

**DA TEORIA GERAL DOS SISTEMAS AOS MODELOS
DE REPRESENTAÇÃO SISTÊMICA DO CONTINUUM
SOLO E PROCESSOS EROSIVOS**

**FROM GENERAL SYSTEMS THEORY TO SYSTEMIC
REPRESENTATION MODELS OF THE SOIL CONTINUUM
AND EROSION PROCESSES**

**DE LA TEORÍA GENERAL DE LOS SISTEMAS A LOS
MODELOS DE REPRESENTACIÓN SISTÊMICA DEL
CONTINUUM SUELO Y PROCESOS EROSIVOS**

DOI 10.33360/RGN.2318-2695.2025.i1.p.188-204

Samuel Alves dos Santos
Doutorando em Geografia - Universidade Federal de Goiás
geografosamuelsantos@gmail.com

Antonio Marcos dos Santos
Professor Doutor em Geografia, Universidade de Pernambuco
antonio.santos@upe.br

Guilherme Taitson Bueno
Professor Doutor em Geografia, Universidade Federal de Goiás
gtaitson@ufg.br

Ivanilton José de Oliveira
Professor Doutor em Geografia, Universidade Federal de Goiás
oliveira@ufg.br

RESUMO

A Teoria Geral dos Sistemas (TGS) surgiu a partir das inquietações científicas em relação à visão mecanicista, amplamente empregada pela ciência no âmbito global até meados do século passado. A partir desse momento, diversas áreas do conhecimento passaram a adotar os princípios norteadores da TGS. No campo da Geografia e das ciências afins, essa influência não foi diferente, impactando e criando novos métodos e conceitos. Uma das contribuições da TGS ocorreu nos estudos sobre modelagens dos solos. Nesse contexto, o presente ensaio tem como objetivo traçar uma linha tênue desde a estruturação da TGS, passando por sua influência nos estudos de solos no âmbito geográfico, até seu impacto nos modelos destinados à estimativa da perda de solo em bacias hidrográficas. A partir de uma revisão bibliográfica, observa-se que as concepções sistêmicas contribuíram para desenvolvimento da Geopedologia em escala global, além de influenciarem a formulação de modelos matemáticos destinados à simulação da perda de solo. Quanto aos modelos, seis foram identificados como os mais utilizados em estudos voltados à estimativa da perda de solo. Todos eles são baseados na *Universal Soil Loss Equation* (USLE), na qual a estrutura das bacias hidrográficas é analisada a partir das ideias originais e modificadas da TGS.

Palavras-chave: TGS; Bacia hidrográfica; Modelagem ambiental; Perda de solos

ABSTRACT

The General Systems Theory (GST) emerged from scientific concerns regarding the mechanistic view, which was widely employed in science on a global scale until the mid-20th century. From that point onward, various fields of knowledge began to adopt the guiding principles of GST. In the field of Geography and related sciences, this influence was no different, impacting and generating new methods and concepts. One of GST's contributions lies in studies on soil modeling. In this context, the present essay aims to outline a subtle trajectory from the structuring of GST, through its influence on soil studies within the geographical domain, to its impact on models designed to estimate soil loss in watersheds. Based on a literature review, it is observed that systemic concepts have contributed to the development of Geopedology on a global scale, as



well as influenced the formulation of mathematical models intended to simulate soil loss. Regarding these models, six have been identified as the most commonly used in studies focused on soil loss estimation. All of them are based on the Universal Soil Loss Equation (USLE), in which the structure of watersheds is analyzed through both the original and modified ideas of GST.

Keywords: GST; Watershed; Environmental modeling; Soil loss

RESUMEN

La Teoría General de los Sistemas (TGS) surgió a partir de las inquietudes científicas respecto a la visión mecanicista, ampliamente empleada en la ciencia a nivel global hasta mediados del siglo pasado. A partir de ese momento, diversas áreas del conocimiento comenzaron a adoptar los principios orientadores de la TGS. En el campo de la Geografía y las ciencias afines, esta influencia no fue diferente, impactando y generando nuevos métodos y conceptos. Una de las contribuciones de la TGS se dio en los estudios sobre modelización de suelos. En este contexto, el presente ensayo tiene como objetivo trazar una línea sutil desde la estructuración de la TGS, pasando por su influencia en los estudios de suelos dentro del ámbito geográfico, hasta su impacto en los modelos destinados a la estimación de la pérdida de suelo en cuencas hidrográficas. A partir de una revisión bibliográfica, se observa que las concepciones sistémicas han contribuido al desarrollo de la Geopedología a escala global, además de influir en la formulación de modelos matemáticos destinados a la simulación de la pérdida de suelo. En cuanto a los modelos, se han identificado seis como los más utilizados en estudios enfocados en la estimación de la pérdida de suelo. Todos ellos se basan en la Universal Soil Loss Equation (USLE), en la que la estructura de las cuencas hidrográficas se analiza a partir de las ideas originales y modificadas de la TGS.

Palabras clave: TGS; Cuenca hidrográfica; Modelización ambiental; Pérdida de suelos

1. INTRODUÇÃO

Para iniciar a discussão, parte-se de um questionamento: por que estudar sistemas? Egner e Elverfeldt (2009) afirmam que os sistemas parecem estar em toda parte, exemplificando que o planeta Terra faz parte do sistema solar e que os seres humanos estão organizados em sistemas sociais, que, por sua vez, se referem a sistemas ainda menores.

De acordo com Grigoriev (2020), a base geográfica da Terra é estruturada a partir de sua crosta, a troposfera e a estratosfera, representando a baixa atmosfera, a hidrosfera, que, junto com o regolito, compõem o manto do solo, e a estrutura fitogeográfica. Essas estruturas, por meio de uma relação sistêmica envolvendo a troca de energia e matéria, são a base de sustentação das mais variadas formas de vida deste planeta.

Nos últimos anos, as interações humanas com a estrutura físico-natural da Terra têm se acelerado cada vez mais, intensificando os padrões de troca de energia e matéria e, conseqüentemente, gerando um alerta quanto à manutenção mínima de sobrevivência humana neste ambiente.

