



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS - MG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**ALEXANDRE ELIAS DE MIRANDA TEODORO**

**ESTIMATIVA DAS TAXAS DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA NO  
ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL.**

Alfenas/MG

2021

**ALEXANDRE ELIAS DE MIRANDA TEODORO**

**ESTIMATIVA DAS TAXAS DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA NO  
ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Geografia, na Área de Concentração Dinâmica dos Sistemas Físico-Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato

Alfenas/MG  
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Central – Campus Sede

T314e Teodoro, Alexandre Elias de Miranda  
Estimativa das taxas de perda de solo por erosão hídrica no estado do  
Espírito Santo, Brasil. / Alexandre Elias de Miranda Teodoro – Alfenas, MG,  
2021.  
54 f.: il. –

Orientador: Ronaldo Luiz Mincato.  
Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alfenas,  
2021.  
Bibliografia.

1. Sustentabilidade. 2. Modelos de predição erosiva. 3. Conservação do solo.  
I. Mincato, Ronaldo Luiz. II. Título.

CDD- 333.72

**ALEXANDRE ELIAS DE MIRANDA TEODORO****ESTIMATIVA DAS TAXAS DE PERDAS DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Análise Sócio-Espacial e Ambiental.

Aprovada em: 06 de maio de 2021

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas UNIFAL-MG

Prof. Dr. Joaquim Ernesto Bernardes Ayer  
Instituição: Centro Universitário de Paulínia UNIFACP

Prof. Dr. Paulo Henrique de Souza  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas UNIFAL-MG



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Luiz Mincato, Professor do Magistério Superior**, em 06/05/2021, às 17:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique de Souza, Professor do Magistério Superior**, em 06/05/2021, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Usuário Externo**, em 06/05/2021, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0504825** e o código CRC **91B4CFAB**.

*Aos meus avós que em vida me dedicaram do seu modo amor, carinho e conhecimento. Que foram o elo entre mim e minha ancestralidade, tudo aquilo que mesmo antes de saber ou entender, eu já era.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, por cada hoje para buscar ser melhor que ontem.

Agradeço à Nossa Senhora da Conceição Aparecida, que me cobre todos os dias com seu manto, me protegendo do que não me quer bem e me guiando para os caminhos de seus braços.

Agradeço aos meus pais, José Elias e Rita Augusta, que não tiveram as mesmas oportunidades que eu mas desde que nasci não mediram esforços para que eu me sentisse amado, para que pudesse buscar no conhecimento uma vida melhor e que me ensinaram a ser grato com todos que em algum momento me estenderam a mão.

Agradeço à minha irmã Mariana, pelo amor e cumplicidade desde meus 4 anos, com quem pra sempre dividirei as melhores lembranças da infância.

Agradeço a todos os professores, que participaram da minha formação educacional até o presente momento.

Agradeço ao prof. Ronaldo Luiz Mincato, que é orientador e se tornou grande amigo, pelo conhecimento transmitido, pela confiança, paciência e fraternidade desde que iniciamos juntos o desafio do Mestrado.

Agradeço ao prof. Flamarion Dutra Alves, por acreditar no eterno aluno, por plantar a semente da academia ainda na graduação e por toda amizade de sempre.

Agradeço aos colegas do laboratório de Geologia e Paleontologia, que contribuíram com meu trabalho e tornaram mais agradáveis os dias de labuta, em especial ao Guilherme Henrique Expedito Lense, que com bom humor e solidariedade muito me ensina, tornando-se mais um amigo pra vida.

Agradeço à Jandira, governanta da República Sónarquia, companhia do café da manhã, do almoço e de muitas risadas, que contribuiu muito para que eu conseguisse chegar até aqui.

Agradeço a todos os amigos e amigas de Alfenas com quem convivi durante os últimos anos, das repúblicas Da Zantiga e Sónarquia, e os demais que contribuíram para minha formação enquanto pessoa.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pela bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG.

*“Agora não quero saber de mais nada, só quero aperfeiçoar o que não sei.”*

***Manoel de Barros***

## RESUMO

Embora seja um processo natural, a erosão hídrica quando negligenciada causa impactos físicos, ambientais e socioeconômicos. É o principal processo de degradação dos solos tropicais. Em que pese as grandes áreas destinadas às atividades agropecuárias, o Estado do Espírito Santo ainda carece de estudos de avaliação e estimativa da erosão hídrica, com vistas a propor ações mitigadoras e planejamento sustentável do uso de solo. Uma alternativa é a modelagem da erosão hídrica, técnica que estima e espacializa as taxas de perdas de solo por Sistemas de Informação Geográfica, identificando a distribuição das taxas de perdas e as áreas mais degradadas pela erosão. A Equação Universal de Perda de Solo Revisada - RUSLE é um dos modelos mais difundidos no Brasil, pois possui custos e aplicabilidades que quando comparados a outras metodologias são relativamente mais baixos e menos complexos, fornecendo resultados rápidos que podem auxiliar na definição de medidas para mitigação da erosão hídrica e potencializar o uso sustentável do solo. O objetivo deste trabalho foi estimar as taxas erosivas por erosão hídrica no Estado do Espírito Santo pela RUSLE e compará-las com os limites de Tolerância de Perda de Solo (TPS). Os parâmetros de entrada utilizados para a modelagem são baseados em atributos climáticos, pedológicos, topográficos, de uso e manejo do solo e adoção de práticas conservacionistas. Em que 38,65% do estado as perdas de solo estão acima dos limites da TPS. A perda média anual é de 33,55 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. As maiores taxas erosivas se concentraram nas áreas de maior declividade com baixa densidade de cobertura vegetal. A RUSLE forneceu um diagnóstico das perdas de solo e possibilita a definição de ações que possam mitigar os danos ambientais e promover o desenvolvimento socioeconômico e ambiental sustentável do estado.

