na Serra da Mantiqueira no Sul do estado de Minas Gerais. As maiores perdas de solos estimadas pelo modelo para a área de estudo se deram em locais que possuíam solos expostos, áreas de eucaliptos que não possuíam práticas conservacionistas, nas encostas mais altas e em Cambissolos Háplicos. Os autores concluíram que, as práticas de manejo conservacionista adotadas nas lavouras cafezeiras contribuíram para a redução das perdas de solo e manutenção das condições edáficas.

Método fingerprinting

O método fingerprinting para identificação de fontes de produção de sedimentos começou a ser desenvolvido na década de 1970 através dos trabalhos de Klages e Hsieh (1975), Wall e Wilding (1976) e Walling et al. (1979), sendo que, tanto a absorção quanto o escopo dos sedimentos nos estudos de identificação de fontes aumentaram ao longo do tempo (Collins et al., 2017). De acordo com Miguel et al., (2014), no início os estudos buscavam a obtenção de traçadores através dos estudos de propriedades eletromagnéticas presentes nos sedimentos e de caráter qualitativo.

Uma abordagem mais direta, utilizada para investigar fontes de sedimentos surgiu de fato com o trabalho realizado por Collins e Walling (2002), o método fingerprinting, (Collins e Walling, 2002; Walling, 2013; Krishnappan, et al. 2009; Owens, et al. 2016). Sendo um modelo para identificação de fontes de produção de sedimentos, com um maior número de variáveis, utilizando características de solo e sedimentos, utilizando em grande escala parâmetros mineralógicos, magnéticos, geoquímicos, orgânicos, radiométricos isotópicos e físicos, os traçadores geoquímicos por sua vez, são utilizados pela facilidade de determinação entre a fonte de produção de sedimentos e a variabilidade (Walling e Collins, 2000).

A busca por aperfeiçoamento de modelos de predição de sedimentos baseia-se na avaliação da perda de solo e a produção de sedimentos, pois a adoção desses experimentos em pequenas parcelas de campo, em condições de chuva natural e/ou simulada, não repete em plenitude as condições ambientais, que ocorrem em pequenas bacias hidrográficas (Didoné et al., 2015). Além de estudos de modelagem e monitoramento, a técnica de identificação fontes de produção de sedimentos mostrou ser uma ferramenta poderosa para identificar fontes de sedimentos no Brasil (Minella, et al., 2008; Minella, et al., 2009; Miguel, et al., 2014; Tiecher, et al., 2014; Tiecher, et al., 2017).

Apesar de a maioria dos estudos que utilizam este método, principalmente aqueles fora do Brasil, serem aplicados em bacias hidrográficas de grandes extensões, Minella et al. (2009), realizaram um estudo em bacia hidrográfica de pequena extensão localizada no sul do Brasil. Através do método fingerprinting, os autores avaliaram como fontes de produção de sedimentos, estradas não pavimentadas e lavouras, tendo resultados satisfatórios, onde 64% da produção de sedimentos se concentrava em áreas de lavouras e apresentava uma variação temporal na produção

através do tipo de cobertura vegetal da bacia, enquanto 36% era oriundo das estradas, nas quais, os períodos de manutenção das mesmas evidenciaram uma variação da produção dessa fonte.

A utilização de variáveis geoquímicas, podendo-se definir como uma abordagem mais clássica do método, é o principal ponto de partida da maioria dos estudos voltados para identificação de fontes de produção de sedimentos utilizando o método fingerprinting. No entanto, os principais esforços encontrados nos trabalhos dos últimos anos na utilização deste método, tem como avanço a modelagem de um conjunto maior de variáveis e assim tentando identificar novos traçadores como por exemplo, variáveis radiométricas, mineralógicas, magnéticas e aquelas oriundas do carbono orgânico do solo.

Uma propriedade ou elemento considerado bom traçador da erosão do solo é aquele que possui características conservativas, ou seja, que seja estável no ambiente. Por este fato que o carbono orgânico do solo é reconhecidamente um bom traçador da erosão do solo. Um trabalho realizado por Galoski et al. (2019), buscou avaliar se era possível rastrear a origem dos sedimentos em suspensão, produzidos em uma bacia hidrográfica do Saci, no município de Rio Negrinho, estado do Paraná, no Sul do Brasil, utilizando a cromatografia gasosa para determinar cadeias de n-alcanos utilizando o espectro de C_{15} - C_{35} para a avaliação. Os autores elencaram áreas de importância dentro da área, as quais poderiam ser áreas em potenciais para produção de sedimentos. Locais com revegetação de *Pinus taeda*, floresta nativa, estradas não pavimentadas e canais fluviais. Segundo os resultados do trabalho é possível avaliar distribuição de n-alcanos no solo e sedimentos e ainda, através desta técnica é possível identificar a origem dos materiais orgânicos.

A mineralogia do solo pode ser considerada estável e, portanto, algumas variáveis mineralógicas podem ser usadas em modelos de predição da erosão do solo. Miguel et al (2014) caracterizaram quantitativamente a mineralogia dos sedimentos em suspensão e dos solos das fontes de produção de sedimentos, em uma bacia hidrográfica de encosta na região Sul do Brasil, com a finalidade de encontrar variáveis com capacidade de identificar a origem dos sedimentos na área em questão. Os autores determinaram, perda de massa dos minerais 2:1, perda de massa da caulinita, % de caulinita, % de minerais 2:1, temperatura do pico da reação da caulinita,

temperatura do pico da reação de minerais 2:1, perda de massa das amostras após tratamento com Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB), relação $Gt/(Gt+Hm)$, substituição isomórfica na hematita e na goethita, % de Fe na hematita (FeHm), % de Fe na goethita (FeGt), % de hematita e % de goethita. Após isso adicionaram esses dados aqueles da geoquímica total. Como resultado foi possível identificar que a adição das variáveis mineralógicas ao modelo de predição de fontes de produção de sedimento aumentou a acurácia das estimativas. As variáveis mineralógicas, % de caulinita e % de goethita, apresentaram capacidade discriminante e puderam ser usadas como traçadores na identificação das fontes de produção de sedimentos.

A obtenção de parâmetros, como alguns já citados anteriormente, variáveis geoquímicas, mineralógicas, magnéticas, orgânicas, em estudos de fingerprinting é geralmente onerosa e demorada. Isso se deve ao fato de que variáveis com potencial de identificar impressões digitais são substancialmente específicas do local.