Levando em consideração as discussões apresentadas no parágrafo anterior, cita-se o solo como exemplo dentro do complexo sistema terrestre. Nesse contexto, o último relatório da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2015) aponta que, em média, 33% dos solos, em âmbito global, estão em avançado estágio de degradação, com destaque para os processos erosivos.



Entender como esses processos ocorrem é de fundamental importância para o avanço e desenvolvimento de mecanismos técnicos, sociais e políticos capazes de conter o ritmo de perda de solos, tanto no presente quanto no futuro. Para isso, compreender o funcionamento sistêmico do conjunto de elementos que integra a complexidade do sistema Terra é fundamental. Nesse contexto, a bacia hidrográfica se destaca como um dos elementos centrais, devido ao seu funcionamento e estrutura, que são capazes de representar de forma eficaz a dinâmica de um sistema ambiental.

Por esse motivo, surge a ideia de entender que as bacias hidrográficas também se comportam como um sistema, em que apresentam interação entre a litosfera, atmosfera e biosfera, com trocas de energia e matéria, como a entrada de água no sistema, por meio das chuvas, e da saída de sedimentos e água.

Atualmente, acrescenta-se à dinâmica de funcionamento sistêmico das bacias hidrográficas o papel crucial das atividades humanas, as quais potencializam o dinamismo de entrada de energia e material, assim como suas saídas. Com isto, acrescentam-se as ideias discursivas de sistemas complexos sobre o funcionamento das bacias hidrográficas.

Neste contexto, o presente ensaio tem como objetivo traçar uma linha tênue desde a estruturação da TGS, passando por sua influência nos estudos de solos no âmbito geográfico, até seu impacto nos modelos destinados à estimativa da perda de solo em bacias hidrográficas.

Pretende-se, neste ensaio, inicialmente refletir sobre o contexto teórico-conceitual e os debates em torno da abordagem sistêmica, buscando interligar os elementos no ambiente por meio da troca de matéria e energia, como subsídio para compreender como a abordagem sistêmica influenciou a Geopedologia e os modelos que buscam estimar o processo de perda de solo em uma bacia hidrográfica. Posteriormente, são apresentados os principais modelos destinados à estimativa da perda de solos oriundos de áreas correlatas à ciência geográfica, porém amplamente trabalhados neste ramo científico.

Para a confecção do ensaio, foi realizado um levantamento bibliográfico exploratório, amparado em publicações de periódicos científicos e livros disponíveis nas bases de dados *SCOPUS* e *Web of Science*, plataformas que reúnem a maior quantidade de estudos sobre a temática relacionada à TGS, bacias hidrográficas, modelagem e perda de solos em circulação internacional.

2. PRESSUPOSTOS HISTÓRICOS DA ABORDAGEM SISTÊMICA

O termo sistema deriva dos termos gregos: *syn*, que significa “junto”, “associado”; e *hístana*, com significados de “fazer funcionar” (Lopes *et al.*, 2015). Neste contexto, o sistema significa um conjunto de elementos que funcionam de maneira unificada.

A ideia de sistema tem raízes antigas. Vale destacar que essa abordagem já era enfatizada na Antiguidade pelo pensador Aristóteles e outros, já preocupados em entender os acontecimentos e funcionamento do ambiente e do comportamento do ser humano (Capra, 2006).



A abordagem sistêmica foi estruturada a partir da Teoria Geral dos Sistemas (TGS) formulada pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy entre os anos de 1930 à 1950 (Araujo; Gouveia, 2016), pois já se discutia as bases iniciais sobre sistemas na física, em postulados da química e na biologia, entre outras áreas do conhecimento desde o início do século XX. No trabalho de Strahler (1980) “*Systems Theory in Physical Geography*” foi apontado que essa teoria foi bastante aplicada na Geografia Física desde 1950, nas mais variadas tipologias de estudo e o próprio Strahler (1950), adequou princípios norteadores da TGS quando ampliou as discussões sobre sistemas fluviais com ênfase na dinâmica dos sistemas abertos.

De acordo com Bertalanffy (1973), um sistema é um complexo de elementos em interação. Diante do exposto, alguns autores o definem como um conjunto de elementos que apresenta dependência mútua entre eles e seus atributos (Araujo; Gouveia, 2016; Lopes *et al.*, 2015). Os sistemas podem ser: isolados e não isolados. Os sistemas isolados não apresentam troca de energia nem de matéria, enquanto os não isolados são classificados em fechados e abertos. Nos sistemas fechados, ocorrem trocas apenas de energia, e nos sistemas abertos, existe troca de energia e de matéria (Lopes *et al.*, 2015; Vale, 2012; Christofolletti, 2015).

Bertalanffy (1950) chama de estado estacionário o estado independente do tempo que um sistema aberto tende a atingir, no qual o sistema permanece constante como um todo e em suas fases, apesar de haver um fluxo contínuo de materiais. Diante disso, Strahler (1980, p. 45) aponta que, no estado estacionário, “a energia armazenada em um sistema de fluxo de energia é constante com o tempo, de modo que a entrada (*input*) é igual à saída (*output*)”.

A ideia moderna vinculada à teoria dos sistemas auto-organizados também está embasada na obra de Kant (1916), no livro *Crítica da Faculdade de Julgar* publicado no século XVIII. A exemplo do que Immanuel Kant enfatizava em sua obra, os sistemas eram vistos como um organismo que se auto-organiza, e suas partes participam da ação conjunta, tendo em vista que também podem mudar de funcionamento. Diante disso, é importante abordar que o sistema não é apenas a adição das partes, mas uma ordem que constitui e/ou organiza essas partes.

