

Rio de Janeiro, RJ / Novembro, 2025



Mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil

Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz⁽¹⁾, Margareth Simões⁽²⁾, Maurício Rizzato Coelho⁽¹⁾, José Francisco Lumbreras⁽¹⁾, Jesus Fernando Mansilla Baca⁽¹⁾, Pedro Luiz de Freitas⁽¹⁾, Evaldo de Paiva Lima⁽¹⁾, Ricardo de Oliveira Dart⁽³⁾, Patrick Calvano Kuchler⁽⁴⁾, Mateus Benchimol Ferreira de Almeida⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Pesquisadores, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. ⁽²⁾ Pesquisadora aposentada, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. ⁽³⁾ Analista, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. ⁽⁴⁾ Pesquisador visitante, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. ⁽⁵⁾ Bolsista, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

Resumo – Visando subsidiar a formulação e implementação de políticas públicas direcionadas ao desenvolvimento rural sustentável, a Embrapa Solos gerou os mapas de suscetibilidade e de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil na escala de 1:500.000. Este último foi elaborado a partir da integração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil com o mapa integrado de uso e cobertura da terra do Brasil (coleção 5.0 do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra do Brasil — MapBiomass; acrescida da classe de pastagens degradadas disponibilizadas pelo LAPIG/UFG). Por sua vez, o mapa de suscetibilidade do solo foi elaborado a partir da integração dos seguintes mapas temáticos intermediários, também gerados no escopo deste trabalho: (i) erodibilidade do solo; (ii) erosividade da chuva; (iii) classes de declividade (MDT/SRTM). O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento metodológico dos modelos/mapas de suscetibilidade e de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil. A modelagem baseou-se nas integrações temáticas supracitadas e no conhecimento especializado a fim de produzir mapas com cinco classes ordinais de suscetibilidade e vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica, a saber: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Todo o processamento foi realizado por meio da plataforma do Google Earth Engine de computação paralela em nuvem. Os modelos/mapas temáticos gerados demonstraram ser conceitualmente embasados e cartograficamente consistentes na escala de trabalho adotada. As informações geradas a partir dos modelos espaciais aqui apresentados permitem subsidiar ações de planejamento e gestão no meio rural, assim como a proposição de políticas públicas com foco no desenvolvimento rural sustentável.

Termos para indexação: degradação das terras; conservação do solo; planejamento conservacionista do uso da terra, erodibilidade do solo, erosividade da chuva.

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024.
Jardim Botânico
Rio de Janeiro, RJ
CEP: 22460-000

Fone: + 55 (21) 2179-4500

www.embrapa.br/solos
www.embrapa.br/fale-conosco/

Comitê Local de Publicações

Presidente

Cláudia Pozzi Jantalia

Secretário-executivo

Marcos Antônio Nakayama

Membros

Bernadete da Conceição

Carvalho Gomes Pedreira, David

Vilas Boas de Campos, Evaldo

de Paiva Lima, Helga Restum

Hissa, José Francisco Lumbreras,

Joyce Maria Guimarães Monteiro,

Lucia Raquel Queiroz Pereira

da Luz, Maurício Rizzato Coelho,

Wenceslau Gerales Teixeira

Edição executiva

Marcos Antônio Nakayama

Normalização bibliográfica

Luciana Sampaio de Araújo

(CRB-7/5165)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Alexandre Abrantes Cotta de Mello

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

Maps of Soil Susceptibility and Vulnerability to Water Erosion in Brazil

Abstract – In order to subsidize sectoral public policies, Embrapa Solos generated for the entire Brazilian territory, in the scale of 1:500,000, the soil vulnerability map to water erosion in Brazil. This map was generated from the integration of the soil susceptibility model to water erosion in Brazil with the integrated land use and cover map of Brazil (collection 5.0 of the Brazil Annual Land Cover and Use Mapping Project – MapBiomass; plus, the class of degraded pastures provided by LAPIG/UFG). In turn, the soil susceptibility model to water erosion in Brazil was elaborated from the integration of the following intermediate thematic maps: (i) soil erodibility; (ii) rain erosivity; (iii) slope classes (MDT/SRTM). This work has as its exclusive objective to present the methodological development of the models of soil susceptibility and soil vulnerability to water erosion in Brazil. The modelling was based on thematic integration and expert knowledge and thus maps were generated with five ordinal classes of intensity - very low; low; average; high; very high. All processing was carried out through the cloud parallel platform. The resulting thematic models/maps proved to be conceptually grounded, and, except for the limitations and adaptations due to the 1:500,000 scale, they also showed to be cartographically consistent. The information generated from the spatial models presented allows to support sectoral planning and management actions, as well as the proposition of public sectorial policies.

Index Terms: land degradation, soil conservation, land use conservation planning, sectoral public policy.

Introdução

Cerca de um terço das áreas de produção agropecuária do mundo encontra-se com algum grau de degradação (Montanarella et al., 2015). Especificamente, as causas da degradação dos solos agrícolas são diversas, mas geralmente se devem a uma combinação de fatores naturais e antrópicos, como a suscetibilidade intrínseca do solo e seu uso ou manejo inadequados. Dentro da perspectiva dos fatores naturais, destaca-se a erosão hídrica como um dos processos preponderantes de degradação dos solos agrícolas, sobretudo nas regiões tropicais, cujo regime de precipitação pluvial apresenta, normalmente, alta erosividade.

Diferentes fatores ambientais intervêm no processo de erosão hídrica. O solo, como fator passivo, corresponde ao subsistema que sofre o processo de

erosão. O clima, como fator ativo, fornece a energia através da precipitação pluvial que põe em ação o processo erosivo. O relevo e a vegetação, por sua vez, atuam como fatores intervenientes de controle, pois podem acentuar ou atenuar o processo erosivo. Destaca-se, no entanto, que a erosão, enquanto processo natural, pode ser maximizada ou minimizada por fatores antrópicos, como o manejo e o uso do solo relacionados às atividades agropecuárias (Lal, 2001; Guerra et al., 2014; García-Ruiz et al., 2017).

Os processos erosivos causam, de forma direta, severos impactos nos sistemas agrícolas, uma vez que destroem as propriedades físicas do solo e conduzem à perda da matéria orgânica, de fertilizantes e de seus nutrientes (Dechen et al., 2015; Lal, 2017). A erosão do solo causa impactos agroambientais que se traduzem em perdas econômicas significativas para os agricultores, visto que comprometem a própria base da produção agropecuária, que é a capacidade produtiva do solo (Dechen et al., 2015). Entretanto, também causam marcantes alterações nos sistemas naturais relacionados à dinâmica hidrossedimentológica das bacias hidrográficas. A diminuição da infiltração da água no solo e o aumento do escoamento superficial são acentuados pelo processo de erosão do solo, comprometendo a recarga dos aquíferos freáticos e aumentando a produção de sedimentos, que causam o assoreamento de corpos d'água superficiais e alteram os ecossistemas aquáticos a jusante.

A despeito da evidência do problema e dos esforços das instituições de assistência técnica e extensão rural na divulgação das técnicas de controle, a erosão dos solos agricultáveis causada pelo seu preparo inadequado ainda é, em muitas regiões do mundo, a maior ameaça à segurança alimentar e à sustentabilidade dos sistemas produtivos (Pennock, 2019). Como destacam Lal e Stewart (1990), a degradação por erosão dos solos agricultáveis constitui um grande desafio a ser enfrentado pelos países produtores, visto que a perda da capacidade produtiva do solo se interpõe à sustentabilidade da agricultura.

A degradação do solo por erosão é um problema global que ameaça a sustentabilidade da agropecuária e a subsistência do meio rural, pois, ao comprometer a capacidade produtiva do solo, diminui a disponibilidade de terras e a produção de alimentos. Afeta ainda a produção e a qualidade da água, além de outros serviços ecossistêmicos (Pennock, 2019).

No Brasil, estimativas apresentadas por Hernani et al. (2002) apontam para perdas de cerca de 820 milhões de toneladas de solo por ano devido à erosão hídrica. Contabilizando apenas a perda de nutrientes no ano de 2000, os autores calcularam um custo de US\$ 2,64 bilhões, o equivalente

a aproximadamente 5,6% do Produto Interno Bruto (PIB) da agropecuária no período. Tomando-se como referência o ano de 2017 — quando o setor agropecuário ocupava 31% do território nacional: 81 milhões de hectares com agricultura (10% da área do País) e 179 milhões de hectares com pastagens (21%) —, um estudo conduzido por Polidoro et al. (2021) avaliou os impactos econômicos da erosão no Brasil, caso os sistemas de produção fossem conduzidos sem práticas conservacionistas e com preparo convencional de solo. Os autores, considerando uma perda média de 11 t ha^{-1} , estimaram que a perda anual de solo por erosão hídrica no país seria em torno de 3,1 bilhões de toneladas. Considerando ainda que, além da perda do solo, diversos insumos (adubos, sementes e mudas) são perdidos, os autores estimaram que as perdas econômicas atingiriam cerca de 15,7 bilhões de dólares por ano, sendo que 27% desse prejuízo potencial ocorreria em áreas com culturas anuais e 47% em áreas de pastagens degradadas.