Em busca de uma alternativa rápida, economicamente viável, não destrutiva e simples, que Tiecher et al. (2015) propuseram a utilização de técnicas de espectroscopia de reflectância difusa para rastrear a origem dos sedimentos. O trabalho dos autores demonstra a primeira tentativa de combinar traçadores geoquímicos e parâmetros de cor derivados do espectro visível (VIS) em uma única estimativa da contribuição da fonte de sedimentos. Baseado nos resultados dos erros de predição dos modelos gerados, ou seja, das combinações realizadas, foi possível afirmar que, quando combinados parâmetros de cores baseados em VIS com traçadores geoquímicos, ocorre uma melhora significativa na discriminação das fontes e a precisão da distribuição das fontes de sedimentos. Além disso, o procedimento se torna mais rápido e de menor custo.

A técnica da espectroscopia de reflectância difusa é usada atualmente como alternativa para quantificar variáveis físicas e químicas para análise de fontes de produção de sedimentos. O principal objetivo é testar diferentes modelos matemáticos, através de combinações, com a finalidade de melhorar a acurácia dos modelos de predição de identificação de fontes. Para avançar dentro desta linha que Tiecher et al. (2021) compararam os resultados de diferentes modelos matemáticos multivariados (paramétricos e não paramétricos) e técnicas de pré-processamento de reflectância em bandas espectrais do ultravioleta-visível (UV-Vis),

infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR) usadas em combinação ou isoladamente para prever a contribuição de fontes de sedimentos na escala de bacia hidrográfica.

Os modelos foram calibrados e validados com as misturas artificiais, tiveram como resultado, boa precisão, no entanto, se manteve os mesmos erros de modelos já testados quando os resultados das contribuições das fontes são comparados com aqueles obtidos com a técnica convencional de impressão digital de sedimentos baseada em traçadores geoquímicos. Os autores constataram que, como resultado final as contribuições das fontes pelas abordagens espectroscópica e geoquímica foi muito semelhante. Isso indica que a espectroscopia pode ser uma técnica rápida, barata, precisa e uma alternativa à abordagem geoquímica convencional para discriminar contribuições de fontes de sedimentos em bacias agrícolas localizadas em regiões subtropicais.

Araujo et al (2024), utilizou traçadores geoquímicos, carbono orgânico total e traçadores de coeficiente de cor no espectro visível, aplicando o modelo de mistura FingerPro (v1.1; Lizaga, 2018) para analisar o solo da área contribuinte e os sedimentos. Os autores utilizaram três fontes primárias de sedimentos foram identificadas: culturas anuais, forragem perene (pastagens) e calhas (canais de rios), na bacia hidrográfica do arroio Epaminondas, no sul do Rio Grande do sul, no município de Pelotas. Neste estudo os autores obtiveram 37 traçadores: 22 elementos geoquímicos, 14 coeficientes de cor e carbono orgânico total. A área de estudo foi subdividida em 3 áreas e notavelmente, os conjuntos de traçadores variaram ao longo da bacia, para cada subárea os resultados indicaram heterogeneidade nas propriedades do solo. Destacando assim a importância da combinação de amostras ao longo de toda a bacia hidrográfica para compreender a dinâmica dos sedimentos.

Water Erosion Prediction Project (Projeto de previsão de erosão hídrica) – WEPP

Desenvolvido a partir de um esforço multidisciplinar, ao qual envolveu diversos engenheiros e cientistas de várias agências e universidades americanas, o modelo WEPP caracteriza-se por ser um modelo dinâmico com base nos princípios físicos do processo erosivo, onde a estimativa de perda de solo gerada por este modelo é em função do estado atual do solo, da cobertura vegetal e da umidade antecedente (Laflen, et al. 1991; Lane et al., 1992).

Laflen et al. (1991) e Lane et al. (1992), destacam ainda que o modelo WEPP caracteriza-se principalmente pela capacidade de parametrização detalhada dos dados de entrada, ou seja, maior número de variáveis. Outro ponto importante de ressaltar é que a implementação do WEPP se dá por meio de três versões básicas diferentes, que são: vertente/encosta, bacia hidrográfica e malha/grade (Angulo Filho et al., 1992).

De acordo com Angulo Filho et al. (1992), por se tratar de um modelo semideterminístico, consegue-se aplicar o WEPP em diferentes condições (lugares), como por exemplo, aplicá-lo às condições brasileiras, contudo, deve-se se atentar para que os arquivos de entrada de dados sofram adaptações e modificações para que reflitam as condições da região a se analisar.

No Brasil, o modelo WEPP já foi aplicado por diversos estudos (Sparovek et al., 2000; Amorim et al., 2010; Barbosa et al., 2019; Sampaio e Blanco, 2020), dentre eles, Anache et al. (2018) que aplicou o WEPP no bioma Cerrado, no qual calibrou o modelo para diferentes usos do solo em condições subtropicais no intuito de prever o escoamento e a erosão do solo para esses diferentes usos da terra. Como conclusão, Anache et al. (2018) inferiram que o modelo WEPP é adequado para ser usado em condições subtropicais.

Outro exemplo de aplicação do modelo WEPP no Brasil foi feito por Piscoya et al. (2020), em um experimento na microbacia do Córrego do Exu, em Serra Talhada, semi-árido do estado de Pernambuco com o intuito de estimar a erosão em riachos e determinar as propriedades físicas e hidráulicas do solo. Como considerações finais, os autores afirmaram que o modelo WEPP provou-se ser preciso na previsão de erosão, o que pode ser crucial para o desenvolvimento de novas abordagens.

Soil and Water Assessment Tool (Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água) – SWAT

O SWAT é um modelo em escala de bacia hidrográfica desenvolvida por Jeff Arnold, o modelo tem como objetivo quantificar impactos de longo prazo do manejo e da época das práticas agrícolas em bacias hidrográficas grandes e complexas. O SWAT opera com dados em tempo diário e é utilizado para simular em escala de bacia o ciclo de água e nutrientes e avaliação da eficiência ambiental das melhores práticas de gestão (Neitsch et al., 2009).

O modelo SWAT é amplamente aplicada em território brasileiro para diversos estudos (Lelis e

Calijuri, 2010; Aragão et al., 2013; Medeiros e Silva, 2014; Dantas et al., 2015; Lima et al., 2021; Farias et al., 2023). Dentre outros, podemos citar Blainski et al. (2017) que conduziram um estudo com o objetivo de avaliar a eficácia do modelo SWAT para representação do fluxo hidrossedimentológico em uma bacia hidrográfica catarinense a partir dos procedimentos usuais de calibração e validação, onde comparou-se os dados de vazão e sólidos transportados medidos e simulados na seção de controle, e ao final do estudo os autores concluíram que o SWAT pode ser utilizado para estas simulações, desde que passe por algumas calibrações.