Nas últimas décadas, os estudos que envolvem as abordagens sistêmicas inseriram, com maior ênfase, às ideias de complexidade e auto-organização. Para a discussão sobre a complexidade dos sistemas, a ideia de dinâmica de funcionamento destes sistemas deve ser inserida. Christofolletti (2015) destaca que os sistemas dinâmicos são subdivididos em simples e complexos. O primeiro é estruturado por um conjunto de elementos relacionados entre si, que agem uns sobre os outros, levando em consideração leis específicas. Christofolletti (2015) classifica esses sistemas como lineares. Nestes sistemas, a relação de causa e efeito é facilmente medida e com alto grau de precisão.



Ao oposto dos sistemas dinâmicos simples, estão os sistemas complexos, os quais são formados por uma grande quantidade de elementos interligados que mantêm inter-relações com sistemas adjacentes e subjacentes, tendo a capacidade de auto-organizar sua estrutura interna como consequência das interações internas e externas (Christofolletti, 2015). Estes sistemas não possuem ligações lineares, logo, são considerados não lineares. Ou seja, a auto-organização destes sistemas não é proporcional à entropia, visto que a complexa relação entre seus elementos e com os sistemas vizinhos interfere nesse processo.

Um sistema complexo aberto, a maioria dos sistemas trabalhados na ciência Geográfica e afins, não pode ser considerado estável ou em perfeito estado de equilíbrio, visto que, a todo instante, a partir do princípio das perdas e ganhos de energia e matéria, são perturbados com diferentes graus de intensidade. A perturbação é medida pela entropia, apresentada na segunda Lei da Termodinâmica. A entropia é a desordem, a desorganização presente no ambiente quando o mesmo é perturbado (Santos; Souza; Castro, 2018). Coelho (2001) reforça que a entropia corresponde a uma degradação energética e, conseqüentemente, organizacional.

A partir das constantes perturbações, os sistemas abertos, ao romperem seus estados de relativa estabilidade, possuem a capacidade de se auto-organizar, ou seja, desenvolver adaptações a partir das agitações internas oriundas das interações com outros sistemas. Com isso, segundo Coelho (2001), o sistema busca sua autoprodução, autorreprodução, autorrecuperação ou automultiplicação. Daí a importância das discussões sobre a auto-organização dos sistemas na perspectiva da complexidade do funcionamento dos mesmos.

A seguir, será realizada uma reflexão teórico-conceitual sobre a ideia de bacia no viés da Teoria Geral dos Sistemas.

3. A TEORIA GERAL DOS SISTEMAS E SUA RELAÇÃO COM OS ESTUDOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

De acordo com Lorenzon *et al.* (2018), a bacia hidrográfica é considerada uma unidade territorial de planejamento geoambiental. Além disso, também é reconhecida como unidade espacial de análise (Yu *et al.*, 2020) e unidade de paisagem (Flotemersch *et al.*, 2016).

Diversas definições de bacia hidrográfica foram propostas ao longo do tempo por inúmeros pesquisadores. Entretanto, elas se assemelham à definição de bacia hidrográfica dada por Guerra (1993, p. 15), que a define como o “conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes”. Christofolletti (1980) a descreve como uma área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial.

Schumm (1977) e Vale (2012) consideram a bacia hidrográfica como um sistema aberto, devido à troca mútua de matéria (água e sedimentos) e energia entre uma bacia e outra subjacente. Os autores Lima e Zakia (2000) abordam o conceito atrelando-o ao sistema geomorfológico aberto,



ênfatizando que a bacia hidrográfrica recebe (*input*) energia por meio de agentes climáticos e perde (*output*) energia por meio do deflúvio. Dessa forma, os sistemas apresentam componentes de entrada (*input*) e saída (*output*).

Todas as partes das bacias estão conectadas entre si pelo funcionamento da água; ou seja, é um sistema determinado pelo funcionamento, pela dinâmica ou pela função. Considerando a bacia como um todo, com todas as suas partes, componentes e atributos, estes estão expostos a fluxos contínuos de matéria e energia.

No livro de Zavoianu (1985), *Morphometry of Drainage Basins*, o autor aponta os principais elementos naturais constituintes da bacia, tais como: rocha, relevo, tipo de profundidade do solo e cobertura vegetal. Esses elementos mencionados serão afetados pela quantidade de matéria e energia que receberão.

Inputs de matéria e energia podem ocorrer nas bacias hidrográficas por meio das: precipitações climáticas; radiação solar; ações do vento; entre outros. Já os *outputs* podem ser superficiais ou subterrâneos e ocorrem por meio da evapotranspiração, perda de água para os lençóis freáticos ou pelas ações humanas, como a retirada de água do sistema para atividades, entre outros (Zavoianu, 1985).

Falcão (2020) reforça que a bacia recebe um suprimento ininterrupto de energia através do clima. Nesse contexto, também perde energia por meio da água e dos sedimentos que a deixam. A esse respeito, o autor aponta, em suas reflexões, que a radiação solar é a maior fonte de energia. Nesse contexto, para o funcionamento sistêmico de uma bacia hidrográfrica, a precipitação climática é a principal fonte de matéria, enquanto a radiação solar é a principal fonte de energia.

É a partir dos conhecimentos sobre o funcionamento da bacia hidrográfrica, como um sistema ambiental aberto e complexo, que foram estruturados modelos de diferentes tipologias, como os matemáticos de categoria determinística e estocástica, cuja funcionalidade é representar os processos de funcionamento sistêmico de uma bacia hidrográfrica. Entre os objetivos dos modelos estão as simulações do fluxo de água, vazões, infiltrações, deslocamento de sedimentos e erosão, entre outros.

Um dos modelos que amplia o leque de estudos sobre modelagem em bacias hidrográficas em larga escala foi o Balanço Hídrico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1957). Este modelo, estruturado a partir do funcionamento sistêmico de uma determinada área, incluindo a bacia hidrográfrica, leva em consideração a entrada de água no sistema e, conseqüentemente, todos os caminhos e interações possíveis com subsistemas representados pelas variáveis solo, cobertura vegetal e lençol freático. No entanto, este modelo não abordava a perda de solo, tendo como



finalidade representar a interação entre o sistema climático e o sistema produtivo agrícola a partir da dinâmica de retroalimentação positiva e negativa da água, com base na concepção teórica da TGS.