**Palavra-chave:** Sustentabilidade; Modelos de predição erosiva; Conservação do solo.

## ABSTRACT

Although it is a natural process, water erosion when neglected causes physical, environmental, and socioeconomic impacts. It is the main process of degradation of tropical soils. Despite the large areas destined for agricultural activities, the State of Espírito Santo still lacks studies to assess and estimate water erosion, with a view to proposing mitigating actions and sustainable planning of land use. An alternative is the modeling of water erosion, a technique that estimates and spatializes the rates of soil losses by Geographic Information Systems, identifying the distribution of the rates of losses and the areas most degraded by erosion. The Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE is one of the most widespread models in Brazil, as it has costs and applicability that when compared to other methodologies are relatively lower and less complex, providing quick results that can help in the definition of mitigation measures water erosion and enhance sustainable land use. The objective of this work was to estimate the erosive rates for water erosion in the State of Espírito Santo by RUSLE and to compare them with the limits of Tolerance of Soil Loss (TPS). The input parameters used for the modeling are based on climatic, pedological, topographic, land use and management attributes, and adoption of conservationist practices. In which 38.65% of the state's soil losses are above the limits of the TPS. The average annual loss is  $33.55 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The highest erosive rates were concentrated in the areas with the highest declivity and low density of vegetation cover. RUSLE provided a diagnosis of soil losses and makes it possible to define actions that can mitigate environmental damage and promote sustainable socio-economic and environmental development in the state.

**Keywords:** Sustainability; Erosive prediction models; Soil conservation.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO I

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
4.1	AGROPECUÁRIA NO BRASIL E NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO...	17
4.2	DEGRADAÇÃO DE SOLOS E EROSÃO HÍDRICA.....	18
4.3	MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA.....	22
4.4	ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA PELA RUSLE.....	23
4.5	TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO.....	27
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>29</b>

### CAPÍTULO II

	<b>ARTIGO 1 - ESTIMATIVA DAS TAXAS DE EROSÃO HÍDRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL.....</b>	<b>38</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
	Área de Estudo.....	41
	Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE.....	44
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

# **CAPÍTULO I**



# 1 INTRODUÇÃO

O solo apresenta elevada importância socioeconômica e ambiental, com base em suas inter-relações com diversos elementos que compõem o ecossistema (CUNHA *et al.*, 2016). O uso intensivo do solo pelo homem muitas vezes desprezando as práticas conservacionistas tem intensificado o processo de erosão hídrica e provocado a sua degradação em várias partes do mundo, principalmente em regiões de clima tropical e subtropical. O atual estado de degradação dos solos, devido à erosão hídrica, torna a conservação e recuperação das áreas afetadas um dos grandes desafios da humanidade no século XXI (NEEDELMAN, 2013).

No Brasil, a erosão hídrica é um dos fatores que mais contribui para o assoreamento dos corpos d'água, a diminuição da produtividade dos solos, os danos às obras de engenharia, a redução das áreas para exploração agrícola e o empobrecimento das populações rurais. A erosão hídrica é causada, facilitada e acelerada pelas ações antrópicas, devido às práticas inadequadas de manejo do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017; MARTINS *et al.*, 2003; MOREIRA *et al.*, 2006; PRUSKI, 2006;).

A adoção de modelos que tenham capacidade de estimar as perdas ocasionadas pelos processos erosivos é de fundamental importância na escolha de práticas de conservação do solo e da água que minimizem esses impactos (SAITO *et al.*, 2009). Entre as ações para a diminuição dos problemas causados pela erosão hídrica, temos o planejamento do uso racional do solo a partir de modelos de estimativa das perdas de solo. Dentre os modelos mais utilizados, têm-se a Equação Universal de Perdas de Solo, do inglês *Universal Soil Loss Equation* - USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e a versão revisada, do inglês *Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE (RENARD *et al.*, 1997).

As estimativas de erosão geradas pela RUSLE permitem aferir se determinada área apresenta produção de sedimentos acima do limite de Tolerância de Perda de Solo - TPS. Sendo a TPS um parâmetro que pode ser usado para a avaliação do estado de conservação do solo. Esse parâmetro é utilizado para destacar áreas críticas onde o solo apresenta altos níveis de erosão. A TPS indica valores máximos de perda de solo para que o nível de produtividade seja considerado sustentável (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A FAO e ITPS (2015) consideram que os limites

devem ser sempre reduzidos e que os solos só serão sustentáveis quando as taxas de perdas de solo forem zero ou muito próximas à zero.

Reunir dados sobre recursos naturais é capital no planejamento da ocupação sustentável do solo e na gestão ambiental. Pois, proporciona um desenvolvimento socioeconômico e ambiental sustentável, pautado na proteção e conservação do meio ambiente.

No Estado do Espírito Santo, o agronegócio se estabelece em grande parte do território e em 2017, correspondeu a 30% do PIB estadual de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017). Dessa forma buscar a conservação do solo é essencial afim de garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

## **2 OBJETIVO GERAL**

Estimar as taxas de perdas de solo por erosão hídrica no Estado do Espírito Santo, pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE, e avaliar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e naturais pela comparação com os limites de Tolerância de Perda de Solo - TPS.

### 3 JUSTIFICATIVAS

Prever e estimar áreas afetadas por processos erosivo, sobretudo quando com usos não sustentáveis é fundamental para definir medidas de conservação do solo e da água, para o planejamento de uso de terras e para a recuperação de áreas degradadas (AVANZI *et al.*, 2013). Os modelos de previsão de perdas de solo são fundamentais na identificação do processo erosivo, sobretudo em altos níveis, devido à eficiência destes métodos ser superior em áreas com maior potencial de perdas de solo (AMORIM *et al.*, 2010).

Quando se expõe o solo a longos períodos de processo erosivo sem ações mitigadoras, o volume de insumos necessários para restaurar a fertilidade adequada necessária para a produção sustentável podem ser muito altos e economicamente inviáveis. De acordo com DECHEN *et al.* (2015), no Brasil os custos da erosão do solo relacionados as perdas de nutrientes como P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> e Mg<sup>+</sup> ultrapassam anualmente valores da ordem de US\$ 1,3 bilhão. Sendo assim, os modelos de predição são uma ferramenta capaz de motivar o planejamento e incentivar a adoção de medidas mitigadoras dos danos causados pelas atividades agropecuárias e promover redução dos prejuízos edáficos, socioeconômicos e ambientais.