Dessa forma, a erosão hídrica, acelerada pelo uso e manejo inadequados do solo, deve ser considerada como um dos mais graves problemas ambientais que a humanidade enfrenta na atualidade, na medida em que ocasiona a remoção da camada mais rica do solo, com a consequente perda de nutrientes, poluição e assoreamento dos cursos d'água, enchentes e queda acentuada da produtividade agrícola (Dominati et al., 2010; Feng et al., 2010). Se considerarmos um cenário de crescimento da população mundial e de aumento da demanda por produtos agropecuários e florestais, a pressão sobre os recursos solo e água se intensificará ainda mais, podendo levar o mundo a um quadro de extrema insegurança alimentar e instabilidade socioeconômica. Além disso, na dimensão socioeconômica, o problema da erosão e da perda de solos férteis tem forte influência na diminuição da oferta de emprego e renda na área rural. A desvalorização da propriedade rural, o abandono de terras anteriormente produtivas e o êxodo rural com migração de expressivos contingentes para os grandes centros, agravam os problemas relacionados aos aglomerados urbanos.

Desse modo, a questão da mitigação da erosão e da utilização de práticas de conservação do solo tem emergido como um imperativo na discussão sobre a sustentabilidade da agricultura e vem ganhando cada vez mais relevo nas agendas políticas ao redor do mundo. Ações eficazes e coordenadas precisam ser promovidas de maneira célere para resolver esse grave problema (Pennock, 2019).

Neste contexto, as Nações Unidas (ONU) estabeleceram, no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o objetivo de número

15: “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade” (Nações Unidas, 2025), que explicitamente faz menção à problemática em tela. A mesma Agência, por meio da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), lançou as Diretrizes Voluntárias para as Políticas Agroambientais, que, dentre vários objetivos, destacam a questão da degradação do solo (FAO, 2017). Entidades científicas, como o Global Soil Partnership (GSP), recorrentemente têm destacado a questão da necessidade de conservação do solo. Políticas públicas, no âmbito nacional, também têm expressado preocupação com a degradação do solo, como o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC+ do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Brasil, 2012) e o Programa Nacional de Conservação de Recursos Naturais e Desenvolvimento Rural em Microbacias Hidrográficas — Águas do Agro (Brasil, 2021), cujo propósito é fomentar as práticas de conservação de solos e água no nível de bacia hidrográfica, promovendo, assim, o desenvolvimento sustentável das comunidades de produtores rurais.

Nesse sentido, o desenvolvimento de metodologias para qualificar e quantificar, real ou potencialmente, a degradação dos solos agrícolas causada pelos processos erosivos é de suma importância no apoio às políticas públicas e aos processos de tomada de decisão no tocante à alocação de investimentos para o combate e controle da erosão (Pennock, 2019).

O mapeamento das áreas com solos suscetíveis e potencialmente vulneráveis à erosão hídrica permite, portanto, prover informações relevantes para a proposição de políticas setoriais e para a gestão e o planejamento conservacionista do uso do solo no Brasil. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados e a metodologia proposta e desenvolvida para a geração de dois modelos espaciais/mapas temáticos: (i) suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil e (ii) vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil.

Este trabalho atende ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 15 — Vida Terrestre — que objetiva proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade — estipulado pelas Nações Unidas (ONU), mais especificamente à submeta 15.3, que pretende até 2030, combater a

desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo (Nações Unidas, 2025).

Fundamentação teórica

Na literatura científica nacional e internacional são encontrados inúmeros trabalhos sobre risco ou perda de solo por erosão. Muitos deles se concentram na aplicação de modelos para estimar a perda de solo real ou potencial de uma determinada área geográfica ou em função de algum tipo de uso ou cobertura da terra em especial (Le Roux et al., 2005; Bonilla et al., 2009; Kouli et al., 2009; Fathizad et al., 2014; Panagos et al., 2015; Borrelli et al., 2017; Gaubi et al., 2017); outros tantos objetivam modelar a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica ou eólica para estabelecer o nível de risco de degradação (Bartsch et al., 2002; Vrieling et al., 2002; Lu et al., 2004; Mello et al., 2006; Conoscenti et al., 2008; Yuksel et al., 2008; Akgün; Türk, 2011; Rabia, 2012; Valladares et al., 2012; Caldas et al., 2019).

Os trabalhos supracitados evidenciam que o conhecimento da suscetibilidade dos solos aos processos erosivos para a identificação de áreas mais propensas à ocorrência do fenômeno tem sido considerado de grande importância para subsidiar programas de conservação dos solos. Desse modo, diversos métodos qualitativos ou quantitativos têm sido aplicados com sucesso por muitos pesquisadores ao redor do mundo para o mapeamento da suscetibilidade do solo à erosão (Abdulkadir et al., 2017).

Os modelos de previsão de perda de solo, dos quais se derivam variáveis latentes, qualitativas, ou seja, variáveis que não são diretamente observáveis, como a suscetibilidade ou a vulnerabilidade do solo à erosão, podem ser classificados como: modelos empíricos, modelos de base física ou modelos conceituais (Mulligan; Wainwright, 2004 citados por Kushwaha; Yousuf, 2017). Os modelos empíricos são formalizados a partir de funções matemáticas simples que se ajustam aos dados observados, descrevendo o comportamento geral do sistema a partir da observação das variáveis que o compõem (Mulligan; Wainwright, 2004 citados por Kushwaha; Yousuf, 2017). Os modelos empíricos mais usados para previsão de perda de solo, são a Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier; Smith 1978) e a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard et al., 1991).

Os modelos de base física se alicerçam em equações físicas fundamentais que descrevem

deterministicamente os processos envolvidos no fenômeno da erosão hídrica dos solos. A maioria desses modelos se baseia na lei da conservação de massa e energia, utilizando a equação diferencial de continuidade (Morgan, 1995). A ferramenta de Previsão de Erosão Hídrica (Water Erosion Prediction Project - WEPP) (Laflen et al., 1991) constitui exemplo de modelo baseado nos processos físicos. Os modelos conceituais explicam o comportamento do fenômeno com base no conhecimento sobre o funcionamento do sistema. O modelo de avaliação da qualidade da água em áreas rurais, Agricultural Non-Point Source Model (AGNPS) (Young et al., 1989) constitui um exemplo de modelo conceitual (Mulligan; Wainwright, 2004 citados por Kushwaha; Yousuf, 2017).

No presente trabalho, adotou-se, como abordagem metodológica, a modelagem conceitual para a geração do modelo de suscetibilidade do solo à erosão hídrica. O conceito de vulnerabilidade ambiental adotado baseia-se na condição ou estado apresentado por um determinado sistema, natural ou antrópico, decorrente de três fatores: (i) da sensibilidade natural do sistema, expressa na capacidade intrínseca do sistema de resistir ou favorecer a ação dos fatores de pressão ou impacto, (ii) da condição de exposição do sistema aos fatores de pressão ou impacto, e (iii) da capacidade de adaptação ou recuperação do sistema após a ação dos fatores de pressão ou impacto. O primeiro fator diz respeito à suscetibilidade natural do sistema em sofrer alterações funcionais e/ou estruturais se for submetido às ações de pressão e alterações em um ou mais dos seus subsistemas componentes. O segundo fator expressa o grau de exposição do sistema aos fatores de pressão ou a probabilidade de ocorrência de eventos impactantes que podem levá-lo a uma nova condição. E, por fim, o terceiro fator introduz a noção de resiliência do sistema sob impacto, ou seja, a capacidade do sistema em retornar a uma condição de equilíbrio após cessar a ação (Tricart, 1977; Adger, 2006; Nascimento; Dominguez, 2009; Oliveira et al., 2013; Aquino et al., 2017).

Neste trabalho, considerou-se que o primeiro e o terceiro fatores, combinados, traduzem o conceito de suscetibilidade natural, que, uma vez confrontada com os fatores de pressão, configura a vulnerabilidade ambiental. Desse modo, o conceito de “vulnerabilidade” aqui tratado expressa a ideia de risco ambiental, ou seja, o risco de o sistema ser alterado em relação à sua condição inicial, presumivelmente de maior equilíbrio. Quanto maior for a suscetibilidade de natural e mais intensos forem os fatores de pressão, mais vulnerável estará o sistema em questão. Evidentemente, o oposto também é verdadeiro. Por

exemplo, um sistema que seja considerado muito suscetível por sua constituição natural, se não estiver sob risco de pressão iminente, pode não estar na mesma condição de vulnerabilidade que outro que, mesmo sendo pouco suscetível, encontra-se sob forte pressão antrópica. O presente trabalho objetivou gerar um modelo espacial de vulnerabilidade ambiental relacionada aos processos erosivos, aqui identificado como vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, o qual pudesse expressar o risco potencial de degradação dos solos agrícolas em função do grau de exposição destes aos agentes erosivos. O grau de exposição, por sua vez, é função dos tipos de uso aos quais os solos são submetidos ou de sua cobertura vegetal natural.