A partir do crescimento das modelagens ambientais sobre as bacias hidrográficas, as instituições de ensino e/ou pesquisa dos Estados Unidos investiram em estímulos para o desenvolvimento de novos modelos que, a partir de uma abordagem holística, pudessem projetar situações que ocorrem no funcionamento de uma bacia hidrográfica.

Acrescenta-se que, em meados do século passado, a perda de solo por erosão em vários países europeus e nos Estados Unidos chamou a atenção dos órgãos públicos e das instituições de pesquisa, estimulando o desenvolvimento de modelos de base sistêmica, empregando a bacia hidrográfica como unidade de análise. A partir daí, nasceram as primeiras investidas para a modelagem da erosão do solo no seio das Ciências Agrárias, e posteriormente, atingiram as Ciências Exatas e a Geografia.

4. A TEORIA GERAL DOS SISTEMAS E OS ESTUDOS ENVOLVENDO SOLOS

De acordo com Gravelius (1914, p. 45), o solo é definido como "o material mais ou menos solto e friável, no qual, através de suas raízes, as plantas podem encontrar uma base de nutrição, bem como outras condições de crescimento". O solo é um recurso que pode ser considerado não renovável, pois, uma vez perdido por erosão, demorará milhares ou até milhões de anos para se formar novamente, em um processo muito lento de transformação da rocha em solo.

As propriedades do sistema solo relacionam-se umas às outras. Devido a isso, se uma propriedade é alterada, as demais também serão afetadas. Nesse sentido, um exemplo é a quantidade de água introduzida sobre determinados tipos de solo, pois isso aumentará o teor de umidade, a densidade, a variação de temperatura e a salinização (Jenny, 1941).

A relação entre a base da TGS e os estudos dos solos remonta ao final da década de 1940 e ao início da metade do século XX. Pode-se destacar o papel de Principi, que empregou a base conceitual da TGS para a delimitação dos tipos de solos em diferentes ambientes do território italiano no início da década de 1950. Nesse estudo, foram levadas em consideração a relação sistêmica entre a base litológica e as características e dinâmicas de formação do relevo local.

Anos depois, com a sistematização dos estudos ambientais, utilizando as concepções da TGS e uma ampla divulgação desses estudos, novas abordagens envolvendo a relação sistêmica e os solos foram desenvolvidas. Nesse contexto, vale destacar os estudos desenvolvidos por Pouquet, em sua maioria no estado francês, os quais sistematizaram e aprofundaram os mecanismos de levantamento e classificação dos solos a partir da ideia de sistemas abertos (Machado; Castro; Ladeira, 2022).

Na América Latina, pode-se destacar o papel de Joseph Alfred Zinck, formado em Geografia com especialização em fitossociologia e pedologia, que foi um dos pioneiros a



desenvolver estudos nesse continente com forte relação entre a abordagem sistêmica e a dinâmica de formação dos solos. Entre os anos de 1988 e 1989, Joseph Alfred Zinck publicou uma coletânea baseada em sua experiência em uma série de cursos voltados para a classificação dos solos. Nesse material, Zinck (1988) deixa evidente o reflexo da estrutura dos solos na paisagem, assim como a forte relação entre os elementos que compõem os sistemas físicos naturais e a formação e o desenvolvimento dos solos.

A colaboração completa de Joseph Alfred Zinck refletiu na formação e na construção de novos estudos pautados na relação entre os princípios da TGS e a dinâmica de formação e distribuição dos solos na América Latina e em países de outros continentes.

Os estudos de Principi (1953), Pouquet (1966) e Zinck (1988), ao longo de 50 anos, colaboraram com a estruturação da Geopedologia, a qual é definida por Zinck *et al.* (2016) e Machado, Castro e Ladeira (2022) como a contração da Geomorfopedologia, destinada aos estudos de solos a partir de suas relações com o relevo, considerando a interação sistêmica entre eles.

Além da Geopedologia, outros mecanismos teóricos e metodológicos voltados para o estudo de solos foram desenvolvidos e amplamente difundidos no meio científico, principalmente aqueles destinados ao monitoramento e diagnóstico de perdas de solos.

Tais mecanismos são representados por modelos ambientais que utilizam a relação sistêmica entre os elementos dos sistemas físico-naturais para monitorar erosões a partir das características dos solos presentes nas áreas de estudo.

5. MODELAGEM PARA PERDA DOS SOLOS E SUAS NUANÇAS SISTÊMICAS

A modelagem ambiental é considerada, segundo Christofolletti (2015), como um instrumento entre os procedimentos das bases metodológicas de uma investigação científica. O autor justifica que a construção de modelos a respeito dos sistemas ambientais representa a estrutura de hipóteses científicas. Em outras palavras, o desenvolvimento de modelos é considerado parte fundamental da pesquisa científica, e sua construção deve ser acompanhada de critérios rigorosos, pautados nos princípios da metodologia científica.

A origem etimológica da palavra modelo vem do termo latino *modulus* e designa alguma forma de representar aspectos de uma determinada realidade — fato, coisa ou fenômeno (Bunge, 1974; Le Moigne, 1989). Segundo Eco (1976), um modelo é uma “representação funcional”, ou seja, reproduz algo funcional daquilo que modela. O modelo é uma forma de coordenar informações. Em relação ao tema aqui em estudo, o modelo integra todas as variáveis envolvidas no processo erosivo do solo, tais como: vegetação nativa ou artificial (culturas); solos; água no solo e no ambiente; clima; ciclos de elementos químicos (nutrientes) e do carbono no solo e no ambiente; e práticas conservacionistas do solo.