Portanto, identificar as áreas prioritárias para implantação e planejar as melhores práticas conservacionistas permite melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Além disto quase um terço de toda a produção capixaba se baseia na agricultura, assim, promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas por meio da identificação de áreas problemáticas possibilita adoção de medidas mitigadoras localizadas, reduzindo as taxas de erosão hídrica do solo e assim contribui diretamente para a segurança socioeconômica e ambiental do estado. Além disso, não existem estudos realizados sobre a modelagem dos processos erosivos que cubram todo estado, o que destaca a relevância deste trabalho, para identificar as áreas mais problemáticas em termos de taxas de erosão hídrica e que deveriam ser prioritárias para a adoção de medidas mitigadoras e de conservação dos solos e da água.

Em alguns países europeus, a modelagem da erosão hídrica em grandes áreas contribui na proposição e adoção de políticas ambientais e agrícolas para diminuir os impactos negativos da erosão (ALEWELL *et al.*, 2019). No Brasil, os estudos de

modelagem ainda são pouco utilizados pelos órgãos governamentais, porém a estimativa da erosão hídrica, bem como a compreensão da sua dinâmica espacial e temporal pode ser utilizada como subsídio para o planejamento de gestões públicas de caráter sustentável (LENSE *et al.*, 2021). Sendo assim, um trabalho que aborde a totalidade do território do Estado do Espírito Santo pode oferecer ao poder público e aos tomadores de decisões, subsídios e informações técnicas para que planejem e proponham políticas públicas de conservação dos solos e venham a garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e naturais.

Além do que, aplicar modelos de erosão em grandes áreas e em escalas regionais contempla o conhecimento de novos cenários susceptíveis a mudanças climáticas, previsões hidrológicas, inundações e, também, a diminuição das perdas de carbono e de nutrientes dos solos (ALEWELL *et al.*, 2019; AVANZI *et al.*, 2013).

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 A AGROPECUÁRIA NO BRASIL E NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

O agronegócio é essencial na economia brasileira, sendo que no ano de 2019 a soma dos valores de bens e serviços gerados por este setor foi de R\$ 1,55 trilhão, correspondendo a 21,4% do Produto Interno Bruto – PIB, nacional (CNA, 2019). Além da movimentação direta de capital, o setor absorve praticamente 1/3 dos trabalhadores brasileiros. Em 2015, de um total de 94,4 milhões de trabalhadores no Brasil, 30,5 milhões ou 32,3% dessa mão de obra atuavam com o agronegócio, subdivididos em atividades de agropecuária (42,7%), comércio agropecuário (21,1%), agrosserviços (21%) e agroindústria (15,2%) (PNAD, 2015).

Em 2019, as exportações totais do agronegócio do Brasil atingiram US\$ 96,8 bilhões, sendo o terceiro país maior exportador de produtos agropecuários do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos da América e da China. Essa performance comercial ofereceu grande contribuição positiva na estabilidade macroeconômica do país (BRASIL, 2019).

No Estado do Espírito Santo, embora as lavouras apresentem grande diversidade de usos dos solos, o principal produto cultivado é o café. Essa prevalência ocorre em 61 dos 78 municípios espírito-santenses, onde a produção de café é importante fonte de empregos e renda.

No Brasil, em 2020 foram cultivados 2.161.942 ha de café, desse total cerca de 20% ou 437.024 ha estão situados no Espírito Santo. No estado é cultivado principalmente o café Conilon, com 265.204 ha plantados, que representa cerca de 65% da área plantada no Brasil (CONAB, 2020). Segundo o IBGE, em 2018 os produtores capixabas produziram 2,1 milhões de toneladas de café Arábica e Conilon. Anualmente, o cultivo injeta um valor aproximado de R\$ 4,4 bilhões nos municípios, diretamente relacionado a quase 131 mil famílias no estado.

A silvicultura corresponde a outro uso do solo bastante difundido no Espírito Santo, ocupando principalmente áreas na região central e norte do estado. O eucalipto corresponde a maior parte da área plantada, com 225.055 hectares dos 231.421 totais do estado no ano de 2019. Os demais 5.486 hectares correspondem a espécies como pinus, seringueira, palmáceas, etc. (INCAPER, 2020).

No estado, 1,46 milhões de hectares correspondem a pastagens destinadas, na maior parte, a bovinocultura de corte e leite. Nas áreas agropecuárias 48,91% corresponde a pastagens plantadas e apenas 0,18% são pastagens naturais. Dados do Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo - IDAF, apontam a presença de 1,94 milhões de cabeças de gado nessas pastagens (IDAF, 2019). Em termos financeiros, 12% do valor bruto da produção agropecuária do estado no ano de 2017 correspondeu a pecuária de corte e leiteira (GALEANO *et al.*, 2018).

Assim como em todo o Brasil, nesse estado a erosão hídrica é um grave problema enfrentado pelos produtores rurais. Esse processo causa a perda de solos férteis, matéria orgânica do solo e fertilizantes, o que prejudica a produtividade das lavouras e gera prejuízos socioeconômicos. Além disso, o processo causa sérios problemas ambientais, como a contaminação dos corpos hídricos do estado e a depreciação da qualidade da água. Nesse contexto é que surge a necessidade de técnicas que contribuam para o planejamento de medidas de mitigação que busquem promover sustentabilidade a partir da conservação dos solos e das águas.

#### 4.2 DEGRADAÇÃO DE SOLOS E EROSÃO HÍDRICA

Os solos resultam da ação climática e de organismos sobre o material de origem durante certo tempo e sob a influência do relevo (LEPSCH, 2011). Os solos são essenciais à vida e fornecem bens e serviços ecossistêmicos e ambientais, como a regulação do clima, a ciclagem de nutrientes, o armazenamento de água e a produção de alimentos, fibras e energia. Entretanto, sua degradação tem aumentado rapidamente, comprometendo todos esses processos vitais a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres (FAO, 2015; SOUZA; ARAÚJO; VITAL, 2016).