Cumpra esclarecer que, do ponto de vista geomorfológico, o fenômeno da erosão constitui todo o ciclo de produção, transporte e deposição de sedimentos clásticos, constituindo, assim, uma força incoercível, responsável por esculpir, em escala de tempo geológico, o modelado geomorfológico, dando origem às diversas formas de relevo. Do ponto de vista pedológico, a erosão é um fenômeno mais localizado, podendo ocorrer e ser medido em uma pequena escala de tempo (diária, mensal, anual), caracterizando-se como um processo com grande poder de degradar os solos. Em geral, inicia-se como formas mais difusas, identificadas como erosão laminar, que podem evoluir para feições concentradas em sulcos erosivos, descritos quanto à intensidade e à frequência de ocorrência no terreno, e que, por fim, podem chegar a voçorocamentos. Estas são caracterizadas por feições severas que podem atingir dezenas de metros de largura, profundidade e comprimento.

Os processos erosivos que atuam em um dado agroecossistema podem ser simplificados e mais bem compreendidos a partir da análise de seus fatores intervenientes. Por óbvio, o solo, como fator passivo, representa o subsistema que recebe os efeitos do processo de erosão. Entretanto, o clima confere matéria e energia para desencadear e manter em curso o processo erosivo, atuando, assim, como o fator ativo. O modelado topográfico, notadamente a declividade e o comprimento de rampa das vertentes, juntamente com a cobertura vegetal, antropizada ou natural, constitui os fatores de controle, pois atua acentuando ou atenuando o referido processo.

Dentre os fatores que influenciam na magnitude do processo erosivo, estão: i) o tipo de solo, em função da sua constituição físico-química, mineralógica e morfológica; ii) o clima, sobretudo em relação aos padrões pluviométricos; iii) o relevo, expresso pela topografia do terreno (declividade e comprimento de

rampa); e iv) a cobertura vegetal, natural ou antrópica (Bertoni; Lombardi Neto, 2005). A erosão do solo, portanto, é um processo complexo que envolve a combinação de vários fatores, os quais variam em magnitude, conforme processos condicionantes e local de ocorrência (Carvalho et al., 2009).

Conceitualmente, a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, na forma como é considerada neste trabalho, expressa o grau de risco em que o subsistema solo se encontra, considerando as suas características intrínsecas que conferem maior ou menor resistência aos processos erosivos, a sua posição topográfica na paisagem, o clima ao qual está submetido e o nível de exposição ou proteção em função do tipo de uso ou da cobertura vegetal. Desse modo, para se chegar à vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, foi necessário elaborar um modelo espacial da suscetibilidade do solo à erosão hídrica a partir da elaboração de três outros modelos, a saber: (i) erodibilidade do solo, (ii) erosividade da chuva, e (iii) classe de declividade.

A erodibilidade do solo corresponde ao fator K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE - *Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier; Smith, 1965, 1978). O conceito, em estrito senso, corresponde a uma variável física definida pelo índice de erodibilidade (fator K da USLE expresso em $\text{Mg h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que corresponde à perda de solo (Mg ha^{-1}) ocasionada por cada unidade do índice de erosividade (fator R da USLE) das chuvas ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Significa dizer que, em condições específicas de chuva, determinadas classes de solo podem ser comparadas quantitativamente por meio do índice K, que expressa uma escala relativa de valores de erodibilidade (Wischmeier; Smith, 1978). No presente trabalho, no entanto, o termo “erodibilidade do solo” foi empregado em sentido lato e qualitativo, ou seja, corresponde ao comportamento de cada classe de solo em função de seus atributos, que lhes conferem graus relativos de resistência aos processos erosivos.

Por sua vez, a erosividade da chuva é uma medida do potencial erosivo relacionado aos padrões de precipitação pluviométrica, tais como intensidade, duração e frequência dos eventos de chuva de determinada localidade, correspondendo ao fator R da USLE, medido em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Wischmeier; Smith, 1965, 1978; Pruski, 2009).

Como comentado anteriormente, o relevo constitui um fator interveniente extremamente importante no processo de erosão, visto que interfere na cinética da água, atenuando ou maximizando o potencial erosivo das chuvas. As variáveis morfológicas mais importantes no processo de erosão

do solo, descritivas das formas de relevo, são, além da forma das vertentes, a declividade e o comprimento de rampa. Para a análise dessas variáveis, é necessária a construção de modelos digitais do terreno (MDT), que constituem modelos baseados na interpolação de um conjunto de dados altimétricos representados por coordenadas (x, y, z), em que se simula uma superfície contínua que expressa as variações de altitude do terreno (Liporaci et al., 2003). Portanto, a partir de um MDT, pode-se derivar diferentes modelos relacionados às variáveis morfométricas da superfície do terreno, dentre os quais os mais utilizados são os modelos de declividade. Conceitualmente, a declividade é a inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal, ou seja, a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre os mesmos, podendo ser expressa em graus ou em porcentagem.

Como fator de pressão antrópica, considerou-se o uso e a cobertura do solo como o fator mais apropriado, visto que cada tipo de cobertura vegetal exerce um determinado nível de proteção ou exposição do solo aos agentes erosivos. A cobertura vegetal desempenha notório papel de controle dos processos erosivos, uma vez que as áreas bem vegetadas interferem como

atenuante da cinética do processo erosivo por meio da interceptação das gotas de chuva, promovendo maior infiltração e menor escoamento superficial da água.

Material e métodos

Abordagem metodológica geral

Em termos gerais, a metodologia aqui proposta baseia-se na modelagem conceitual de integração temática dos diferentes fatores intervenientes no processo de erosão hídrica do solo. Dessa forma, pode ser subdividida em duas etapas distintas. A primeira teve como objetivo a elaboração de um modelo espacial de suscetibilidade do solo à erosão hídrica, enquanto a segunda etapa integrou o modelo anterior ao mapa de uso e cobertura da terra, considerado como um fator interveniente e indicador da pressão antrópica. Os resultados dessa integração são os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, em escala nacional, para o ano de 2019. A Figura 1 apresenta o modelo conceitual de integração temática para a elaboração dos modelos de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica (ano de 2019).

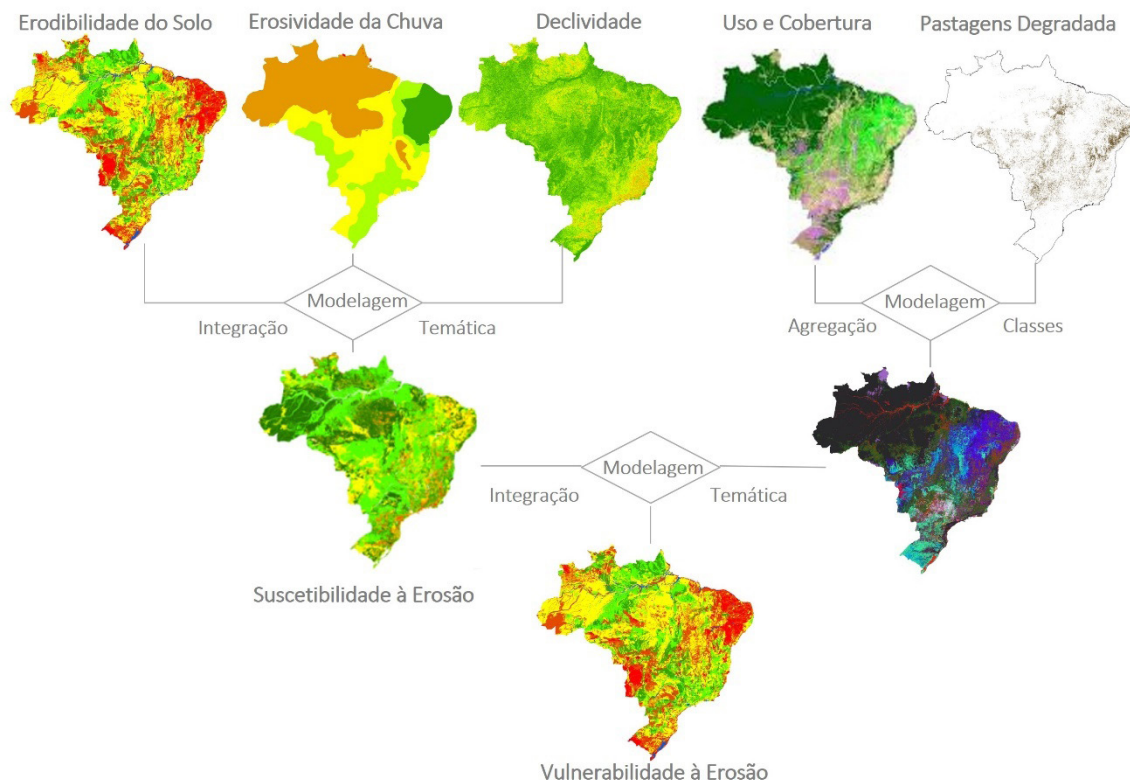


Figura 1. Modelo conceitual de integração temática para a elaboração dos mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil.

Mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil

Descrição

O mapa temático da suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil constitui um modelo espacial, em escala nacional, que expressa a sensibilidade do solo à erosão hídrica em sua ambiência, ou seja, considerando a situação topográfica e as condições climáticas em que o solo se encontra. Os níveis de suscetibilidade dos solos à erosão hídrica são representados em cinco classes ordinais de intensidade, a saber: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Dados de entrada

A metodologia para a elaboração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil consistiu na integração temática dos três principais fatores intervenientes do processo de erosão hídrica, representados pelos seguintes dados de entrada, respectivamente:

- 1) Erodibilidade do solo do Brasil: carta temática gerada a partir da interpretação pedológica, por meio de conhecimento especializado, considerando os quatro primeiros componentes de todas as unidades de mapeamento do mapa de solos do Brasil, escala 1:250.000 (IBGE, 2018). Os diferentes níveis de erodibilidade do solo foram representados em cinco classes ordinais de intensidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.
- 2) Erosividade da chuva do Brasil (Lima et al., 2023): mapa da erosividade da chuva baseado em estimativas anuais do Fator R para todo o Brasil, a partir dos dados mensais de precipitação da rede de Zoneamento Agrícola do Risco Climático (ZARC) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e um conjunto de equações apresentadas no trabalho de Oliveira et al. (2013), exceto para a região Norte do Brasil, para a qual foi utilizada a equação proposta no trabalho de Barbosa et al. (2015). Os diferentes níveis de erosividade da chuva foram representados em cinco classes ordinais de intensidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.
- 3) Classes de declividade: a carta de declividade do terreno foi gerada a partir de um modelo digital do terreno com base nos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para pixel de 30 m (EROS Data Center, 2018). A variável foi dividida em cinco classes de declividade de acordo com os intervalos das classes de relevo estabelecidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018),

a saber: muito baixa (relevo plano: $\leq 3\%$ de declividade), baixa (relevo suave ondulado: $> 3\%$ a $\leq 8\%$ de declividade), média (relevo ondulado: $> 8\%$ a $\leq 20\%$ de declividade), alta (relevo forte ondulado: $> 20\%$ a $\leq 45\%$ de declividade) e muito alta (relevo montanhoso: $> 45\%$ a $\leq 75\%$ de declividade). Cabe salientar que as áreas com declividade superior a 75%, que correspondem às feições de relevo escarpado, foram consideradas inaptas para as atividades agropecuárias e, portanto, excluídas do modelo de declividade e cartografadas como classe especial.

Em termos de escala cartográfica, ressalta-se que os modelos de entrada (erodibilidade do solo e erosividade da chuva), assim como os derivados (suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica), constituem camadas matriciais, ou seja, são representadas no formato *raster* por unidades discretas (pixels) que foram reamostradas/rasterizadas em pixels de 30 m x 30 m devido à necessidade de compatibilizá-los com o modelo digital de terreno, derivado dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM/NASA), originalmente disponibilizados com 30 m de resolução espacial. Portanto, os mapas gerados não possuem escala de detalhamento compatível com a resolução espacial de 30 m, uma vez que os referidos modelos de entrada possuem escalas menos detalhadas, compatíveis com a escala nacional. Como o mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil foi gerado a partir do mapa de erodibilidade do solo, derivado do mapa de solo do Brasil, em escala 1:250.000 (IBGE, 2018), e do modelo de erosividade da chuva elaborado a partir de dados com densidade amostral a nível nacional, o mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica aqui produzido é considerado compatível com uma escala cartográfica de 1:500.000. Consequentemente, o mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil também possui a mesma escala.

Modelagem

A metodologia para a elaboração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil consistiu na integração temática dos três principais fatores intervenientes do processo de erosão hídrica. Assim, utilizaram-se os seguintes modelos de entrada: i) mapa de erodibilidade do solo do Brasil¹, ii) mapa de erosividade da chuva do Brasil (Lima et al., 2023) e iii) modelo digital do terreno, com

¹ Acesse o *Mapa de erodibilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil* no Geoinfo: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/1708>.

30 m de resolução espacial (EROS Data Center, 2018). Os dois primeiros modelos de entrada foram rasterizados e reamostrados em matrizes com pixels de 30 m x 30 m, visando compatibilizá-los com o MDT, gerado originalmente com 30 m de resolução espacial. Os três mapas foram segmentados em cinco classes ordinais de intensidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. A classificação foi realizada a partir de regras tácitas baseadas em conhecimento especializado a partir das quais foi elaborada a matriz de classificação que integra as variáveis intervenientes no processo de erosão do solo, mostrada na Figura 2.

Cabe destacar que se considerou adequado, nos casos de relevo ondulado, forte ondulado e montanhoso, atribuir um maior peso para o fator erodibilidade do solo, por considerar que, nessas condições, o risco à erosão é significativamente alto, mesmo com chuvas relativamente menos erosivas.

Algumas áreas não foram avaliadas e classificadas quanto à suscetibilidade à erosão, mas apenas cartografadas, visto tratar-se de áreas especiais. Elas compreendem: (i) afloramentos de rocha; (ii) as áreas de solos degradados e/ou em estágio avançado de erosão (fase erodida oriunda do mapa de solos do Brasil); (iii) parte das áreas de proteção ambiental (dunas e praias); (iv) áreas escarpadas; (v) áreas urbanas e corpos d'água (IBGE, 2018). A legenda do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica é mostrada na Figura 3.

Mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil

Descrição

O mapa da vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil constitui um modelo espacial, em escala nacional, que expressa o grau de

Símbolo	Classe de suscetibilidade à erosão
	Suscetibilidade à erosão muito baixa (MB)
	Suscetibilidade à erosão baixa (B)
	Suscetibilidade à erosão moderada (M)
	Suscetibilidade à erosão alta (A)
	Suscetibilidade à erosão muito alta (MA)
Símbolo	Áreas a serem preservadas e/ou recuperadas
	Áreas erodidas
	Duna (e praia)
	Escarpa (> 75% de declividade)
Símbolo	Outras áreas
	Afloramento de rocha
	Corpo d'água
Hachura 90°	Área urbana

Figura 3. Legenda do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica.

vulnerabilidade do solo aos processos erosivos, considerando o nível de exposição em função da cobertura vegetal natural e/ou do uso agropecuário. Os níveis de vulnerabilidade são representados em cinco classes nominais de intensidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Dados de entrada

Compreendem os seguintes dados: i) mapa da suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil (ver item 3.2) e ii) mapa de uso e cobertura do solo (Projeto MapBiomias, 2018, coleção 5) e Mapeamento de áreas de pastagem (MapBiomias/LAPIG/UFG).

Uso e cobertura do solo

O uso e cobertura do solo, que corresponde ao fator C da Equação Universal de Perda de Solo (USLE — Universal Soil Loss Equation)

Declividade x erosividade	Relevo plano					Relevo suave-ondulado					Relevo ondulado					Relevo forte-ondulado					Relevo montanhoso						
	Decliv.: 0% a ≤ 3% (MB)					Decliv.: > 3% a ≤ 8% (B)					Decliv.: > 8% a ≤ 20% (M)					Decliv.: > 20% a ≤ 45% (A)					Decliv.: > 45% a ≤ 75% (MA)						
	11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	31	32	33	34	35	41	42	43	44	45	51	52	53	54	55		
Erosividade da chuva	MB	100	111	112	113	114	115	121	122	123	124	125	131	132	133	134	135	141	142	143	144	145	151	152	153	154	155
	B	200	211	212	213	214	215	221	222	223	224	225	231	232	233	234	235	241	242	243	244	245	251	252	253	254	255
	M	300	311	312	313	314	315	321	322	323	324	325	331	332	333	334	335	341	342	343	344	345	351	352	353	354	355
	A	400	411	412	413	414	415	421	422	423	424	425	431	433	433	434	435	441	442	543	444	445	451	452	453	454	455
	MA	500	511	512	513	514	515	521	522	523	524	525	531	533	533	534	535	541	542	543	544	545	551	552	553	554	555
		MB	B	M	A	MA	MB	B	M	A	MA	MB	B	M	A	MA	MB	B	M	A	MA	MB	B	M	A	MA	
Erodibilidade do solo																											
Classe de suscetibilidade à erosão																											
Muito baixa (MB)					Baixa (B)					Moderada (M)					Alta (A)					Muito alta (MA)							

Figura 2. Matriz de classificação utilizada para geração do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica a partir da integração temática entre o mapa de Erodibilidade dos Solos do Brasil, o mapa de Erosividade da Chuva do Brasil e as Classes de Declividade derivada dos dados do SRTM — 30 m.