Segundo Amorim (2003), diversos modelos matemáticos foram e vêm sendo criados desde a década de 1950 com a finalidade de calcular a perda de solo provocada pelo processo erosivo e avaliar os riscos ou susceptibilidades de erosão dos solos e suas consequências. O surgimento de modelos destinados a avaliar perdas de solos na década de 1950, frequentemente empregados pela Geografia, tem origem na Geografia Teorética, inclusive com a importação de modelos desenvolvidos em outras áreas científicas, como a Engenharia, Agronomia, entre outras.

Diante desse contexto, conforme os autores Bircher, Liniger e Prasuhn (2022), modelos matemáticos determinísticos de erosão do solo são, atualmente, utilizados em todo o mundo para estimar a erosão hídrica. Além disso, deve-se ressaltar que inúmeros modelos diferentes estão disponíveis.

Os modelos matemáticos determinísticos apresentam como resultados uma sequência de valores empregados no *input* das variáveis envolvidas. Segundo Fernandes (2016), os resultados de saída apresentados por um modelo determinístico serão sempre os mesmos, desde que os dados de entrada continuem os mesmos. O autor mencionado aborda que o valor numérico dos inputs irá determinar aqueles que serão obtidos nos outputs desse tipo de modelo.

A modelagem desenvolvida por um modelo matemático determinístico é baseada nas noções matemáticas que envolvem as relações exatamente previsíveis a partir de variáveis independentes, consistindo em um conjunto de afirmações matemáticas deduzidas de experimentações, a partir das quais consequências únicas poderão ser deduzidas pela argumentação de base matemática (Christofoletti, 2015).

Entre os modelos matemáticos determinísticos, encontra-se a Equação Universal de Perda de Solo, desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978). Segundo Fernandes (2016), devido à sua simplicidade matemática, a USLE (*Universal Soil Loss Equation*) tornou-se uma das equações mais usadas na literatura.

Sobre os tipos de modelos matemáticos utilizados para estimar a perda de solo por erosão, Paiva, Carmo e Prado (2019) salientam, em sua pesquisa, que foram encontrados 85 artigos publicados entre os anos de 1990 e 2016, indexados nas bases bibliográficas internacionais da *SCOPUS* e *Web of Science*. Entre os modelos, os tradicionais USLE, RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) e MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) foram os mais utilizados nos estudos. Os autores destacam que o uso em massa dos modelos supracitados ocorre devido à fácil aplicabilidade e rápida compreensão dos resultados. Outro ponto evidenciado pelos autores é que esses modelos tradicionais apresentam precisão razoável, sendo bons instrumentos para previsão das perdas de solo frente às dificuldades de obtenção de dados consistentes e com escalas adequadas.



Acrescentam no levantamento de Paiva, Carmo e Prado (2019) os modelos SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) e o EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*).

A base da maioria dos modelos de estimativa de perda de solos por erosão é a USLE. Para Pandey *et al.* (2017) e Santos e Santos (2021), este modelo permite analisar, rapidamente, a erosão do solo por meio de uma análise em profundidade, uma vez que esse processo pode representar a variabilidade espacial dos fatores físico-naturais, assim como de procedência antrópica.

A USLE é estruturada a partir da tentativa de representar um funcionamento sistêmico em que a base de entrada de matéria são as chuvas, representadas pela variável erosividade, e a saída é a perda de solos a partir da erosão. Neste contexto, o sistema é estruturado a partir do potencial energético destinado ao deslocamento dos solos, representado pela erosividade, levando em consideração o papel de subsistemas como o solo, representado pela erodibilidade, o subsistema de encosta, levando em consideração a declividade do terreno e o comprimento de sua rampa, e o papel do subsistema cobertura vegetal, este influenciado pelas ações humanas no processo de uso e ocupação.

A USLE pode ser considerada, dentro dos parâmetros da modelagem ambiental, um modelo caixa-preta. Ou seja, segundo Chorley (1967) e Christofolletti (2015), modelos desse tipo representam o sistema com unicidade, sem deixar visível sua organização e funcionamento internos. Neste contexto, a atenção voltada para esses modelos é direcionada às entradas e saídas.

A partir da USLE, outros modelos foram desenvolvidos, entre eles a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) (Renard, 1998). Segundo Galdino e Weill (2011), a USLE e a RUSLE possuem estruturas idênticas, diferindo apenas na forma como seus fatores são determinados. Consequentemente, de acordo com Abdulkareem *et al.* (2021), a RUSLE também é considerada um modelo caixa-preta ou métrico.

A RUSLE apresenta maior eficiência e exatidão para terrenos com declives suaves e ondulados. Dessa forma, observa-se que o relevo ganha em eficiência, além de contribuir para a melhoria física do modelo (Carvalho *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2014).

É oportuno mencionar que, segundo Cao *et al.* (2023), a RUSLE tem sido amplamente utilizada para estimar a perda de solo por erosão, demonstrando precisão suficiente em estudos regionais de larga escala. Deve-se ressaltar que a Equação Universal de Perda de Solo Revisada é uma ferramenta fundamental para avaliar as variações espaciais e temporais da erosão do solo a partir de uma abordagem sistêmica.

Outro modelo desenvolvido a partir da USLE foi a MUSLE, que também é considerada um modelo caixa-preta ou métrico. De acordo com Shi *et al.* (2022), fundamentados nas ideias de



Williams (1975), apontam que esse modelo foi desenvolvido com base no funcionamento sistêmico de uma bacia hidrográfica para estimar o rendimento de sedimentos produzido pelo escoamento superficial, considerando a entrada de matéria e energia proporcionada pelos picos das precipitações pluviométricas.

Outro modelo de destaque é o SWAT, que tem sido apontado como um dos modelos mais utilizados nos últimos anos sendo constantemente avaliado. Esse modelo é utilizado para estimativas de vazão e produção de sedimentos, incluindo, nesta última funcionalidade, a erosão dos solos (Santos *et al.*, 2023).

A base responsável pelo cálculo da erosão do solo no SWAT é a MUSLE (Shi *et al.*, 2022). No entanto, devido à visibilidade do funcionamento da estrutura do modelo, o SWAT é classificado como um modelo caixa-branca, permitindo, assim, a obtenção de informações com um maior nível de detalhamento sobre o funcionamento do sistema que está sendo modelado.