Entretanto, quando o modelo é aplicado a microbacias hidrológicas seu despenho se torna insatisfatório, conforme o estudo realizado por Neto et al. (2014), onde avaliaram o desempenho do modelo SWAT na estimativa do escoamento em duas bacias hidrográficas com escalas espaciais distintas (meso e microbacia), apresentando desempenho satisfatório para o escoamento da mesobacia e deficiente na simulação do escoamento na microbacia por apresentar grandes diferenças entre os dados simulados e observados.

Erosion Potential Method (Método de Erosão Potencial) - EPM

O Método de Erosão Potencial (EPM) foi desenvolvido por Slobodan Gavrilovic, em 1960, com base em pesquisas de campo de erosão na área de captação do rio Morava na Sérvia e no Método Quantitative Classification of Erosion (MQCE). Através do método EPM pode-se calcular vários processos de erosão, como erosão superficial, erosão descendente ou erosão lateral em escala de bacias hidrográficas a partir de fatores que influem diretamente na erosão, como por exemplo, a declividade do terreno, resistência do solo, erosão em campo, uso e manejo do solo, temperatura e precipitação (Dragicevic et al., 2016).

O modelo foi desenvolvido primeiramente para aplicação em regiões de clima temperado, como na Europa e Oriente Médio, com o passar dos anos foi adaptado conceitualmente por ser utilizado em regiões de clima tropical (Tavares et al., 2019). O modelo é amplamente utilizado devido estar baseado em valores tabelados e necessita de poucos dados de entrada, facilitando assim sua aplicação na estimativa de perda de solo (Ebrahimzadeh et al., 2018). No Brasil se tem vários estudos utilizando o modelo EPM (Tavares et al., 2019; Lense et al., 2020; Sakuno et al., 2020; Frascareli et al., 2023).

Pinto et al. (2020), utilizou o Método da Erosão Potencial para estimar as taxas de perdas de solo por erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica do sul do Estado de Minas Gerais, onde ao final do estudo os autores concluíram que o método EPM é uma alternativa eficaz, simples e de baixo custo para identificar áreas que possuem maiores taxas de erosão do solo e assim prioritárias para ações de mitigação dos impactos ambientais, e consequentemente, através dos dados desenvolver ações de manutenção da capacidade produtiva dos solos e prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos.

Já Lense et al. (2021), conduziram estudos para estimar as perdas de carbono por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica com alta diversidade de uso da terra através do modelo EPM, e concluíram que o método é econômico e relativamente rápido, além de necessitar poucos dados de entradas para estimar a perda de carbono orgânico do solo por erosão hídrica e permitir a determinação das áreas que mais necessitam de intervenção.

Comparação de métodos e modelos para a estimativa da erosão hídrica do solo aplicados no Brasil

Os métodos de estimativa da erosão hídrica variam amplamente em termos de abordagem, complexidade e escala de aplicação. A escolha do método mais adequado depende dos objetivos do estudo, da escala de aplicação e da disponibilidade de dados. Modelos empíricos são mais acessíveis e amplamente aplicáveis, baseado em dados observados e estatística. Modelos semiempírico combina dados empíricos com processos simplificados. E baseado em processos físicos que simula processos de erosão e transporte de sedimento, oferecem maior precisão, mas exigem calibração detalhada e um volume significativo de informações. A Tabela 2 sintetiza as principais diferenças entre esses métodos, destacando suas vantagens e limitações.

Desafios e perspectivas futuras para a modelagem da erosão hídrica no Brasil

Apesar dos avanços nos métodos de estimativa de perdas de solo por erosão hídrica, diversos desafios persistem especialmente em um cenário de mudanças climáticas e intensificação das atividades antrópicas. Além disso, novas oportunidades surgem com o desenvolvimento de

tecnologias emergentes, que podem aprimorar a precisão, a escalabilidade e a aplicabilidade dos modelos.

Atualmente, muitos modelos dependem de parâmetros específicos que frequentemente não estão disponíveis em alta resolução para todas as regiões. Além disso, a carência de estações pluviométricas e dados pedológicos consistentes, por exemplo, limitam a validação dos modelos desenvolvidos para escalas locais.

Outro desafio para a modelagem da erosão do solo se dá pelas mudanças no uso e cobertura do solo, pois são variáveis e nem sempre são incorporadas adequadamente nos modelos tradicionais. Além disso, os modelos atuais muitas vezes não consideram adequadamente os extremos climáticos, que devem se tornar mais frequentes com as mudanças climáticas.

Porém, o aumento da disponibilização dos dados abertos nos últimos anos vem favorecendo o desenvolvimento de novos estudos. Esse fenômeno se estende a todas as áreas do conhecimento (Araújo et al., 2023). A União Europeia e os Estados Unidos têm liderado o lançamento de iniciativas de Dados Abertos do Governo (OGD) (Gao et al., 2021). Além disso, conforme observado por Saxena (2017), houve um aumento recente nos esforços de divulgação de dados em outras partes do mundo, contribuindo para uma crescente evolução da pesquisa.

Pode-se destacar também que, o desenvolvimento tecnológico está reduzindo a interação humana nos processos. Isso leva à expansão da rede mundial de computadores e à percepção do conhecimento como um elemento de produção (Araújo et al., 2023). Um exemplo disso é a inteligência artificial (IA), que pode oferecer diversos benefícios, desde a redução de custos de processamento até as emergentes ferramentas de deep learning (Sichman, 2021).

Na modelagem da erosão do solo não é diferente, técnicas de Aprendizado de Máquina (AM), como redes neurais artificiais (RNA) e algoritmos de

random forest (RF), podem melhorar a previsão de erosão ao processar grandes volumes de dados heterogêneos. Além disso, modelos híbridos, que combinam equações físicas com AM, podem aumentar a precisão em regiões com dados escassos. Nesse sentido, alguns autores têm utilizado as técnicas de AM para realizar a estimativa dos valores de erosividade, considerando o uso dessa técnica viável e eficiente (Moreira et al., 2009; Silva et al., 2010; Sobrinho et al., 2011).