Fonte: EROS Data Center (2018), Lima et al. (2023) e Coelho et al. (2024).

(Wischmeier; Smith, 1978), foi obtido das seguintes fontes: Projeto MapBiomias (2018) e Universidade Federal de Goiás (2019). Enquanto da primeira foram obtidas as classes de uso e cobertura do solo (Tabela 1), da segunda obteve-se a classe de pastagens degradadas do Brasil. Justifica-se a utilização da classe de “pastagens degradadas” tendo em vista que ocorrem em todos os biomas e ocupam expressivas áreas no país: 63.745.727 ha (Universidade Federal de Goiás, 2019). Além disso, por apresentarem algum grau de degradação, são áreas sensíveis e mais sujeitas aos fatores erosivos em relação às áreas de pastagens consideradas não degradadas. Cabe esclarecer que a área de pastagem degradada do Lapig (Universidade Federal de Goiás, 2019) constitui um detalhamento que se sobrepõe ao mapa de pastagem publicado pelo Projeto MapBiomias (2018), que também foi gerado pelo mesmo laboratório. Desse modo, foi realizada uma integração temática sem reclassificação, visto que apenas se objetivou a agregação de mais uma classe para a base temática de Uso e Cobertura integrada.

Tabela 1. Classes de uso e cobertura do solo classificadas quando à vulnerabilidade do solo à erosão hídrica e suas respectivas extensões territoriais.

Classe de uso e cobertura do solo	Área (ha)
Floresta	
Formação florestal	415.176.280
Formação savânica	89.175.522
Floresta plantada	8.609.301
Formação natural não florestal	
Área úmida natural não florestal	2.618.674
Formação campestre	47.222.478
Outra formação não florestal	13.346.573
Agropecuária	
Culturas anuais e perenes	49.917.797
Culturas semiperenes	10.239.796
Mosaico de agricultura e pastagem	17.696.376
Pastagem	110.168.677
Pastagem degradada	63.745.727
Área não vegetada	
Área não vegetada	5.427.752

Fonte: Projeto MapBiomias (2018) e Universidade Federal de Goiás (2019).

Modelagem

O mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica foi elaborado a partir da integração temática baseada em conhecimento especializado da base integrada de uso e cobertura da terra, gerado a partir da união das classes do MapBiomias (coleção 5) (Projeto MapBiomias, 2018) com o layer de pastagens degradadas (Universidade Federal de Goiás, 2019), com o mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica, gerando o mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil. Os modelos de entrada e saída foram reamostrados em matrizes com pixels de 30m x 30m e segmentados em cinco classes de intensidade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

A partir de adaptação de propostas de Salomão (1999) e Ross (2005), as classes de uso e cobertura do solo, compiladas dos mapeamentos do Projeto MapBiomias (2018) e da Universidade Federal de Goiás (2019), foram associadas com classes de grau de ação erosiva, conforme a seguir:

(1) Muito baixa: Florestas e matas naturais.

(2) Baixa: Formações arbustivas naturais, matas secundárias, cerrados e capoeiras; cobertura vegetal com porte alto a médio, com atividade antrópica muito reduzida.

(3) Moderada: Cultivos de ciclo longo, pastagem, silvicultura; com atividade antrópica reduzida.

(4) Alta: Culturas de ciclo longo com baixa densidade, culturas de ciclo curto; com atividade antrópica moderada.

(5) Muito alta: Áreas desmatadas, solo exposto, agricultura não conservacionista; com intensa atividade antrópica.

Foi elaborada uma matriz de classificação que integra as variáveis intervenientes da vulnerabilidade do solo à erosão hídrica no Brasil, na qual a tipologia de uso e cobertura do solo foi ponderada, individualmente, considerando a sua interação com as áreas classificadas com diferentes níveis de suscetibilidade do solo à erosão hídrica (Figura 4).

A intensidade da vulnerabilidade do solo à erosão hídrica foi representada em 5 classes: (1) Muito baixa, (2) Baixa, (3) Moderada, (4) Alta e (5) Muito alta.

Tal como se procedeu para o mapa de suscetibilidade, algumas áreas não foram avaliadas quanto à vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, mas apenas delimitadas no mapa. Estas compreendem: (i) afloramentos de rocha; (ii) áreas erodidas, oriundas do mapa de solos do Brasil (IBGE, 2018); (iii) parte das áreas de proteção ambiental (mangues, apicuns, dunas e praias) (IBGE, 2018; Projeto MapBiomias, 2018); (iv) áreas escarpadas (IBGE, 2018); (v) áreas de mineração (Projeto

Exposição aos processos erosivos pelo uso e cobertura do solo		Susceptibilidade à Erosão				
		Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
1	Formação florestal - ff	11	21	31	41	51
2	Formação savânica - fs	12	22	32	42	52
3	Floresta plantada - fp	13	23	33	43	53
4	Área úmida natural não florestal - fu	14	24	34	44	54
5	Formação campestre - fc	15	25	35	45	55
6	Outra formação não florestal - fo	16	26	36	46	56
7	Pastagem - pp	17	27	37	47	57
8	Pastagem degradada - pd	18	28	38	48	58
9	Cultura semiperene - cs	19	29	39	49	59
10	Mosaico de agricultura e pastagem - cp	110	210	310	410	510
11	Cultura anual e perene - ca	111	211	311	411	511
12	Área não vegetada - nv	112	212	312	412	512

Classe de susceptibilidade à erosão				
Muito baixa (MB)	Baixa (B)	Moderada (M)	Alta (A)	Muito alta (MA)

Figura 4. Matriz de classificação da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica a partir da integração entre o modelo espacial de susceptibilidade dos solos à erosão hídrica e o mapa integrado de uso e cobertura da terra.

MapBiomias, 2018); (vi) aquicultura (Projeto MapBiomias, 2018); (vii) áreas urbanas (IBGE, 2018; Projeto MapBiomias, 2018); e (viii) corpos d'água (IBGE, 2018; Projeto MapBiomias, 2018). A legenda do mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica é mostrada na Figura 5.

Validação

Por tratar-se de uma modelagem baseada em regras de conhecimento aplicadas à integração de fatores causais de fenômenos latentes — “susceptibilidade” e “vulnerabilidade” —, ou seja, não objetivos ou passíveis de observação direta, não se pode aplicar algum método explícito de validação com análise de acurácia. Contudo, foram realizadas avaliações baseadas em conhecimento especializado em determinadas áreas localizadas no Estado do Rio de Janeiro. Quanto à validade dos dados de entrada utilizados, observa-se que: (i) o mapa de erodibilidade² foi gerado de forma criteriosa e consensual a partir do conhecimento de diferentes especialistas com vasta experiência em pedologia; (ii) o mapa de erosividade da chuva (Lima et al., 2023) foi gerado com séries pluviométricas consistidas e equações referenciadas por diferentes autores. O mapa foi cotejado, com notada aproximação, com o modelo gerado por Oliveira et al. (2013); (iii) os mapas de uso e cobertura do solo utilizados (Projeto MapBiomias, 2018; Universidade Federal de Goiás, 2019) são validados por análise de acurácia e observações posteriores de campo.

² Acesse o *Mapa de erodibilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil* no Geoinfo: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/1708>.

Processamento

As matrizes de integração temática foram elaboradas em Excel. Os modelos espaciais de entrada foram rasterizados e reamostrados em pixels de 30 m x 30 m, para compatibilizá-los com o modelo digital do terreno, com 30 m de resolução espacial (EROS Data Center, 2018). O processamento foi realizado por meio de computação paralela em plataforma de alto desempenho nas nuvens do Google Earth Engine (Gorelick, 2013) a partir de um código computacional programado em JavaScript.

Resultados e discussão

O trabalho apresenta uma abordagem conceitual adequada, baseada em um modelo bem fundamentado e coerente com os conceitos apresentados pela literatura científica relevante. O modelo desenvolvido integra os principais fatores que influenciam os processos erosivos, como a erodibilidade dos solos, a erosividade da chuva, a declividade do terreno e o uso e cobertura do solo, possibilitando a geração de produtos cartográficos, como os mapas temáticos de susceptibilidade e vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil. Como resultado da metodologia proposta, os referidos mapas foram derivados dos respectivos modelos espaciais de susceptibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, que foram processados para todo o Brasil; portanto, em termos de abrangência geográfica, os mapas cobrem todo o território nacional.

Outro ponto forte deste trabalho foi a adoção da plataforma Google Earth Engine (GEE) para a implementação dos modelos de susceptibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica.