Outro ponto importante no SWAT é que, por ser um modelo caixa-branca, ele pode ser calibrado, função que não é possível na USLE, RUSLE e MUSLE. A estrutura de calibração do SWAT busca ajustar o funcionamento sistêmico da bacia hidrográfica modelada por meio de adequações comparativas entre as simulações e os dados registrados de vazões e cargas de sedimentos. Nesse contexto, compete ao pesquisador ou técnico compreender o funcionamento sistêmico da bacia hidrográfica para ajustar o modelo.

Outro destaque dado ao SWAT é que este é o único dos seis modelos aqui apresentados que consegue sintetizar o sistema de uma bacia hidrográfica. Para Christofolletti (2015), modelos dessa categoria têm como finalidade fornecer um quadro global da totalidade do sistema modelado, promovendo o grau de conhecimento a partir de suas partes e das interações entre os elementos componentes, com base nos *inputs e outputs*.

Se, por um lado, o SWAT permite a calibração das simulações devido sua clareza na tentativa de sintetizar o sistema bacia hidrográfica, por outro, ele não possibilita a especialização dos pontos onde ocorrem as perdas de solo por erosão, funcionalidade presente na modelagem da USLE, RUSLE e MUSLE.

Outros modelos, embora menos utilizados em comparação aos abordados anteriormente, também são empregados em estudos para estimar a perda de solo por erosão e serão descritos nos próximos parágrafos, entre eles o WEPP. Esse modelo tem sido amplamente utilizado para estimar o escoamento superficial e, conseqüentemente, a perda de solo. Nessa premissa, Wang *et al.* (2022) complementam que o modelo WEPP é um programa de simulação de erosão utilizado em escala global.



A base de aplicação do WEPP é, geralmente, uma bacia hidrográfica considerada um sistema ambiental físico (Wang *et al.*, 2022), a qual é subdividida em submodelos representados por sub-bacias, mantendo toda a dinâmica de seu funcionamento sistêmico (Zhu *et al.*, 2023).

A partir daí, as erosões são simuladas individualmente para cada sub-bacia, levando em consideração as entradas de energia e matéria proporcionadas pela carga das chuvas ao longo de uma escala temporal de análise, bem como a saída de matéria, medida por meio do escoamento dos cursos hídricos em conexão com uma sub-bacia adjacente.

Vale destacar que o WEPP, semelhante ao SWAT, é um modelo caixa-branca, permitindo que o pesquisador acompanhe todo o processo de simulação no contexto do funcionamento sistêmico da bacia hidrográfica.

Outro modelo caixa-branca destinado à predição da erosão do solo é o EUROSEM, que é capaz de simular a erosão, o transporte de sedimentos e a deposição sobre a superfície terrestre. Seu foco está na simulação da *rill*, ou seja, a erosão resultante do espalhamento superficial e difuso da água, e da *interrill*, que ocorre a partir da formação de canais, resultando no deslocamento de sedimentos mais pesados e em maior quantidade (Smets *et al.*, 2011).

O modelo também indica os locais passíveis de acumulação dos sedimentos deslocados. Seu ponto forte é a inclusão de variáveis ambientais ilimitadas, ajustáveis conforme a necessidade da simulação (Khaleghpanah *et al.*, 2016).

Por outro lado, a simulação baseada no funcionamento sistêmico de um objeto, como uma bacia hidrográfica, torna-se mais complexa, pois o modelo não foi estruturado para essa funcionalidade, especialmente quando há um aumento na complexidade do sistema ambiental.

Neste contexto, Smets *et al.* (2011) destacam que, devido à limitação do EUROSEM na simulação de sistemas complexos, quanto maior a área de estudo, menor a precisão do modelo. Por isso, recomenda-se o uso do EUROSEM em áreas ou bacias hidrográficas de pequeno porte.

O modelo EPIC é um modelo computacional baseado no funcionamento sistêmico de uma bacia hidrográfica. Foi desenvolvido na década de 1980 com a finalidade de simular o deslocamento de sedimentos de áreas agricultáveis para os cursos hídricos e, conseqüentemente, avaliar a poluição das águas por elementos químicos envolvidos nos cultivos agrícolas (Doro *et al.*, 2021). Além disso, vem sendo empregado para aferir a erosão dos solos, utilizando como base matemática o modelo RUSLE.

O EPIC é considerado um modelo caixa-branca, e sua principal entrada são elementos do sistema climático, como a precipitação pluviométrica e a temperatura do ar, permitindo facilmente a integração com modelos de projeção das mudanças climáticas. Luo *et al.* (2023) apontam que, ao contrário dos modelos apresentados anteriormente, o EPIC não consegue discretizar um sistema



complexo, apresentando simulações comprometidas quando uma bacia hidrográfica possui diferentes tipologias de relevo, cobertura vegetal e solos.

Neste contexto, Luo *et al.* (2023) recomendam que o EPIC seja empregado apenas para simulações em áreas com topografia, solos e uso da terra homogêneos, o que limita seu uso em estudos complexos, como aqueles realizados em grandes áreas.

Os modelos apresentados neste tópico não esgotam as opções disponíveis para a modelagem da perda de solo por erosão. Muito pelo contrário, representam uma seleção reduzida, porém composta pelos modelos mais empregados nos últimos anos e por aqueles que possuem forte ligação ou estruturação com a modelagem sistêmica.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria Geral dos Sistemas (TGS) impulsionou uma série de novos estudos e aprofundou o entendimento das dinâmicas de funcionamento dos sistemas físicos naturais. Consequentemente, influenciou a geografia, trazendo concepções teóricas e conceituais que, mais tarde, se tornariam fundamentais para a manutenção e o fortalecimento da identidade dessa ciência. Uma das áreas impactadas por essa influência foi o estudo das bacias hidrográficas.