A erosão hídrica é um processo geológico natural, em geral lenta e é influenciada pelas características da cobertura vegetal, sendo essa compensada pelo processo de formação dos solos (LEPSCH, 2011). Pela redistribuição dos sedimentos erodidos, a erosão é também responsável por moldar a paisagem a longo prazo, juntamente com as forças da dinâmica interna da Terra. Contudo, a erosão hídrica é intensificada pelas atividades antrópicas, que aumenta o desgaste do solo e provoca implicações ambientais e socioeconômicas negativas (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

A erosão pode causar impacto no desenvolvimento da vegetação, afetar a sustentabilidade agrícola, poluir e assorear os corpos hídricos (LAL, 2014). Além

disso, esse processo é responsável pela redução da qualidade e da capacidade produtiva do solo, pelo esgotamento das terras agricultáveis, pela redução da infiltração e aumento do escoamento superficial, pela remoção da matéria orgânica, fertilizantes e agroquímicos (CAPOANE, 2013; DECHEN *et al.*, 2015).

A intensidade do processo erosivo é agravada principalmente quando há ausência de manejo adequado de solos, uso exagerado da terra além dos limites de sua capacidade e também pela ausência de técnicas conservacionistas, como o plantio em nível, plantio direto, terraceamento, rotação de culturas, pastejo rotacionado, diminuição do número de cabeças de gado por ha e adubação dos solos (DIDONÉ; MINELLA; EVRARD, 2017; LEPSCH *et al.*, 2015; MEDEIROS *et al.*, 2016;). Além disso, não somente as áreas diretamente expostas estão sujeitas aos efeitos da erosão, esse processo também causa impactos indiretos, ou seja, fora do local de ocorrência da erosão, como o aumento da exploração de recursos naturais para corrigir a fertilidade do solo (HAGHIZADEH; SHUI; GODARZI, 2009).

As formas mais conhecidas da erosão hídrica são a laminar, em sulcos e voçorocas. A erosão laminar caracteriza-se pelo carreamento da camada superficial do solo, com a perda da camada fértil de terra, sendo, na maioria das vezes, imperceptível, e por isso é considerada a mais perigosa. Na erosão em sulcos são percebidas pequenas irregularidades em rachaduras no declive do terreno provenientes da concentração da enxurrada em determinadas linhas de escoamento. Por sua vez, nas voçorocas os sulcos são ampliados após anos de enxurradas locais, podendo atingir dezenas de metros de profundidade, em geral alcançando o lençol freático, sendo a forma mais visível de erosão hídrica (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017).

As perdas de solo por erosão hídrica de uma determinada área é obtida pelo conjunto dos seguintes fatores: o regime de chuvas, a cobertura vegetal do solo, a topografia, as características do solo e as práticas conservacionistas e de manejo do solo (LAL, 2001; WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A chuva provoca a erosão hídrica pelo impacto das gotas de chuva provocando o desprendimento e transporte das partículas de solo. A severidade da erosão hídrica está relacionada com a intensidade, duração e frequência do regime pluviométrico (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

A cobertura vegetal é uma aliada nas medidas de proteção do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017) e o principal fator de influência humana sobre o processo

erosivo (DEVÁTY *et al.*, 2019; OUYANG *et al.*, 2010). Sua contribuição se dá pela dissipação da energia de impacto das gotas de chuva, dificultando a desagregação das partículas do solo (PANACHUKI *et al.*, 2011), pelo sistema radicular, infiltração e também diminuição da densidade. Nas áreas de cobertura vegetal densa as perdas de solo diminuem para valores próximos a zero (ANACHE *et al.*, 2017). De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2017), a cobertura vegetal desempenha diversas funções, como: proteção do solo, aumento das taxas de infiltração de água; melhoria na estrutura do solo, devido à adição de matéria orgânica e diminuição da velocidade do escoamento superficial.

Em relação às características do terreno, Lepsch (2011) afirma que a declividade e a forma da vertente influenciam na concentração, dispersão e velocidade da enxurrada, proporcionando maior ou menor arraste das partículas de solo. O autor ressalta que quanto maior for a declividade, menor será a resistência ao escoamento superficial da água, que alcançará maiores velocidades. Além disso, áreas de alta declividade modificadas pela ação antrópica irão sofrer mais com o processo erosivo.

As particularidades físicas do solo, bem como seu teor de matéria orgânica, porosidade, distribuição do tamanho dos agregados e estabilidade, condicionarão a sua resistência à erosão hídrica (BAGATINI *et al.*, 2011). Essas características convergem para a identificação de solos diferentes, com texturas distintas e respostas particulares aos processos erosivos. Ademais, ainda que com a predominância das ações erosivas na superfície do solo, existe influência também pelas suas condições subsuperficiais, que interferem no movimento da água e do ar no solo, sendo fator contribuinte para as taxas erosivas (VOLK; COGO; STRECK, 2004).

As diferentes classes dos solos brasileiros apresentam características distintas, que devem ser observadas no seu manejo para evitar a erosão hídrica e consequente degradação do solo. Dentre as principais classes de solo do país podemos destacar os Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos, que são as mais presentes no Estado do Espírito Santo (IBGE - EMBRAPA, 2001).

Os Latossolos são os solos mais comuns no Brasil e resultam de elevadas taxas de intemperismo, com baixa fertilidade e elevada acidez natural, devido à intensidade e quantidade de chuvas e das temperaturas relativamente elevadas durante o ano (RONQUIM, 2010). Essa classe apresenta em geral, elevada profundidade efetiva, baixa relação textural e estrutura bem desenvolvida, que facilita

a drenagem de água no perfil. Tais fatores em situação natural, aliados à textura argilosa ou muito argilosa dos Latossolos confere-lhe maior resistência à erosão hídrica do que a grande maioria dos solos brasileiros (BERTOL; ALMEIDA, 2000).