Símbolo	Suscetibilidade à erosão; uso e cobertura vegetal
Vulnerabilidade à erosão hídrica muito baixa	
1ff	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; formação florestal
Vulnerabilidade à erosão hídrica baixa	
2ff	Suscetibilidade à erosão moderada; formação florestal
2fs	Suscetibilidade à erosão muito baixa, baixa e moderada; formação savânica
2fp	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; floresta plantada
2fu	Suscetibilidade à erosão muito baixa, baixa e moderada; área úmida natural não florestal
2fc	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; formação campestre
2fo	Suscetibilidade à erosão muito baixa, baixa e moderada; outra formação não florestal
2pp	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; pastagem
2pd	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; pastagem degradada
2cs	Suscetibilidade à erosão muito baixa; cultura semi-perene
Vulnerabilidade à erosão hídrica moderada	
3ff	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; formação florestal
3fs	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; formação savânica
3fp	Suscetibilidade à erosão moderada e alta; floresta plantada
3fu	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; área úmida natural não florestal
3fc	Suscetibilidade à erosão moderada e alta; formação campestre
3fo	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; outra formação não florestal
3pp	Suscetibilidade à erosão moderada e alta; pastagem
3pd	Suscetibilidade à erosão moderada; pastagem degradada
3cs	Suscetibilidade à erosão baixa; cultura semiperene
3cp	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; mosaico de agricultura e pastagem
3ca	Suscetibilidade à erosão muito baixa e baixa; cultura anual e perene
3nv	Suscetibilidade à erosão muito baixa; área não vegetada
Vulnerabilidade à erosão hídrica alta	
4fp	Suscetibilidade à erosão muito alta; floresta plantada
4fc	Suscetibilidade à erosão muito alta; formação campestre
4pp	Suscetibilidade à erosão muito alta; pastagem
4pd	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; pastagem degradada
4cs	Suscetibilidade à erosão moderada e alta; cultura semi-perene
4cp	Suscetibilidade à erosão moderada; mosaico de agricultura e pastagem
4ca	Suscetibilidade à erosão moderada; cultura anual e perene
4nv	Suscetibilidade à erosão baixa e moderada; área não vegetada
Vulnerabilidade à erosão muito alta	
5cs	Suscetibilidade à erosão muito alta; cultura semi-perene
5cp	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; mosaico de agricultura e pastagem
5ca	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; cultura anual e perene
5nv	Suscetibilidade à erosão alta e muito alta; área não vegetada
Áreas a serem preservadas e/ou recuperadas	
	Áreas erodidas
	Mangue
	Apicum
	Duna (e praia)
	Escarpas (> 75% de declividade)
Outras áreas	
	Afloramento de rocha
	Mineração
	Aquicultura
	Corpo d'água
Hachura 90°	Área urbana
	Não observado e outras áreas

Figura 5. Legenda do mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica.

O GEE oferece um ambiente computacional poderoso para o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais, com acesso direto a extensos repositórios de dados ambientais, diversas coleções de imagens de satélite e ferramentas de programação em JavaScript e Python, que permitem automatizar fluxos de trabalho e garantir a reprodutibilidade dos resultados. Entre suas principais vantagens, destaca-se a capacidade de operacionalizar modelos complexos em ampla escala espacial e temporal. No contexto deste estudo, o uso do GEE viabilizou a geração sistemática de mapas anuais de vulnerabilidade do solo à erosão, tornando possível o monitoramento anual do risco de degradação dos solos em nível nacional.

Além disso, a estrutura matricial (raster) das camadas geradas permite grande flexibilidade analítica. Cada pixel representa uma unidade espacial contínua e georreferenciada, o que possibilita o recorte e a agregação dos dados para qualquer unidade de análise espacial — sejam estados, municípios, bacias hidrográficas, biomas, dentre outros. Isso torna os produtos altamente adaptáveis às necessidades de planejamento e gestão ambiental em diferentes escalas decisórias.

Apesar da qualidade e potencialidade, a metodologia apresenta algumas limitações inerentes à modelagem espacial com base em uma abordagem exclusivamente conceitual e qualitativa. Por exemplo, embora a erodibilidade do solo seja um fator fundamental nos processos erosivos, neste estudo ela foi abordada de forma qualitativa, sem a utilização do fator K com valores numéricos padronizados. Essa abordagem limita a comparabilidade dos resultados com estudos que aplicam a USLE (Universal Soil Loss Equation) de forma quantitativa, dificultando análises mais precisas e a integração com modelos consolidados de estimativa de perda de solo. Dessa forma, a categorização das variáveis de entrada e, consequentemente, a saída dos modelos em 5 classes ordinais permitem, estritamente, análises com base no nível relativo de intensidade do fenômeno de interesse.

Além disso, os métodos de integração das variáveis, baseados em conhecimento explícito de especialistas, ainda que realizados com muito critério, envolvem certo grau de subjetividade na combinação dos fatores, o que pode dificultar a reprodutibilidade e a validação empírica do modelo em outras regiões ou escalas.

A escala dos dados utilizados — como rasters com resolução de 30 metros e mapas de referência na escala de 1:500.000 — pode acarretar generalizações, especialmente em áreas com paisagens fragmentadas e elevada variabilidade espacial. A modelagem adotada neste estudo foi estruturada a partir da integração de variáveis ambientais organizadas em formato matricial (raster), todas padronizadas para uma resolução espacial de 30 metros. Essa padronização foi necessária para garantir a compatibilidade com o modelo digital de terreno (MDT) proveniente da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM/NASA), amplamente reconhecido por fornecer dados altimétricos em nível global.

Entretanto, apesar de a resolução espacial adotada possibilitar visualizações com elevado nível de detalhamento geométrico, é importante destacar que os dados originais utilizados na modelagem possuem escalas temáticas menos detalhadas, mais adequadas a análises em nível nacional. A camada de erodibilidade do solo, por exemplo, foi derivada do mapa de solos do IBGE na escala 1:250.000, enquanto a erosividade da chuva foi estimada com base em dados pluviométricos cuja distribuição espacial reflete densidades amostrais compatíveis com estudos de abrangência nacional.

Assim, os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica devem ser utilizados preferencialmente para análises em escalas regional e nacional, voltadas ao planejamento territorial, à definição de políticas públicas e ao monitoramento ambiental estratégico — não sendo indicados para aplicações locais ou planejamento operacional, onde maior nível de detalhe e validação em campo são exigidos. Dessa forma, a metodologia adotada, embora tecnicamente consistente em termos de integração e processamento espacial, requer uma leitura crítica quanto à escala de aplicação dos resultados.

Por outro lado, os resultados devem ser analisados à luz das limitações inerentes aos métodos de validação empregados. Como a abordagem adotada baseia-se em um modelo conceitual construído a partir da integração de variáveis ambientais com regras de conhecimento especializado — e não em observações diretas de ocorrência de erosão —, não foi possível aplicar métodos quantitativos clássicos de validação, como análise de acurácia com base em pontos de verdade terrestre ou séries históricas de eventos erosivos.

Essa limitação se justifica pela abordagem metodológica adotada e, principalmente, pela própria natureza dos fenômenos modelados. Tanto a suscetibilidade quanto a vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica, referem-se à predisposição do meio físico e às condições potenciais e de uso da terra à ocorrência de processos erosivos, sendo, portanto, variáveis latentes sem a possibilidade de mensuração direta. Desse modo, a validação foi conduzida de forma indireta, por meio da avaliação qualitativa dos mapas em áreas-piloto, com o apoio de especialistas que conhecem as dinâmicas ambientais locais. Essas análises permitiram verificar a coerência espacial dos padrões observados com o conhecimento empírico acumulado.

Ainda que essa forma de validação qualitativa seja limitada em termos de generalização e reprodutibilidade científica, ela é metodologicamente aceitável em estudos exploratórios ou diagnósticos em larga escala, sobretudo quando se trabalha com variáveis derivadas de dados secundários e de abrangência nacional. Além disso, a robustez dos insumos utilizados contribui para conferir maior confiabilidade aos resultados. O mapa de erodibilidade, por exemplo, foi produzido a partir de um esforço colaborativo entre especialistas em pedologia; a erosividade foi estimada com base em séries pluviométricas consistidas e equações reconhecidas na literatura científica; e os mapas de uso e cobertura do solo utilizados (MapBiomass e LapiG) contam com validação formal e verificação de campo.

Portanto, embora os métodos de validação aplicados neste estudo não permitam uma aferição estatística direta da acurácia dos mapas gerados, a consistência conceitual do modelo, a procedência dos dados de entrada e as análises qualitativas com base em conhecimento técnico especializado garantem um nível satisfatório de confiança nos resultados.

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil.

Considerações finais

Os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil foram aqui gerados a partir de uma modelagem conceitual baseada na integração dos fatores intervenientes no processo de erosão hídrica dos solos e na interpretação e conhecimento especializado. Desse modo, os modelos demonstram ser

conceitualmente consistentes e cartograficamente adequados para a escala de 1:500.000. A escala resultante, compatível com a abrangência nacional, decorreu da escala dos dados de entrada, notadamente do mapa de solos do Brasil, escala 1:250.000 (IBGE, 2018). Contudo, recomenda-se ampliar para demais regiões do país a estratégia de validação empírica por meio da análise baseada em conhecimento especializado, visando demonstrar a validade do modelo em tela.