Quando se considera que uma bacia hidrográfica está em equilíbrio dinâmico, reflete-se a ideia de que qualquer alteração em uma de suas partes desencadeará mudanças em sua totalidade. Em outras palavras, essa modificação afetará toda a bacia. Dessa forma, é essencial analisá-la como um sistema integrado. Um exemplo disso é a canalização e/ou retificação de um rio em determinado ponto da bacia, que pode impactar seu funcionamento e provocar modificações por erosão ao longo de toda a sua extensão.

Para compreender os processos de perda de solo em bacias hidrográficas por meio da abordagem sistêmica, é fundamental descrever os fatores que determinam a suscetibilidade de um solo ou de uma paisagem à erosão. A utilização da Equação Universal de Perda de Solo e suas reformulações, associadas a novos modelos, possibilita a estimativa das perdas de solo na bacia, permitindo a adoção de estratégias de controle para reduzir o risco de erosão. Dessa forma, destacam-se a importância e a relevância dos modelos matemáticos de estimativa de perda de solo, concebidos a partir dos princípios fundamentais da TGS.

A perda de solo por erosão é uma problemática global e representa um desafio significativo no Brasil. Esse estudo busca expandir o conhecimento sobre essa temática e alertar a sociedade para os impactos que a erosão provoca nos solos.

Nessa perspectiva, calcular e identificar o grau de perda de solo na bacia hidrográfica torna-se uma alternativa essencial para a formulação de políticas, o planejamento e o gerenciamento do



uso desses recursos em práticas agrícolas e outras atividades que dependem dos solos e das bacias hidrográficas.

Por fim, o diálogo entre as obras dos autores, quando trazido para o contexto da Geografia Física, demonstra o quão ricas e dinâmicas são as relações entre os sistemas aqui apresentados e os modelos destinados à estimativa da erosão, tornando-os mais compreensíveis e diversificados.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, K. H.; MOHAMMED, M. A.; SALIM, A.; ARIF, M.; GEMAN, O.; GUPTA, D.; KHANNA, A. Realizing an Effective COVID-19 Diagnosis System Based on Machine Learning and IoT in Smart Hospital Environment. **Ieee Internet Of Things Journal**, v. 8, n. 21, p. 15919-15928, 2021.

AMORIM, R. S. S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2003. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.

ARAÚJO, A. C. M.; GOUVEIA, L. B. Uma revisão sobre os princípios da teoria geral dos sistemas. **Estação Científica**, n.16, p.1-14, 2016.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1973.

BERTALANFFY, L. V. The theory of open systems in physics and biology. **Science**, v.111, p.23-29, 1950.

BIRCHER, P.; LINIGER, H. P.; PRASUHN, V. Comparison of long-term field-measured and RUSLE-based modelled soil loss in Switzerland. **Geoderma Regional**, v.31, p.e00595, 2022.

BUNGE, G. Ueber den Natrongehalt der Pflanzenaschen. **Justus Liebig's Annalen der Chemie**, v.172, n.1, p. 16-27, 1874.

CAO, Y.; HUA, L.; TANG, Q.; LIU, L.; CAI, C. Evaluation of monthly-scale soil erosion spatio-temporal dynamics and identification of their driving factors in Northeast China. **Ecological Indicators**, v.150, p.110187, 2023.

CAPRA, F. **A teia da vida: Uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 2006.

CARVALHO, D. F.; DURIGON, V. L.; ANTUNES, M. A. H.; ALMEIDA, W. S.; OLIVEIRA, P. T. S. Predição da erosão do solo com uso da Rusle e séries temporais de NDVI do Landsat 5 TM. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.3, p.215-224, 2014.

CHORLEY, R. J. **Models in Geomorphology**. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in Geography**. Londres: Methuen & Co., 1967. p. 43-96.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgar Blüncher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 3ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2015.



- COELHO, M. C. N. Impactos Ambientais em Áreas Urbanas: teorias, conceitos e métodos de pesquisa. In GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p.19-45.
- DORO, L.; WANG, X.; AMMANN, C.; MIGLIORATI, M. A.; GRÜNWALD, T.; KLUMPP, K.; LOUBET, B.; PATTEY, E.; WOHLFAHRT, G.; WILLIAMS, J. R. Improving the simulation of soil temperature within the EPIC model. **Environmental Modelling & Software**, v.144, p.105140, 2021.
- ECO, U. **Obra aberta: forma e indeterminação nas poéticas contemporâneas**. Trad. Sebastião Uchoa Leite. Revis. Celso Lafer e Haroldo de Campos. São Paulo: Perspectiva, 1976.
- EGNER, H.; ELVERFELDT, K. V. A bridge over troubled waters? Systems theory and dialogue in geography. **Area**, v.41, n.3, p.319-328, 2009.
- FALCÃO, C. L. C. A teoria geral dos sistemas e o entendimento dos processos erosivos em uma bacia hidrografia. **Revista Equador**, v.9, n.4, p. 21-39, 2020.
- FAO. **Status of the World's Soil Resources: Technical Summary**. FAO: Rome, 2015.
- FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, v. 6, n. 1, p. 209–247, 2016.
- FLOTEMERSCH, J. E.; LEIBOWITZ, S. G.; HILL, R. A.; STODDARD, J. L.; THOMS, M. C.; THARME, R. E. A Watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. **River research and applications**. v. 1671, p. 1654– 1671, 2016.
- GALDINO, S.; WEILL, M.A.M. Estimativa do fator topográfico (LS) da RUSLE para a bacia do alto Taquari – MS/MT, utilizando algoritmo do ângulo de inclinação limite para erosão/deposição. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO., 15., 2011. **Anais...** Curitiba: p.4813, 2011.
- GRAVELIUS, H. **FluBkunde**. Gosche'sche Verlagshandlung, Berlin, 1914.
- GRIGORIEV, A. A. OS FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA MODERNA GEOGRAFIA FÍSICA. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 27, p. 95–106, 2020.
- GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Conselho Nacional de Geografia. 8ed. Rio de Janeiro, 1993.
- JENNY, H. **Factors of soil formation: a System of Quantitative Pedology**. New York: Dover Publications Inc, 1941.
- KANT, I. **Crítica da Faculdade de Julgar**. Petrópolis: Editora Vozes, 2016.
- KHALEGHPANAH, N.; SHORAF, M.; ASADI, H.; GORJI, M.; DAVARI, M. Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan watershed, Iran. **Catena**, v.147, p.773-788, 2016.
- LE MOIGNE, J. L. **Qu'est-ce qu'un modele?.** *Confrontation Psychiatrique*, v.3, p.11-36, 1984.
- LIMA, W. P.; ZAKIA M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.
- LOPES, L. G. N.; SILVA, A.; GOURLART, A. C. O. A Teoria Geral do Sistema e suas aplicações nas ciências naturais. **Natureza on line**, v.13, n.1, p.1-5, 2015.