Os Argissolos, tendem a ser mais suscetíveis aos processos erosivos, devido à elevada relação textural, que implica em diferentes taxas de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais (EMBRAPA, 2013).

Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos e com baixa profundidade efetiva. Em ambientes declivosos, apresentam fortes limitações para o uso agrícola, devido principalmente à sua textura e espessura (EMBRAPA, 2011).

Os Neossolos são solos pouco espessos e apresentam baixa manifestação dos atributos que caracterizam o seu processo de formação. Nessa classe de solo, as características do material original prevalecem, os horizontes são pouco evoluídos e não há horizonte diagnóstico. Esses solos apresentam altos teores de areia e baixos de argila e matéria orgânica o que gera fraca agregação. Pode, de acordo com as características do local onde se encontra, apresentar baixa resistência à erosão hídrica. Devido à elevada suscetibilidade ao processo erosivo o uso dos Neossolos deve ser restrito em áreas de relevo mais íngreme (EMBRAPA, 2011).

Nas regiões tropicais, a erosão hídrica é o principal processo de degradação do solo (DECHEN *et al.*, 2015). No Brasil, esse processo gera perda de milhões de toneladas de solos agrícolas anualmente (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Sendo assim, os estudos sobre as perdas de solo pela erosão hídrica são essenciais para a definição e adoção de práticas conservacionistas de manejo que contribuam para o crescimento sustentável da produção na agropecuária (OLIVEIRA; SERAPHIM; BORJA, 2015).

Os métodos de quantificação das perdas de solo baseados em parcelas padrões de erosão são de obtenção onerosa, demorada, e de representatividade local, o que limita a extrapolação das informações sobre as taxas de perdas de solos. Outro aspecto é a dificuldade de instalar e monitorar parcelas padrões em áreas de difícil acesso. Tais dificuldades tornam difícil avaliar a distribuição espacial das perdas de solo (CHEN *et al.*, 2011). Estas limitações tornam as técnicas baseadas em modelos de estimativas das taxas de perdas de solo por erosão hídrica uma alternativa para o planejamento e gestão sustentável dos sistemas agrícolas.

### 4.3 MODELAGEM DA EROÇÃO HÍDRICA

Mensurações diretas da erosão hídrica em grandes áreas apresentam dificuldades, devido às condições metodológicas e financeiras. Porém, uma avaliação eficiente das perdas de solo pode ser realizada utilizando modelos de predição da erosão, que consideram os fatores associados aos processos erosivos (MITASOVA *et al.*, 2001; PANAGOS *et al.*, 2015a). Existem diversos modelos matemáticos que identificam áreas mais vulneráveis à erosão hídrica, a partir dos fatores que afetam as perdas de solos e a sua distribuição espacial e permitem ainda simular possíveis cenários futuros de gestão conservacionistas (AYER *et al.*, 2015).

Se comparada à outras metodologias, a modelagem é uma técnica relativamente simples, pois oferece resultados com base em informações disponíveis previamente e com dispêndio de recursos mínimos (GANASRI; RAMASH, 2016).

Conforme as tecnologias se desenvolvem e as preocupações em manter a conservação e qualidade do solo aumentam, diversos modelos de predição do processo erosivo surgem em diferentes países e com metodologias correspondentes às características físicas e climáticas de cada área (LOVRIC; TOSIC, 2018). Na Tabela 1 estão representados alguns modelos utilizados para avaliação da erosão hídrica, que foram difundidos e aplicados.

Tabela 1 - Principais modelos para Estimativa da erosão hídrica criados/publicados a partir de 1970.

<b>Modelos</b>	<b>Sigla</b>	<b>Referências</b>
Modified Universal Soil Loss Equation	MUSLE	Willians et al. (1975)
Universal Soil Loss Equation	USLE	Wischmeier; Smith (1978)
Water Erosion Prediction Project	WEPP	Laflen et al. (1991)
Revised Universal Soil Loss Equation	RUSLE	Renard et al. (1997)
European Soil Erosion Model	EUROSEM	Morgan et al. (1998)
Hydrologic Model System	HMS	Yu (2000)
Soil and Water Assessment Tool	SWAT	Ardold et al. (1998); Neitsch et al. (2005)
Erosion Potential Method	EPM	Gavrilocic (1962)

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A fusão entre as ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e os modelos para estimativa da erosão hídrica resultaram na melhoria da precisão dos resultados das estimativas de perdas de solos (GUIMARÃES *et al.*, 2019). Também tornam a aplicação mais fácil, identificando as áreas de erosão mais acentuadas pelo uso do diagnóstico da distribuição espacial da erosão hídrica (IMAMOGLU; DENGIZ, 2017; PRASANNAKUMAR *et al.*, 2012).

Por se tratarem de modelos para a estimativa da erosão hídrica e não da realidade, também estão sujeitos a erros, uma vez que são uma modelagem da realidade. Todavia, em geral, ao comparar taxas de erosão do solo medidas e modeladas percebeu que o resultado de sua comparação foi relativamente bom, comprovando a eficiência do uso de modelagem da erosão para identificar áreas de maior susceptibilidade do solo (ALEWELL *et al.*, 2019).

#### 4.4 ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA PELA RUSLE

A Equação Universal de Perda de Solo Revisada - RUSLE (RENARD *et al.*, 1997) é o modelo mais utilizado para estimar as perdas de solos em escala de bacias hidrográficas (OLIVEIRA; SERAPHIM; BORJA, 2015; PANAGOS *et al.*, 2015a), inclusive no Brasil. A RUSLE exige poucos dados de entrada e supera as restrições climáticas e geográficas em regiões com carência de informações (BHANDARI *et al.*, 2015). A baixa disponibilidade de informações edafoclimáticas em muitas regiões do território brasileiro tornam a RUSLE uma ferramenta para estimativa das taxas de perdas de solo e para o planejamento e proposição de práticas mitigadoras do processo erosivo.