Conclusão

Conclui-se que através deste trabalho foi possível realizar uma revisão sistemática da literatura, identificando os principais métodos e modelos aplicados no Brasil no que compete a perda de solo devido à erosão hídrica. A análise realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science evidenciou a ampla utilização de modelos como o Universal Soil Loss Equation (USLE), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), Fingerprinting, Water Erosion Prediction Project (WEPP), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e Erosion Potential Method (EPM).

Dentre estes, destaca-se o USLE como o modelo mais aplicado em território nacional, confirmando a tendência do uso de ferramentas matemáticas eficazes e acessíveis para a estimativa de perdas de solo. Esses modelos desempenham um papel fundamental ao fornecer suporte técnico para o planejamento de práticas conservacionistas, o manejo sustentável do solo e a ocupação adequada das bacias hidrográficas. Além disso, contribuem para a tomada de decisão frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela intensificação das atividades antrópicas, reforçando a importância da modelagem como instrumento estratégico para a gestão dos recursos naturais no Brasil.

Tabela 2. Comparação de métodos e modelos para a estimativa da erosão hídrica do solo aplicados no Brasil.

Métodos ou Modelos	Classificação	Características	Vantagens	Limitações
USLE	Empírico	Estima a perda média anual de solo	Fácil implementação; requer dados básicos; amplamente validado para diferentes condições agrícolas	Não prevê eventos isolados; não considera processos hidrológicos dinâmicos
RUSLE	Empírico	Atualização da USLE com melhorias nos fatores	Melhora a acurácia em diferentes cenários; permite ajustes conforme práticas de manejo e tipos de solo	Baseado em médias anuais; limitada capacidade de resposta a eventos extremos
MUSLE	Semiempírico	Adapta a USLE para estimativa de sedimento em eventos individuais	Adequado para modelagem de eventos de chuva intensos; incorpora variáveis hidrológicas como volume de escoamento	Exige informações de chuva e vazão em alta resolução; menos indicado para simulações de longo prazo
Fingerprinting	Experimental/ Empírico	Técnica que identifica fontes de sedimento usando traçadores naturais	Permite quantificar contribuições específicas de diferentes fontes de sedimentos; suporte direto à gestão conservacionista	Requer coleta intensiva e caracterização detalhada das fontes
WEPP	Baseado em processos físicos	Simulação física da erosão e deposição de solo ao longo do tempo	Representa processos erosivos em nível de detalhe físico real; fornece saídas espaciais e temporais contínuas	Alto custo computacional; elevado número de parâmetros e dados de entrada
SWAT	Semiempírico	Modelo hidrológico que simula erosão, transporte de sedimento e qualidade da água	Integra hidrologia, manejo agrícola e qualidade da água; útil para planejamento de conservação em larga escala	Complexidade elevada; demanda de calibração e validação
EPM	Empírico	Método baseado em fatores simples	Procedimento rápido e prático; eficiente em áreas montanhosas	Resultados menos precisos fora das condições para as quais foi desenvolvido

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Código de Finanças 001, pela bolsa concedida ao primeiro, segundo, terceiro e quarto autor.

Referências

- Aguiar, M.I., Maia, S.M.F., Oliveira, T.S., Mendonça, E.S., Araújo Filho, J.A., 2006. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. *Revista Ciência Agronômica* 37, 270-278. ISSN 0045-6888.
- Alewel, C., Borelli, P., Meusburger, K., Panagos, P., 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research* 7, 203-225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>.
- Almeida, M.C., Araújo, J.K.S., Ribeiro Filho, M.R., Souza Júnior, V.S., 2019. Relief position and soil properties under continuous banana cropping in subhumid climate in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 43, 1-16. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20180207>
- Amorim, R.S.S., Silva, D.D., Pruski, F.F., Matos, A.T., 2010. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE E WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. *Engenharia Agrícola* 30, 1046-1049. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600006>
- Anache, J.A.A., Wendland, E.C., Oliveira, P.T.S., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., 2017. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena* 152, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>
- Anache, J.A., Flanagan, D.C., Srivastava, A., Wendland, E.C., 2018. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment* 622-623, 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.257>
- Angulo Filho, R., Elliot, W.J., Dechen, S.C.F., Lombardi Neto, F., 1992. Utilização do modelo "WEPP" para simulação de erosão no Brasil – Estudo preliminar. (Relatório Técnico, 3). Piracicaba: ESALQ, SP, 3, 65-79.
- Aragão, R., Cruz, M.A.S., Amorim, J.R.A., Mendonça, L.C., Figueiredo, E.E., Srinivasan, V.S., 2013. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 1091-1102. <https://doi.org/10.1590/S010006832013000400026>
- Araújo, M.M.F., Guzmán, G., Gómez, J.A., Koiter, A., Nachtigall, S., e Miguel, P.: Sediment Source
- Araujo, M. M. F., Santos, G. B., Oliveira, M., Klitzke, K., Nachtigall, S. D., Miguel, P., Tumpf, L.

- Identification in a Southern Brazilian Watershed: Utilizing Geochemical Properties and Spectral Signatures with Mixing Models, EGU General Assembly 2024, Viena, Áustria, 14–19 de abril de 2024, EGU24-16690, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-16690>, 2024.
- Araújo, R.C.C., Farina, R.M., Florian, F., 2023. The role of information technology in business management. *RECIMA21* 4, 1-14. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i6.3463>.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.17521688.1998.tb05961.x>
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D., 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena* 118, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.008>
- Avanzi, J.C., Silval, M.L.N., Curil, N., Mello, C.R., Fonseca, S., 2008. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 563–569. <https://doi.org/10.1590/S14154366200800060001>
- Avanzi, J.C., Viola, M.R., Mello, C.R., Biongo, M.V., Pontes, L.M., 2019. Modeling of the rainfall and R-factor for Tocantins State, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 43, 1-14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20190047>
- Ayer, J.E.B., Olivetti, D., Mincato, R.L., Silva, M.L.N., 2015. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 45, 180-191. <https://doi.org/10.1590/198340632015v45i1197>
- Barbosa, R.S., Marques Júnior, J., Barrón, V., Martins Filho, M.V., Siqueira D.S., Peluco, R.G., Camargo, L.A., Silva, L.S., 2019. Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state. *Brazil Environ Earth Sci* 78, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8015-0>
- Barros, E.N.S., Viola, M.R., Rodrigues, J.A.M., Mello, C.R., Avanzi, J.C., Giongo, M., 2018. Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 13, 1-9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5509>
- Batista, P.V.G., Silva, M.L.N., Silva, B.P.C., Curi, N., Bueno, I.T., Júnior, F.W.A., Davies, J., Quinton, J., 2017. Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin-Brazil. *Catena* 157, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.025>
- Benchettouth, A., Kouri, A., Jebari, S., 2017. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 10, 1-16. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96190>
- Beniaich, A., Silva, M.L.N., Guimarães, D.V., Bispo, D.F.A., Avanzi, J.C., Curi, N., Pio, R., Dondeyne, S., 2020. Assessment of soil erosion in olive orchards (*Olea europaea* L.) under cover crops management systems in the tropical region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44, 1-22. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190088>
- Bennett, H.H., Chapline, W.R., 1928. Soil erosion: a national menace. United States Department of Agriculture (USDA), Circular nº 33. Disponível em: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT87212611/PDF>. Acesso em: 05 jul. 2022.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F., 2010. Conservação do solo. São Paulo: Ícone. 360 p.
- Beskow, S., Mello, C.R., Norton, L.D., Curi, N., Viola, M.R., Avanzi, J.C., 2009. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena* 79, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>
- Blainski, É., Acosta, E., Nogueira, P.C.P., 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. *Revista Ambiente & Água* 12, 226-237. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951>
- Borrelli, P., et al., 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment* 780, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P., 2017a. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed

- modelling approach. *Land Degradation Development* 28, 335-344. <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., Panagos, P., 2017b. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* 8, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Braz, A.M., Santos, K.P.M.G., Julio, V.A., 2014. Uso do geoprocessamento para avaliação da susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do Córrego Ypê-Ilha Solteira/SP. *Fórum Ambiental da Alta Paulista* 10, 90-102. <https://doi.org/10.17271/198008271022014863>
- Cândido, B.M., James, M., Quinton, J., Lima, W., Silva, M.L.N., 2020. Sediment source and volume of soil erosion in a gully system using UAV photogrammetry. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44, 1-14. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200076>
- Cassol, E.A., Silva, T.S.P., Eltz, F.L.F., Levien, R., 2018. Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, 1-12. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170262>
- Collins, A.L., Pulley, S., Foster, I.D.L., Gellis, A., Porto, P., Horowitz, A.J., 2017. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: a review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. *Journal of Environmental Management* 194, 86-108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
- Collins, A.L., Walling, D.E., 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology* 261, 218-244. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2)
- Cunha, A.M., Feitoza, H.N., Feitoza, L.R., Oliveira, F.S., Lani, J.L., Cardoso, J.K.F., Trindade, F.S., 2016. Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no geobases para uso dos dados em SIG. *Geografares* 2, 32-65. <https://doi.org/10.47456/geo.v2i22.30205>
- Cunha, E.R., Bacani, V.M., Panachuki, E., 2017. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS in a watershed occupied by rural settlement in the Brazilian cerrado. *Natural Hazards*, 85, 851-868. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2607-3>
- Dantas, J.C., Silva, M.A., Silva, R.M., Vianna, P.C.G., 2015. Simulação vazão erosão usando o modelo swat para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências* 34, 816-827.
- Dechen, S.C.F., Telles, T.S., Guimarães, M.F., De Maria, I. C., 2015. Losses and costs associated with water erosion according to soil cover rate. *Bragantia*. 74, 224-233. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0363>.
- Didoné, E.J., Minella, J.P.G., Reichert, J.M., Merten, G.H., Dalbianco, L., Barros, C.A.P., Ramon, R., 2014. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments* 14, 1287-1297. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0844-6>
- Didoné, E., Minella, J.P.G., Merten, G., 2015. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in Southern Brazil and implications for land conservation. *Journal Soil Sediment* 15, 2334-2346. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1160-0>
- Dragicevic, N., Karleusa, B., Ozanic, N., 2016. A review of the Gavrilovic method (Erosion Potential Method) application. *Gradevinar* 9, 715-725. <https://doi.org/10.14256/JCE.1602.2016>
- Durães, M.F., Mello, C.R., 2016. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 21, 677-685. <https://doi.org/10.1590/S141341522016121182>
- Ebling, E.D., Reichert, J.M., Peláez, J.J.Z., Rodrigues, M.F., Valente, M.L., Cavalcante, R.B.L., Reggiani, P., Srinivasan, R., 2021. Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian Pampa biome. *International Soil and Water Conservation Research* 9, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.008>
- Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., Harijani, F.M., 2018. An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. *Environmental Earth Sciences* 77, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7635-8>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. – Status of the World's Soil Resources: Main Report. Roma:

- Intergovernmental Technical Panel on Soils – ITPS, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022.
- Farias, JR, Costa, GAR, & Silva, RT (2023). Técnica de mapeamento para modelagem da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil, utilizando o SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16 (1), 1-15.
- Fayas, C.M., Abeysingha, N.S., Nirmanee, K.G.S., Samarasingha, D., Mallawatantri, A., 2019. Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in KELANI river basin in Sri Lanka. *International Soil and Water Conservation Research* 7, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>
- Ferreira, A.O., Gonzatto, R., Miola, A., Eltz, F.L.F., Amado, T.J.C., 2010. Influência da declividade e de níveis de cobertura do solo no processo de erosão com chuva simulada. *Revista Verde* 5, 182-190.
- Frascareli, D., Bochichi, D. da C., Martins, A. C. G., & Rabelo, D. R. (2023). Utilização das geotecnologias para avaliação do potencial de erosão do solo na bacia hidrográfica do Rio Pirajibu-mirim, São Paulo, Brasil. *Pesquisas Em Geociências*, 50(1), e129338. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.129338>
- Freitas, F.J., Cantalice, J.R.B., Bezerra, S.A., Silva, M.D.R.O., Santos, P.M., Correa, R.M., Lima, P.A., Figueira, S.B., 2008. Erosão em entressulcos sob Caatinga e cultura agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 1743-1751.
- Galoski, C.E., Martínez, A.E.J., Schultz, G.B., Santos, I. dos, Froehner, S., 2019. Use of n-alkanes to trace erosion and mais sources of sediments in a watersheds in Southern Brazil. *Science of the Environment*, 682, 447- 456. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.209>
- Ganasri, B.P., Ramesh, H., 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers* 7, 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- Gao, Y., Janssen, M., Zhang, C., 2021. Understanding the evolution of open government data research: towards open data sustainability and smartness. *International Review of Administrative Sciences*, 86, 1–17. <https://doi.org/10.1177/00208523211009955>.
- Gaubi, I., Chaabani, A., Ben Mammou, A., Hamza, M.H., 2017. A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Natural Hazards* 86, 219-239. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2684-3>
- Gavrilovic, S., 1962. A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. *Bulletin of the Faculty of Forestry* 26, 151-168. <https://doi.org/10.1590/14137054202044031419>
- Gouveia, R. G. L., & Câmara, L. R. A. (2024). Avaliação da erosão natural e real do solo da bacia hidrográfica Rio Uberabinha - MG utilizando RUSLE. *Revista Caderno Pedagógico*, 21(1), 181. <https://doi.org/10.54033/cadped.v21.n1-181>
- Graça, C.H., Passig, F.H., Kelnar, A.R., Piza, M.A., Carvalho, K.Q., Arantes, E.J., 2015. Multitemporal analysis of estimated soil loss for the river Mourão watershed, Paraná-Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 75, 120-130. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.00613suppl>
- Guedes, FC, Viegas, JA, & Aguiar, MCP (2022). Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) na Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego Carneirinhos, cidade de João Monlevade – MG. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 11 (7), e40411730094. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30094>
- Guerra, A.J.T., Silva, A.S., Botelho, R.G.M., 2012. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicação. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 339 p.
- Klages, M.G., Hsieh, Y.P., 1975. Suspended solids carried by the Galatin River of Southwestern Montana: II. Using mineralogy for inferring sources. *Journal of Environmental Quality* 4, 68–73. <https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400010016x>
- Krishnappan, B.G., Chambers, P.A., Benoy, G., Culp, J., 2009. Sediment source identification: a review and a case study in some Canadian streams. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36, 1622–1633. <https://doi.org/10.1139/L09-110>
- Kumar, A., Devi, M., Deshmukh, B., 2014. Integrated remote sensing and geographic information system based RUSLE modelling for estimation of soil loss in western Himalaya, India. *Water Resources Management* 28, 3307-3317. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0680-5>
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., Bernoux, M., 2015. Soil erosion in the humid

- tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 203, 127-139, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>
- Laflen, J.M., Lane, L.J., Foster, G.R., 1991. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation* 46, 34-38.
- Lane, L.J., Renard K.G., Foster, G.R., Laflen, J.M., 1992. Development and application of modern soil erosion prediction technology. *Australian Journal of Soil Research* 30, 893-912. <https://doi.org/10.1071/SR9920893>
- Lelis, T.A., Calijuri, M.L., 2010. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 5, 158-174. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Lense, G.H.E., Moreira, R.S., Parreiras, T.C., Avanzi, J.C., Mincato, R.L., 2021. Modeling of soil organic carbon loss by water erosion on a tropical watershed. *Revista Ciência Agronômica* 52, 1-8. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210011>
- Lense, G.H.E., Moreira, R.S., Parreiras, T.C., Santana, D.B., Bolelli, T.M., Mincato, R. L., 2020. Modelagem da erosão hídrica pelo Método de Erosão Potencial e pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada: uma análise comparativa. *Revista Ambiente & Água* 15, 1-11. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p555>
- Lima, P.L.T., Silva, M.L.N., Quinton, J.N., Armstrong, A., Inda, A.V., Batista, P.V.G., Poggere, G.C., Curi, N., 2020. Tracing the origin of reservoir sediments using magnetic properties in Southeastern Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 41, 847-864. <https://doi.org/10.5433/16790359.2020v41n3p847>
- Lima, JS, Nunes, DD, & Checchia, TE (2021). Aplicação do modelo SWAT como ferramenta para análises hidrossedimentológicas na bacia hidrográfica do Rio Mutum Paraná – Rondônia. *Geosul*, 36 (434-453), 1-20. <https://doi.org/10.5007/21775230.2021.e66199>
- Madenoglu, S., Atalay F., Erpul G., 2020. Uncertainty assessment of soil erodibility by direct sequential Gaussian simulation (DSIM) in semiarid land uses. *Soil and Tillage Research* 204, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104731>
- Mantovani, V.A., Amorim, J.S., Rodrigues, A.F., Junqueira, R., Carvalho, R.N., Oliveira, A.S., 2018. Estimativa da taxa de entrega de sedimentos e áreas suscetíveis à erosão em uma bacia hidrográfica no sul de Minas Gerais. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde* 16, 1-10. <https://doi.org/10.5892/ruvrd.v16i2.5061>
- Martins, D., Cassol, E.A., Eltz, F.L.F., Bueno, A.C., 2009. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Hulha Negra, Rio Grande do Sul, Brasil, com base no período de 1956 a 1984. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha* 15, 29-38.
- Mauri, E.N.E., Viola, M.R., Norton, L.D., Owens, P.R., Mello, C.R., Pinto, L.C., Curi, N., 2020. Hydrosedimentological modeling in a headwater basin in Southeast Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, 1-20. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200047>
- Medeiros, G.O.R., Giarolla, A., Sampaio, G., Marinho, M.A., 2016. Estimates of Annual Soil Loss Rates in the State of São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 40, 1-18. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150497>
- Medeiros, I.C., Silva, R.M., 2014. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. *Geosciences = Geociências*, 33, 457-471.
- Mello, C.R., Norton, L.D., Pinto, L.C., Beskow, S., Curi, N., 2016. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. *Ciência e Agrotecnologia* 40, 7-25. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542016000100001>
- Miguel, P., Dalmolin, R.S.D., Pedron, F.A., Moura-Bueno, J.M., Tiecher, T., 2014. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 585-598. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200023>
- Minella, J.P.G., Walling, D.E., Merten, G.H., 2008. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. *Journal of Hydrology* 348, 546-563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.026>
- Minella, L.P.G., Merten, G.H., Clarke, R.T., 2009. Método fingerprinting para identificação de fontes de sedimentos em bacia rural. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 633-638. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500017>
- Minella, J.P.G., Marten, G.H., 2011.
- Araujo, M. M. F., Santos, G. B., Oliveira, M., Klitzke, K., Nachtigall, S. D., Miguel, P., Tumpf, L.