- LORENZON, A. S.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SANTOS, A. R.; CASTRO, N. L. M.; MARCATTI, G. E.; DOMINGUES, G. F.; TEIXEIRA, T. R.; SILVA, E.; SOARES, V. P.; MENEZES, S. J. M. C.; TELLES, L. A. A.; MOTA, P. H. S. A new methodology for royalties distribution of the Itaipu hydroelectric plant: The hydrographic basin as the unit of analysis. **Journal of Environmental Management**, v.217, p.710-717, 2018.
- LUO, Z.; ZHANG, H.; PANG, J.; YANG, J.; LI, M. Coupling of SWAT and EPIC Models to Investigate the Mutual Feedback Relationship between Vegetation and Soil Erosion, a Case Study in the Huangfuchuan Watershed, China. **Forests**, v.14, n.4, p.844, 2023.
- MACHADO, D. F. T.; CASTRO, S. S.; LADEIRA, F.; S.; B. A Geopedologia como abordagem metodológica para o levantamento de solos: uma breve discussão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.23, n.4, p.133-156, 2022.
- OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; DURÃES, M. F.; SILVA, A. M. Vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Verde, sul de Minas Gerais. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.3, p.262-269, 2014.
- PAIVA, M. H. R.; CARMO, D. D. F.; PRADO, R. B. Avaliação do impacto de iniciativas conservacionistas no serviço ecossistêmico de controle à erosão hídrica. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v.5, n.2,44-55, 2019.
- PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M; MAL, B.C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resources Management**, v.21, n.4, p.729-746, 2017.
- POUQUET, J. **Initiation géopédologique. Les sols et la géographie**. Paris: SEDES, 1966.
- PRINCIPI, P. **Geopedologia (Geologia Pedologica): Studio dei terreni naturali ed agrari**. Roma: Ramo Editoriale degli Agricoltori, 1953.
- RENARD, K. G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture Handbook**, usda n.703, p.1-384, 1998.
- SANTOS, A. M.; SOUZA, R. F.; CASTRO, F. C. Auto-organização da vegetação de caatinga em áreas salinizadas no município de Petrolina-PE. **Scientia Plena**, v.14, p.1-12, 2018.
- SANTOS, F. M.; PELINSON, N. P.; OLIVEIRA, R. P.; DI LOLLO, J. A. Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. **Catena**, v.222, p.106872, 2023.
- SANTOS, S. A.; SANTOS, A. M. Panorama da susceptibilidade à erosão dos solos em municípios do semiárido de Pernambuco. **Revista Equador**, v.10, n.3, p.1-25, 2021.
- SCHUMM, S. A. **The Fluvial System**. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- SHI, W.; CHEN, T.; YANG, J.; LOU, Q.; LIU, M. An improved MUSLE model incorporating the estimated runoff and peak discharge predicted sediment yield at the watershed scale on the Chinese Loess Plateau. **Journal of Hydrology**, v.614, p.128598, 2022.
- SMETS, T.; BORSELLI, L.; POESEN, J.; TORRI, D. Evaluation of the EUROSEM model for predicting the effects of erosion-control blankets on runoff and interrill soil erosion by water. **Geotextiles and Geomembranes**, v.29, n.3, p. 285-297, 2011.



STRAHLER, A. N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. **American Journal of Science**, v.248, 673-696, 1950.

STRAHLER, A. N. Systems Theory in Physical Geography. **Physical Geography**, v.1, n.1, p. 1-27, 1980.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Potencial Evapotranspiration and Water Balance**. Laboratory of Climatology Publication. 10ed. Centerton. N.Y.USA, 1957.

VALE, C. C. Teoria geral do sistema: histórico e correlações com a geografia e com o estudo da paisagem. **Entre-Lugar**. v.3, n.6, p.85-108, 2012.

WANG, S.; MCGEHEE, R. P.; GUO, T.; FLANAGAN, D. C.; ENGEL, B. A. Calibration, validation, and evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes with natural runoff plot data. **International Soil and Water Conservation Research**, v.11, n.2, p. 240-250, 2022.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor**. p. 244-252. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. U.S. Dep. Agr. ARS-S40. 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, D. C: USDA, 1978.

YU, H.; KONG, B.; HE, Z.; WANG, G.; WANG, Q. The Potential of Integrating Landscape, Geochemical and Economical Indices to Analyze Watershed Ecological Environment. **Journal of Hydrology**. v.583, p.1-40, 2020.

ZAVOIANU, I. **Morphometry of drainage basins**. Asterdam: Elsevier, 1985.

ZHU, R.; YU, Y.; ZHAO, J.; LIU, D.; CAI, S.; FENG, J.; RODRIGO-COMINO, J. Evaluating the applicability of the water erosion prediction project (WEPP) model to runoff and soil loss of sandstone reliefs in the Loess Plateau, China. **International Soil and Water Conservation Research**, v.11, n.2, p. 240-250, 2023.

ZINCK, J. A. **Physiography and soils**. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Lecture notes, 1988.

ZINCK, J. A.; METTERNICHT, G.; BOCCO, G.; VALLE, H. F. **Geopedology - An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies**. Switzerland: Springer, 2016.