A RUSLE estima as perdas de solo conforme a equação 1:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: A = perda de solo média anual, em Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; R = fator erosividade da chuva, em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; K = fator erodibilidade do solo, em Mg ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>; LS = fator topográfico, pela relação entre o comprimento (L) e a declividade da rampa (S), adimensional; C = fator da cobertura do solo, (adimensional); P = fator práticas conservacionistas, (adimensional).

O fator R representa a erosividade da chuva, ou seja, a capacidade de causar erosão e perda de solo em determinada área. Esse fator leva em consideração a precipitação total e a energia cinética das gotas de chuva que entram em contato com o solo (BESKOW *et al.* 2009). Uma das formas mais utilizadas para se calcular o fator R é pelos dados de registros pluviométricos, gerando dessa forma índices médios de erosividade. No Brasil, porém, esses índices são ainda escassos, o que dificulta sua obtenção (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017; MELLO, 2007; MOREIRA *et al.*, 2006). Dessa forma, para muitas regiões do Brasil o fator R é obtido com base em informações disponíveis na literatura, como, por exemplo, em Mello *et al.* (2013) e Aquino *et al.* (2012)

O fator K se baseia nas propriedades físicas, químicas, biológicas, mineralógicas e morfológicas do solo para definir sua susceptibilidade à erosão hídrica (BRADY; WEIL, 2013). Dentre essas propriedades, as características que exercem maior influência sobre os processos erosivos são: estrutura, permeabilidade, textura, além dos teores de alumínio, ferro e matéria orgânica (TAMENE; LE, 2015; WISCHMEIER; SMITH, 1978; PANAGOS *et al.*, 2015b).

Desde os primeiros cálculos da USLE originalmente e das versões posteriores, como a MUSLE e a RUSLE, a determinação do fator K se dá por métodos diretos, por meio da instalação de parcelas padrão com 22,3 m de comprimento no sentido do declive de 9%, sujeitando o solo exposto à ação de chuva natural (RENARD *et al.*, 1997). Todavia, devido à necessidade da ocorrência de chuvas, coleta de dados por longos períodos e custos financeiros elevados, muitos pesquisadores adaptam esse procedimento usando métodos indiretos de determinação do fator K a partir de coletas de solo. Dessa forma, na literatura especializada se encontram diversos trabalhos desenvolvidos utilizando modelos de regressão matemática a partir dos atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo para se obter o fator K em regiões distintas (AUERSWALD *et al.*, 2014; DENARDIN, 1990; MARQUES *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 1999;).

A influência da topografia na erosão hídrica do solo se dá pelo produto entre os fatores L e S da RUSLE (YANG, 2015). O fator LS combinado descreve o potencial do escoamento superficial (PANAGOS *et al.*, 2015b; WISCHMEIER; SMITH, 1978). Em locais onde se identifica aumento no comprimento da rampa (L) e da declividade (S) a velocidade do fluxo de água pela enxurrada tende a ser maior, intensificando as perdas de solos (OLIVEIRA; SERAPHIM; BORJA, 2015).

Na USLE, o fator LS era calculado utilizando uma parcela padrão com relevo retilíneo e uniforme, porém isso gerava dificuldade de aplicação em áreas onde o relevo é mais complexo. Além disso, a identificação da formação inicial do escoamento e suas respectivas zonas de deposição também ficavam comprometidas, inviabilizando a definição do fator LS quando aplicado em grandes áreas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017; MINELLA; MERTEN; RUHOFF, 2010;). Desse modo, baseados em análises de processos erosivos, Renard et al. (1997) propuseram adaptações aos cálculos empíricos do fator LS. Todavia, para a avaliação do escoamento superficial ainda são considerados cálculos limitados, pois apresentam dificuldades na separação entre os processos de erosão e de deposição.

O uso das técnicas de Geoprocessamento, sobretudo os Modelos Digitais de Elevação (MDE) foram preponderantes no cálculo do fator LS em trabalhos de modelagem da erosão hídrica do solo (MINELLA *et al.*, 2010; VAN REMORTEL; MAICHLE; HICKEY, 2004). Com essas ferramentas o cálculo do fator LS foi facilitado.

O fator C representa o efeito da cobertura vegetal na proteção do solo contra a ação do impacto das gotas de chuva. É o fator mais afetado pelas forças antrópicas, pois possibilita avaliar a proteção do solo pela cobertura vegetal, em áreas de cultivo, pastagens ou mata nativa (PANAGOS *et al.*, 2015a). Em áreas onde há exposição do solo os valores do fator C são maiores do que em áreas cultivadas, devido à falta de proteção vegetal do solo.

O fator C está relacionado a Razão de Perdas de Solo (RPS) entre duas áreas com mesmas condições de relevo, índice de precipitação e tipo de solo: uma com cobertura e manejo específico e outra em pousio e sem nenhuma cobertura (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Desse modo, os efeitos das variáveis uso e manejo sobre o solo são considerados dependentes por possuírem interações entre si, sendo avaliadas em conjunto (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017). Assim, são atribuídos um único fator C, para a soma da densidade da vegetação e a cobertura do solo pelo dossel com o sistema de manejo utilizado na proteção do solo contra a erosão hídrica (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Para a USLE, o fator C é calculado pelo somatório dos produtos da RPS pela fração do índice de erosividade ( $FEI_{30}$ ) de cada estágio de cultura, sendo esses com valores variando de valores próximos a 0 (matas nativas) a 1 (solo exposto) (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O  $FEI_{30}$  é a percentagem do índice de erosividade que produziu a erosão utilizada no cálculo da respectiva RPS (BERTOL; ALMEIDA, 2000).