Como os modelos foram gerados a partir de um código computacional, processados por computação paralela, nas nuvens, na medida em que se tenha dados de entrada mais detalhados, com escalas maiores, torna-se possível a geração de novos mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica mais detalhados.

Ao contrário do mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica, que expressa uma condição de estado do meio físico e, portanto, é estático no tempo, o mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica possui um caráter dinâmico e pode ser atualizado na medida da atualização dos dados de uso e cobertura da terra.

Os mapas de suscetibilidade e vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil constituem bases temáticas relevantes com potencial para contribuir para a elaboração ou implementação de diversas políticas setoriais. Além do setor da agricultura, outros setores, como o de geração de energia a partir de hidrelétricas, planejamento territorial, construção civil etc., podem fazer uso dessa informação. Como bases temáticas de caráter ambiental, ainda podem contribuir com diversos estudos técnicos ou acadêmico-científicos.

O estudo possui abrangência nacional e permite, portanto, guardadas as restrições de escala, gerar mapas com diferentes recortes territoriais (político-administrativos ou fisiográficos), como biomas, estados, municípios, bacias hidrográficas, terras indígenas, unidades de conservação, possibilitando a análise da dinâmica da vulnerabilidade à erosão em diversas unidades territoriais.

Agradecimentos

Os autores da Embrapa Solos agradecem a colaboração dos alunos do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (PPGMA/UERJ).

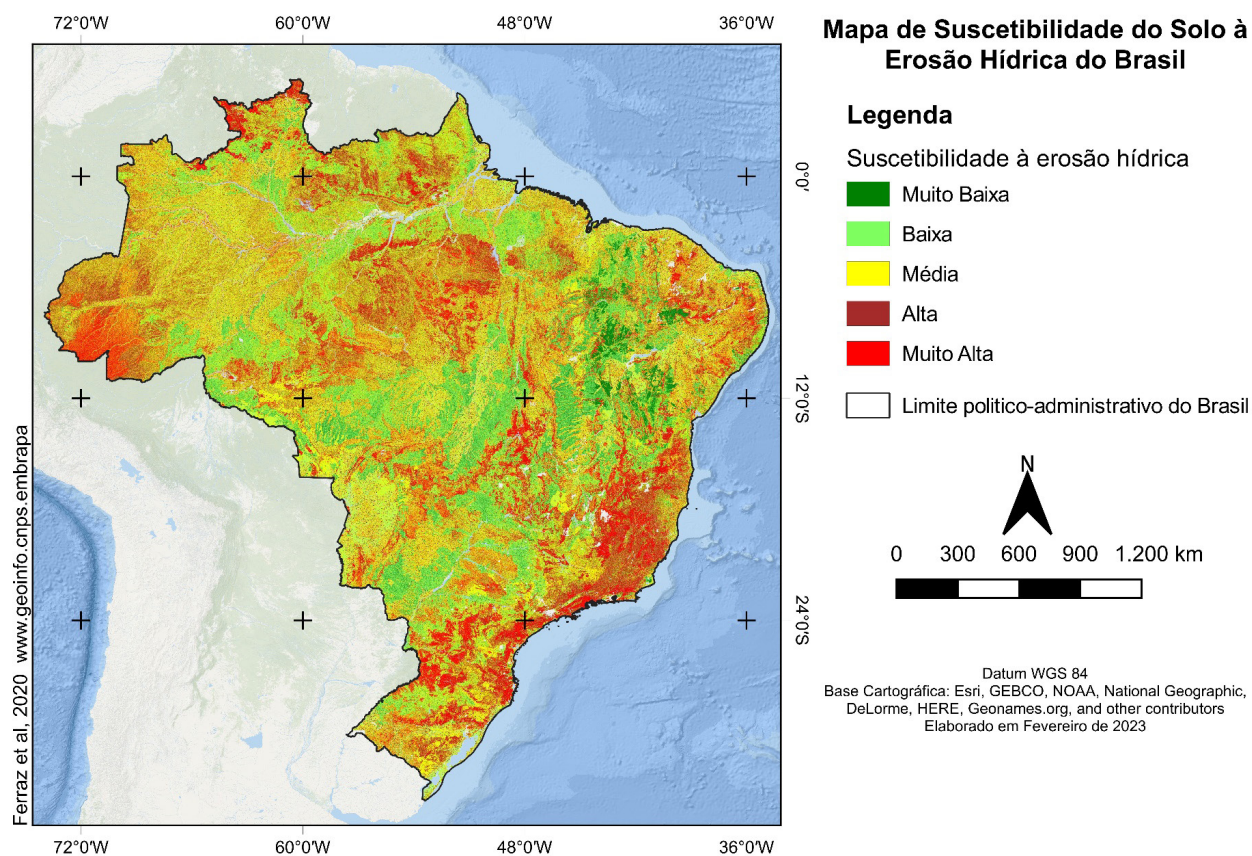


Figura 6. Mapa de suscetibilidade do solo à erosão hídrica do Brasil, escala 1:500.000.

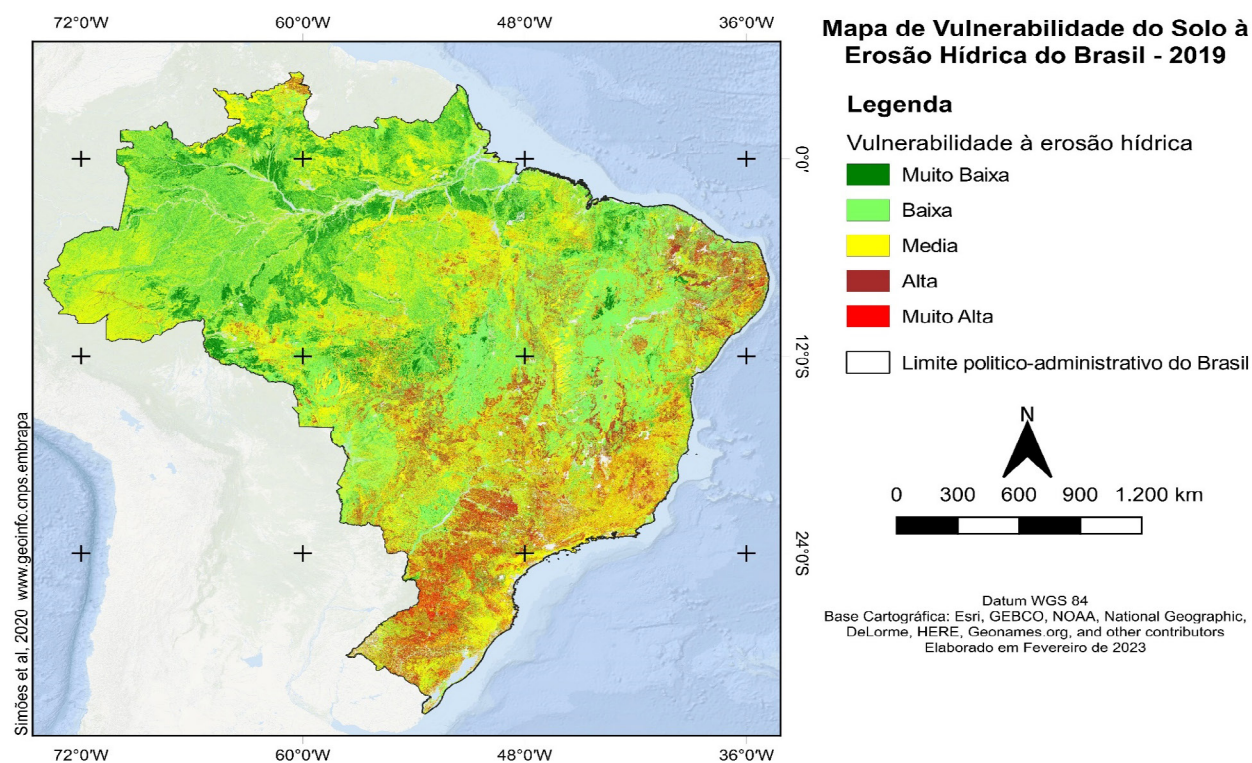


Figura 7. Mapa de vulnerabilidade do solo à erosão hídrica do Brasil, escala 1:500.000.