- Monitoramento de Bacias Hidrográficas para Identificar Fontes de Sedimentos em Suspensão. *Ciência Rural* 41, 424-432. <https://doi.org/10.1590/S010384782011000300010>
- Moreira, M.C., Pruki, F.F., Oliveira, T.E.C., Pinto, F.A.C., Silva, D.D., 2009. Redes neurais artificiais para estimativa mensal da erosividade da chuva no Estado de Minas Gerais. *Revista Engenharia na Agricultura* 17, 75-83. <https://doi.org/10.13083/reveng.v17i1.94>
- Nachtigall, S.D., Nunes, M.C.M., Moura-Bueno, J.M., Lima, C.L.R., Miguel, P., Beskow, S., Silva, T.P., 2020. Spatial modeling of soil water erosion associated with agroclimatic seasonality in the southern region of Rio Grande do Sul, Brazil. *Eng Sanit Ambient* 25, 933-946. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210050>
- Naipal, V., Ciais, P., Wang, Y., Lauerwald, R., Guenet, B., Van Oost, K., 2018. Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850–2005. *Biogeosciences* 15, 4459-4480. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4459-2018>
- Napoli, M., Cecchi, S., Orlandini, S., Mugnai, G., Zanchi, C.A., 2016. Simulation of fieldmeasured soil loss in Mediterranean hilly areas (Chianti, Italy) with RUSLE. *Catena* 145, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.018>
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation, version 2005. Grassland, Soil and Water Research laboratory, Agricultural research service 808 East Blackland road, Temple, 808 East Blackland road, Temple, Texas 76502.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J. R., 2009. Soil e water assessment tool. Texas. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022.
- Neto, J.O.M., Silva, A.M., Mello, C.R., Mélio Júnior, A.V., 2014. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19, 177-188. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p177-188>
- Oliveira, F.G., Seraphim, O.J., Borja, M.E.L., 2015. Estimativa de Perdas de Solo e do Potencial Natural de Erosão da Bacia de Contribuição da Microcentral Hidrelétrica do Lageado. Botucatu – SP. *Energia na Agricultura* 30, 302-309. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p302-309>
- Oliveira, L. D., Alves, W. S., Castro, R. M., Pereira, M. A. B., Morais, W. A., & Possa, E. M. (2023). Estimativa da erosão hídrica em uma bacia hidrográfica no estado de Goiás (Brasil) por meio de modelagem e inteligência geoespacial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(1), 81-100.
- Owens, P.N., Blake, W.H., Gaspar, L., Gateuille, D., Koiter, A.J., Lobb Da, E.L., Reiffarth, D.G., Smith, H.G., Woodward, J.C., 2016. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. *Earth-Science Reviews* 162, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
- Paiva, M.H.R., Do Carmo, D.F., Prado, R.B., 2019. Avaliação do impacto de iniciativas conservacionistas no serviço ecossistêmico de controle à erosão hídrica. *Brazilian Journal of Production Engineering* 5, 44-55.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science and Policy* 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Peñalva-Bazzano, M.G., Eltz, F.L.F., Cassol, E.A., 2007. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 31, 1205-1217. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500036>
- Pinto, G.S., Servidoni, L.E., Lense, G.H.E., Moreira, R.S., Mincato, R.L., 2020. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. *Revista do Departamento de Geografia* 39, 62-71. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.160233>
- Piscocoy, V.C., Souza, W.P.D., Cantalice, J.R.B., Filho, M.C., Melo, R.C.P.D., Filho, R.N.D.A., 2020. WEPP Model for rill erosion estimation in a Brazilian Semiarid Watershed. *Rev. Caatinga* 33, 835-843. <https://doi.org/10.1590/198321252020v33n327rc>
- Reichert, J.M., Pellegrini, A., Rodrigues, M.F., Tiecher, T., Santos, D.R., 2019. Impact of tobacco management practices on soil, water, and nutrients losses in steeplands with shallow soil. *Catena* 183, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104215>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting

- Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture.
- Rodrigues, M.F., Reichert, J.M., Burrow, R.A., Flores, E.M.M., Minella, J.P.G., Rodrigues, L.A., Oliveira, J.S.S., Cavalcante, R.B.L., 2018. Coarse and fine sediment sources in nested watersheds with eucalyptus forest. *Land Degradation & Development* 29, 2237–2253.
- Sadeghi, S.H.R., Gholami, L., Darvishan, A.K., Saeidi, P., 2014. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrolog. Sci. J.* 59, 365–375. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239>
- Sakuno, N.R.R., Guizardi, A.C.F., Spalevic, V., Avanzi, J.C., Silva, M.L.N., Mincato, R.L., 2020. Adaptação e aplicação do método de erosão potencial para solos tropicais. *Revista Ciência Agronômica* 51, 1-10. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200004>
- Sampaio, L.C., Blanco, C.J.C., 2020. Estimativa da produção de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica da amazônia via modelo WEPP. *Revista Geoaraguaia* 10, 197-216.
- Santana, D.B., Bolleli, T.M., Lense, G.H.E., Silva, L.F.P.M., Sestras, P., Spalevic, V., Mincato, R.L., 2021. Estimate of water erosion in coffee growing areas in Serra da Mantiqueira, Minas Gerais State, Brazil. *Agriculture and Forestry* 67, 75-88. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.67.2.06>
- Santos, J.C.N., Andrade, E.M., Madeiros, P.H.A., Araújo Neto, J.R., Palácio, H.A.Q., Rodrigues, R.N., 2014. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 1157-1164. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1157-1164>
- Saxena, S., 2017. Open data in Israel, Georgia and Uzbekistan: Nature and scope. *Information and Learning Science* 118, 406-419. <https://doi.org/10.1108/ILS-05-2017-0045>.
- Schick, J., Bertol, I., Barbosa, F.T., Miquelluti, D.J., Cogo, N.P., 2017. Water erosion in a long-term soil management experiment with a Humic Cambisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 41, 1-13. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160383>
- Schwamback, D., Amorim Brandão, A. R., Berlotto, L. E., Berndtsson, R., Zhang, L., Wendland, E., & Persson, M. (2024). Quantifying soil loss in the Brazilian savanna ecosystem: Current rates and anticipated impact of climate changes. *Land Degradation & Development*.
- Sichman, J. S., 2021. Inteligência Artificial e sociedade: avanços e riscos. *Estudos Avançados* 35, 37-49. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35101.004>.
- Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Edevaldo, M.A., 2017. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments* 147, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- Silva, J.R.I., Souza, E.S., Souza, R., Santos, E.S., Antonino, A.C.D., 2019. Efeito de diferentes usos do solo na erosão hídrica em região semiárida. *Engenharia na Agricultura* 27, 272-283. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i3.867>
- Silva, R.B., Iori, P., Armesto, C., Bendini, H.N., 2010. Assessing rainfall erosivity with artificial neural networks for the Ribeira Valley, Brazil. *International Journal of Agronomy* 7p. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/365249>
- Silva, T.S., Cassol, E.A., Levien, R., Eltz, F.L.F., Schmidt, M.R., 2020. Long-term wheat-soybean successions affecting the cover and soil management factor in USLE, under subtropical climate. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44, 1-13. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190180>
- Siqueira, E.C., Vanzela, L.S., 2018. Simulação temporal e espacial do aporte de sedimentos em bacia agrícola no município de Fernandópolis (SP). *Engenharia Sanitária Ambiental* 23, 15-25. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018154987>
- Siqueira Junior, P., Silva, M.L.N., Cândido, B.M., Avalos, F.A.P., Batista, P.V.G., Curi, N., Lima, W., Quinton, J.N., 2019. Assessing water erosion processes in degraded area using unmanned aerial vehicle imagery. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 43, 1-12. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20190051>
- Smith, J. R. Soil erosion and its remedy by terracing and tree planting. *Science* 39, 858–862. <https://doi.org/10.1126/science.39.1015.858>
- Soares, D.L., Polivanov, H., Barroso, E.V., Maria, L., Souza, C.C., 2018. Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada. *Anuário do Instituto de Geociências* 41, 179-193. https://doi.org/10.11137/2018_1_179_193
- Sobrinho, T.A., Pertussatti, C.A., Rebucci, L.C.S.,