Entretanto, o fator C é dependente da variação da erosividade, erodibilidade, bem como do tipo de cultura e dos diferentes uso e manejo do solo, o que dificulta a sua determinação, devido às combinações possíveis dessas características (NAKAO et al., 2015; SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2007). Como o cálculo do fator C em campo é oneroso, seu valor pode ser determinado a partir de estudos encontrados na literatura (LOMBARDI NETO; BERTONI, 1975; MENDES JÚNIOR *et al.*, 2018; OLIVETTI *et al.*, 2015) ou determinados pelo índice de vegetação por diferença normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI (DURIGON *et al.*, 2014).

O fator P representa o efeito das práticas conservacionistas sobre a erosão hídrica. É um índice adimensional que varia de valores próximos a 0 e 1, no qual os valores próximos a 0 representam práticas com alta eficiência na redução das taxas de erosão e 1 o solo exposto, o plantio em desnível com ausência de práticas conservacionistas. As técnicas de conservação mais utilizadas são o plantio em contorno ou terraceamento, plantio direto, as faixas de contorno niveladas, os cordões de vegetação permanente e a rotação de culturas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017; RIGHETTO, 1998).

A determinação do fator P é feita com base em levantamentos de campo, classificações de imagens de sensoriamento remoto, ou ainda baseada em dados obtidos literatura especializada (PANAGOS *et al.*, 2015b). Para o Brasil são escassos os dados que determinam com precisão o fator P da USLE/RUSLE (AMORIM *et al.*, 2010).

O cálculo da RUSLE e a determinação de seus fatores podem ser realizados com auxílio de técnicas de SIG e Sensoriamento Remoto. A modelagem da erosão hídrica a partir do uso da RUSLE acoplada ao SIG proporciona a espacialização dos resultados e identificação das áreas com as maiores taxas de perdas de solos.

A geotecnologia é influenciada pelo debate que se difunde em torno da constante degradação ambiental que impomos ao nosso planeta e aos desafios de alcançar caminhos que levem a um desenvolvimento verdadeiramente sustentável (BITAR *et al.*, 2000). Dessa forma, utilizar os SIGs pode facilitar os processos de análise e também a manipulação de informações em grandes áreas, que são processos onerosos e demorados quando da aplicação dos métodos tradicionais (SAITO *et al.*, 2009).

#### 4.5 TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO

No final da Segunda Guerra Mundial, os sistemas de produção agrícola europeus encontravam-se em situação caótica, impactos diversos foram causados ao solo durante os conflitos, afetando diretamente a produção de alimentos. Com o foco direcionado ao uso do solo para a produção de alimentos foi desenvolvido nessa época o conceito de limite de Tolerância da Perda de Solos - TPS (VERHEIJEN *et al.*, 2009).

A definição da TPS se refere ao valor máximo de taxa de perda de solo de modo a permitir que os cultivos agrícolas sejam socioeconômica e ambientalmente sustentáveis. Um valor ideal para a TPS consiste na equivalência entre as taxas de perdas e as de formação dos solos. Porém, devido especialmente ao longo tempo de formação dos solos, de centenas a milhares de anos, é muito difícil calcular a taxa de formação dos solos (LI *et al.*, 2009). Por isso, busca-se equações teóricas, que consideram as propriedades dos solos e os fatores que influenciam a sua formação para estimar os limites da TPS.

Com os dados oferecidos pela TPS é possível propor práticas conservacionistas para as atividades agropecuárias e também auxiliar um planejamento sustentável de uso e ocupação do solo (DEMARCHI; ZIMBACK, 2014; NUNES *et al.*, 2012). De acordo com as características do solo observa-se a variação entre os limites da TPS, onde os solos com maior profundidade e boa drenagem apresentam altos valores de tolerância enquanto solos com baixa profundidade ou com gradiente textural elevado entre horizontes de superfície e subsuperfície apresentam valores menores (DEMARCHI; ZIMBACK, 2014).

As equações mais utilizadas no Brasil para calcular os limites da TPS são as de Lombardi Neto e Bertoni (1975), Galindo e Margolis (1989) e Bertol e Almeida (2000). Todavia, a equação de Bertol e Almeida (2000) é, atualmente, a mais utilizada pois leva em consideração um maior número de fatores que influenciam a formação dos solos. Apesar disso, em muitas regiões não é possível a coleta de solos para o cálculo da TPS, tanto devido às limitações econômicas, quanto pela grande extensão da área de estudo, e dessa forma, a TPS pode ser determinada a partir de valores relatados na literatura especializada.

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação das taxas de perdas de solos, sobretudo aqueles utilizados pela agropecuária contribui para que sejam evidenciadas as áreas onde os processos erosivos estão mais avançados, fornecendo informações que favorecem direcionar a adoção das práticas conservacionistas e medidas mitigadoras. Dada a importância do solo para o Estado do Espírito Santo, perpassando por questões ambientais, sociais e econômicas, estudos que estimam as taxas de perdas de solo e identificam áreas de maior acentuação da erosão hídrica favorecem seu uso sustentável.

A atenção a essas questões contribui para a manutenção do desenvolvimento socioeconômico ao estimular a proposição de políticas de incentivo a conservação e uso sustentável do solo.

## REFERÊNCIAS

- ALEWELL, C. et al. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 7, n. 3, p. 203-225, 2019.
- AMORIM, R. S. S. et al. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1046-1049, 2010.
- ANACHE, J. A. A. et al. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, Amsterdam, v. 152, n. 1, p.29-39, 2017.
- AQUINO, R. et al. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais State, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012.
- AUERSWALD, K. et al. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena**, Amsterdam, v. 118, p. 220-225, 2014.
- AVANZI, J. C. et al. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 427-434, 2013.
- AYER, J. E. B. et al. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p.180-191, 2015.
- BAGATINI, T. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança no tipo de uso da terra, em dois métodos de preparo do solo e dois tipos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 999-1011, 2011.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 657-668, 2000.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 10. ed. São Paulo: Ícone, 2017. 392 p.
- BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modelling. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.
- BHANDARI, K. P.; ARYAL, J.; DARNSAWASDI, R. A geospatial approach to assessing soil erosion in a watershed by integrating socio-economic determinants and the RUSLE model. **Natural Hazards**, Bern, v. 75, n. 1, p. 321-342, 2015.
- BITAR, O. Y. et al. Geotecnologia: tendências e desafios. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 78-90, 2000.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 685 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comércio Internacional**, 2019. Disponível em: <<http://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2020/01/vendas-externas-do-agronegocio-somam-us-96-8-bilhoes-em-2019>>. Acessado em: 27 jun. 2020.