Referências

- ABDULKADIR, T. S.; MUHAMMAD, R. M.; KHAMARUZAMAN, W. Y.; AHMAD, M. H. Geostatistical based susceptibility mapping of soil erosion and optimization of its causative factors: a conceptual framework. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 12, n. 11, p. 2880-2895, 2017.
- ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>.
- AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: a case study from the Ayvalık region, NW Turkey. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 9, p. 1515-1524, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.09.006>.
- AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de (org.). **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blücher, 2017. 112 p. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/openaccess/9788580392425/completo.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2025.
- BARBOSA, A. J. S.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. de. Determinação do fator energético da chuva (R) para Belém-PA. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSEDIMENTOLOGIA, 1., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFPel, 2015.
- BARTSCH, K. P.; MIEGROET, H. van; BOETTINGER, J.; DOBROWOLSKI, J. P. Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 1, p. 29-37, 2002.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005.
- BONILLA, C. A.; REYES, J. L.; MAGRI, A. Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. **Chilean Agricultural Research**, v. 70, n. 1, p. 159-169, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-58392010000100017>.
- BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 335-344, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF: Mapa, 2012. 173 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/download.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Manejo Sustentável do Solo e da Água em Microbacias Hidrográficas**. Brasília, DF: Mapa, 2021. 18 p. Águas do Agro. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/programa-aguas-do-agro/arquivos/documento_base_ada_1_m.pdf. Acesso em: 6 ago. 2025.
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S. da; SANTOS, J. P. C. dos. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica Lagos - São João, no estado do Rio de Janeiro - Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1415-1430, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1415-1430>.
- CARVALHO, D. F. de; CRUZ, E. S. da; PINTO, F. M.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 3-9, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000100001>.
- COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; AMARAL, A. J. do; VASQUES, G. M.; BACA, J. F. M.; DART, R. de O.; PEDREIRA, J. P. das N. C. **Erodibilidade dos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 38 p. (Embrapa Solos. Documentos, 246). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1170044>. Acesso em: 4 ago. 2025.
- CONOSCENTI, C.; DI MAGGIO, C.; ROTIGLIANO, E. Soil erosion susceptibility assessment and validation using a geostatistical multivariate approach: a test in southern Sicily. **Natural Hazards**, v. 46, n. 3, p. 287-305, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9188-0>.
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. de F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0363>.
- DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858-1868, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.
- EROS DATA CENTER. **USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm>. Acesso em: 6 ago. 2025.

FAO. **Diretrizes voluntárias para as políticas agroambientais na América Latina e no Caribe**. Santiago, 2017. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/35cfd512-feaa-4349-9628-d776a61b75ca/download>. Acesso em: 6 ago. 2025.

FATHIZAD, H.; KARIMI, H.; ALIBAKHSI, S. M. The estimation of erosion and sediment by using the RUSLE model and RS and GIS techniques: (case study: arid and semi-arid regions of Dohra, Ilam province, Iran). **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 7, n. 6, p. 304-314, 2014.

FENG, X.; WANG, Y.; CHEN, L.; FU, B.; BAI, G. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. **Geomorphology**, v. 118, n. 3/4, p. 239-248, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.004>.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; LANA-RENAULT, N.; NADAL-ROMERO, E.; CERDÀ, A. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 5-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>.

GAUBI, I.; CHAABANI, A.; BEN MAMMOU, A.; HAMZA, M. H. A GIS-based soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). **Natural Hazards**, v. 86, p. 219-239, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2684-3>.

GORELICK, N. Google earth engine. **Geophysical Research Abstracts**, v. 15, 11997, 2013. EGU General Assembly 2013. Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-11997.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2025.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. do C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014. DOI: https://doi.org/10.11137/2014_1_81_91.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L. de; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C. de; CASTRO FILHO, C. de; LANDERS, J. N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. cap. 5, p. 47-60. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124240>. Acesso em: 4 ago. 2025.

IBGE. **Mapa de solos**. Rio de Janeiro, 2018. 1 mapa, color. Escala 1: 250.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acesso em: 4 ago. 2025.

KOULI, M.; SOUPIOS, P.; VALLIANATOS, F. Soil erosion prediction using the revised universal soil

loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. **Environmental Geology**, v. 57, n. 3, p. 483-497, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1318-9>.

KUSHWAHA, N. L.; YOUSUF, A. Soil erosion risk mapping of watersheds using RUSLE, remote sensing, and GIS: A review. **Research Journal of Agricultural Sciences**, v. 8, n. 2, p. 269-277, 2017.

LAFLEN, J. M.; LANE, J. L.; FOSTER, G. R. WEPP: a new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 34-38, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.1991.12456572>.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.472>.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: LAL, R. (ed.). **Soil erosion research methods**. 2nd ed. New York: Routledge, 2017. p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203739358-1>.

LAL, R.; STEWART, B. A. Soil degradation: a global threat. **Advances in Soil Science**, v. 11, p. xiii-xvii, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3322-0>.

LE ROUX, J. J.; SUMNER, P. D.; RUGHOPUTH, S. D. D. V. Erosion modelling and soil loss prediction under changing land use for a catchment on Mauritius. **South African Geographical Journal**, v. 87, n. 2, p. 129-140, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/03736245.2005.9713836>.

LIMA, E. de P.; XAVIER, J. P. de S.; BARROS, A. H. C.; SILVA, B. B. da. **Erosividade da chuva do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. 37 p. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 286). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1159615>. Acesso em: 4 ago. 2025.

LIPORACI, S. R.; ROHM, S. A.; PEDRO, F. G.; CEREDA JUNIOR, A. Comparação entre diferentes técnicas digitais para elaboração do modelo digital do terreno e da carta de declividades, com aplicação em mapeamento geológico-geotécnico e análise ambiental. **Holos Environment**, v. 3, n. 2, p. 85-102, 2003. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v3i2.1129>.

LU, D.; LI, G.; VALLADARES, G. S.; BATISTELLA, M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land Degradation & Development**, v. 15, n. 5, p. 499-512, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.634>.

MELLO, G. de; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, v. 10, n. 2, p. 315-322, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200010>.

MONTANARELLA, L.; PENNOCK, D.; MCKENZIE, N.; ALAVIPANAH, S. K.; ALEGRE, J.; ALSHANKITI, A.; ARROUAYS, D.; AULAKH, M. S.; BADRAOUI, M.; BAPTISTA, I.; BLACK, H.; CAMPS ARBESTAIN, M.; CHUDE, V.; EL SHEIKH, E. A. E.; VICTORIA, D. E.; HEMPEL, J.; HENRIQUEZ, C. R.; HONG, S. Y.; KRASILNIKOV, P.; MAMO, T.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SOBOCKÁ, J.; TABOADA, M.; VIJARNORN, P.; YAGI, K.; YEMEFACK, M.; ZHANG, G. L. (ed.). **Status of the world's soil resources: technical summary**. Rome: FAO, 2015. 79 p. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/FAO-world-soils-report-SUMMARY.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 2nd ed. Harlow: Longman, 1995. 198 p.

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 15: vida terrestre**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/15>. Acesso em: 6 ago. 2025.

NASCIMENTO, D. M. C.; DOMINGUEZ, J. M. L. Avaliação da vulnerabilidade ambiental como instrumento de gestão costeira nos municípios de Belmonte e Canavieiras, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 3, p. 395-408, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/2648/1/11962-59204-1-PB.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2025.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; POESEN, J.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; MEUSBURGER, K.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 438-447, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.

PENNOCK, D. **Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management**. Rome: FAO, 2019. 100 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2025.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L. de; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. de A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. de; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção v.5.0 (1985 a 2018) da série anual de mapas de cobertura e uso de solo**

do Brasil. 2018. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 15 maio 2022.

PRUSKI, F. F. (ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009. 279 p.

RABIA, A. H. Mapping soil erosion risk using RUSLE, GIS and remote sensing techniques. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE EUROPEAN CONFEDERATION OF SOIL SCIENCE SOCIETIES, 4., 2012, Bari. **Eurosoil 2012: social science for the benefit of mankind and environment**. Bari: ECSSS, 2012. p. 1082. Disponível em: https://pure.ilvo.be/ws/portalfiles/portal/453024/2012_Eurosoil.pdf. Acesso em: 1 ago. 2025.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. RUSLE: revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 30-33, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.1991.12456571>.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 8. ed. São Paulo: Contexto, 2005. 89 p. (Repensando a Geografia).

SALOMÃO, F. X. de T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. de; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-267.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 5 ago. 2025.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 97 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv9679.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. **Atlas das pastagens brasileiras**. Goiânia, 2019. Disponível em: <http://www.lapig.iesa.ufg.br/lapig/index.php>. Acesso em: 25 mar. 2020.

VALLADARES, G. S.; GOMES, A. da S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900023>.

VRIELING, A.; STERK, G.; BEAULIEU, N. Erosion risk mapping: a methodological case study in the

Colombian Eastern Plains. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, n. 3, p. 158-163, 2002. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10568/43415>. Acesso em: 6 ago. 2025.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rain-fall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. 58 p. (USDA. Agriculture handbook, 537). Acesso em: 6 ago. 2025. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf. Acesso em: 6 ago. 2025.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rain-fall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains**: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, DC: USDA, 1965. 47 p. (USDA. Agriculture handbook, 282). Disponível em: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uva.x030491442>. Acesso em: 6 ago. 2025.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D.; ANDERSON, W. P. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 44, n. 2, p. 168-173, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.1989.12456304>.

YUKSEL, A.; GUNDOGAN, R.; AKAY, A. E. Using the remote sensing and GIS technology for erosion risk mapping of Kartalkaya dam watershed in Kahramanmaras, Turkey. **Sensors**, v. 8, n. 8, p. 4851-4865, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8084851>.