- Oliveira, P.T.S., 2011. Estimativa da erosividade local das chuvas, utilizando redes neurais artificiais. *Ambi-Agua* 6, 246-254. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.197>
- Soco, 2009. Sustainable Agriculture and Soil Conservation. Elos entre os processos de degradação do solo, as práticas agrícolas respeitadoras do solo e as medidas políticas com incidência nos solos. Europa: 2009. Disponível em: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/SOCO/FactSheets/PT%20Fact%20Sheet.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022.
- Sparovek, G., Bacchi, O.O.S., Maria, I.C., Ranieri, S.B.L., Schnug, E., 2000. Comparison of three water erosion prediction methods (137Cs, WEPP, USLE) in south-east brazilian sugarcane production. *Tropenlandwirt* 101, 107-118.
- Tang, Q., Xu, Y., Bennet, S.J., Li, Y., 2015. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences* 73, 1715-1724. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3523-z>
- Tan, Z., Leung, L.R., Li, H.Y., Tesfa, T., 2018. Modeling sediment yield in land surface and Earth system models: Model comparison, development, and evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 10, 2192-2213. <https://doi.org/10.1029/2017MS001270>
- Tavares, A.S., Spalevic, V., Avanzi, J.C., Nogueira, D.A., Silva, M.L.N., Mincato, R.L., 2019. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin in southern Minas Gerais. *Semina: Ciências Agrárias* 40, 555-572. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p555>
- Tiecher, T., Minella, J.P.G., Miguel, P., Alvarez, J.W.R., Pellegrini, A., Capoane, V., Ciotti, L.H., Schaefer, G.L., Santos, D.R., 2014. Contribuição das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica agrícola sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 639-649. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200028>
- Tiecher, T., Caner, L., Minella, J.P.G., dos Santos, D.R., 2015. Combining visible-based-color parameters and geochemical tracers to improve sediment source discrimination and apportionment, *Science of The Total Environment* 527-528, 135-149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.103>
- Tiecher, T., Minella, J.P.G., Caner, L., Evrard, O., Zafar, M., Capoane, V., Dos Santos, D.R., 2017. Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 237, 95-108.
- Tiecher, T., Moura-Bueno, J.M., Caner, L., Minella, J.P.G., Evrard, O., Ramon, R., Naibo, G., Barros, C.A.P., Silva, Y.J.A.B., Amorim, F.F., Rheinheimer, D.S., 2021. Improving the quantification of sediment source contributions using different mathematical models and spectral preprocessing techniques for individual or combined spectra of ultraviolet-visible, near- and middle-infrared spectroscopy. *Geoderma* 384, 114815. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20230144>
- Toubal, A.K., Achite, M., Ouillon, S., Dehni, A., 2018. Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the WadiSahouat basin, North-West of Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment* 190, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>
- Valente, M.L., Reichert, J.M., Cavalcante, R.B.L., Minella, J.P.G., Evrard, O., Srinivasan, R., 2021. Afforestation of degraded grasslands reduces sediment transport and may contribute to streamflow regulation in small catchments in the short-run. *Catena* 204, 1-13.
- Volk, L.B.S., Cogo, N.P., 2014. Erosão Hídrica, em três momentos da cultura do milho, influenciada por métodos de preparo do solo e semeadura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 565-574. <https://doi.org/10.1590/S010006832014000200021>
- Zanchin, M., Moura, M.M., Nunes, M.C.M., Beskow, S., Miguel, P., Lima, C.L.R., Bressiani, D.A., 2021. Soil loss estimated by means of the RUSLE model in a subtropical climate watershed. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 45, 1-15. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210050>
- Wall, G.J., Wilding, L.P., 1976. Mineralogy and related parameters of fluvial suspended sediments in northwestern Ohio. *Journal of Environmental Quality* 5, 168-173. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020012x>
- Walling, D.E., Peart, M.R., Oldfield, F., Thompson, R., 1979. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements.

- Nature, 281, 110–113.
- Walling, D. E., 2013. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments* 13, 1658-1675. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0767-2>
- Walling, D.E., Collins, A.L., 2000. Integrated assessment of catchment sediment budgets: a technical manual. Exeter: University of Exeter. 168p. <https://doi.org/10.1002/ldr.461>
- Wei, Q., Qiankun, G., Wenhong, C., Zhe, Y., Qinghong, Y., Zhijie, S., Fenli, Z., 2018. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed. *Soil and Tillage Research* 182, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.004>
- Weiler, E.B., Cruz, J.C., Tamiosso, M.F., Reichert, J.M., Mantovanelli, B.C., Broetto, T., Santos, F.D., Fantinel, R.A., 2021. Estratégia Metodológica para Zoneamento pelo Potencial de Perda de Solo em uma Bacia Hidrográfica no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 2391-2402. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2391-2402>
- Williams, J.R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. USDA. Agricultural Research Service 6, 244-252. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.23031>
- Williams, J.R., Berndt, H.D., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the ASAE* 20, 1100–1104.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1962. Predicting Rainfall Erosion Losses from cropland East of the Rocky Mountains. Handbook, n, 282, USDA, Washington, DC.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, USDA, Agriculture Handbook, n. 5, 58p.