CAPOANE, V. Utilização do fator topográfico da RUSLE para análise da susceptibilidade a erosão do solo em uma bacia hidrográfica com pecuária intensiva do sul do Brasil. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 8, p. 85-101, 2013.

CHEN, T. et al. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China. **Environmental Earth Sciences**, Berlim, v. 63, n. 3, p. 533-541, 2011.

CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Relatório de Atividades**, 2019. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/documentos-institucionais/relatorio-de-atividades-2019>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, v. 6 - Safra 2020, n. 1 - Primeiro levantamento, Brasília, janeiro 2020. 62 p.

CUNHA, A. M. et al. Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no geobases para uso dos dados em SIG. **Revista do Programa de Pós- Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES**, Vitória, n. 22, v. 2, p. 32-65, 2016.

DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do Solo Estimada por meio de Parâmetros Físicos e Químicos**. 1990. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, Piracicaba, 1990.

DEVÁTY, J. et al. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 674-685, 2019.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; EVRARD, O. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, n. 1, p. 24-33, 2017.

DURIGON, V. L. et al. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 35, p. 441-453, 2014.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Disponível em:

<[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG01\\_16\\_2212200611542.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_16_2212200611542.html)>. Acesso em: 27 ago. 2020.

FAO; ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR): Main Report. **Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils**, Rome, Italia: FAO - ITPS, 2015. 608p.

GALEANO, E. A. V. et al. **Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**. Vitória: INCAPER, 2018. 15p.

GALINDO, I. C. L.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 95-100, 1989.

GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Amsterdam, v. 7, n. 6, p. 953-961, 2016.

GAVRILOVIC, S. A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion. **Bulletin of the Faculty of Forestry**, Podgórica, v. 26, n. 1. p. 151- 168, 1962.

GUIMARÃES, D. V. et al. Modeling of Soil Losses on a Yellow Argisol Under Planted Forest. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 26, n. 1, e20160292, 2019.

HAGHIZADEH, A.; SHUI, L. T.; GODARZI, E. Forecasting Sediment with Erosion Potential Method with Emphasis on Land Use Changes at Basin. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, Stillwater, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2009.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em 30 set. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:5.000.000.

IDAF, Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo. **Informe semanal**, 2019. Disponível em: <<https://idaf.es.gov.br/Contents/Item/Display/7439>>. Acesso em: 19 de set. 2020.

IMAMOGLU, A.; DENGIZ, O. Determination of soil erosion risk using RUSLE model and soil organic carbon loss in Alaca catchment (Central Black Sea region, Turkey). **Rendiconti Lincei**, Berlin, v. 28, n. 1, p. 11–23, 2017.

INCAPER, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Boletim Silvicultura**, 2020. Disponível em: <<https://incaper.es.gov.br/silvicultura>>. Acesso em: 16 de set. 2020.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, New Jersey, v. 12, n. 1, p. 519-539, 2001.

LAL, R. Soil conservation and ecosystem services. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 2, p. 36-47, 2014.

LENSE, G. H. E. et al. Estimation of sediments produced in a subbasin using the Normalized Difference Vegetation Index. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.44, e031419, 2020.

LENSE, G. H. E. et al. Soil losses in the State of Rondônia, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 51, n. 5, e20200460, 2021.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 1. Ed. Viçosa: SBCS, 2015. 170 p.

LI, L. et al. An overview of soil loss tolerance. **Catena**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 93-99, 2009.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI J. **Tolerância de perdas de terra para solo do Estado de São Paulo**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 1975. 12 p.

LOVRIC, N.; TOSIC, R. Assessment of soil erosion and sediment yield using erosion potential method: case study - vrbas river basin (B&H). **Bulletin of the Serbian Geographical Society**, Belgrado, v. 98, p. 1-14, 2018.

MARQUES, J. J. G. M. et al. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 457-465, 1997.

MARTINS, S. G. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 395-403, 2003.

- MEDEIROS, G. O. R. et al. Estimates of Annual Soil Loss Rates in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0150497, 2016.
- MELLO, C. R. et al. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 4, p. 537-545, 2007.
- MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 203, n. 1, p. 88-102, 2013.
- MENDES JÚNIOR, H. et al. Water erosion in Oxisols under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, n. 1, p. 70-84, 2018.
- MINELLA, J. P. G. et al. Processo e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: **Manejo e Conservação do Solo e da Água no Contexto das Mudanças Ambientais**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2010. cap. 4, p. 105-121.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de Métodos de Representação Espacial para Cálculo do Fator Topográfico na Equação Universal de Perda de Solo Revisada em Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1455-1462, 2010.
- MITASOVA, H. M. et al. Terrain modelling and soil erosion: applications for Ft. Hood report for USA CERL, 2001. Disponível em: <<http://shagit.meas.ncsu.edu/~helenagmslab/reports/cer101/finalreport/report01/default.htm>>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- MOREIRA, M. C. et al. Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no Estado de São Paulo utilizando redes neurais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 88-92, 2006.
- NAKAO, A. H. et al. Rotação e Sucessão de Culturas como Práticas de Conservação do Solo no Município de Jales, SP. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1, p. 153-166, 2015.
- NEEDELMAN, B. A. **What Are Soils? Nature Education Knowledge**, 2013. Disponível em: <<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/what-are-soils-67647639/>> Acesso em: 29 mar. 2021.
- NUNES, J. G. et al. Tolerância de perda de solo por erosão na região sul do Amazonas. **Ambiência. Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, v. 8, n. 3, p. 859-868, 2012.
- OLIVEIRA, J. R. et al. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 14, n. 2, p.140–147, 2010.
- OLIVEIRA, F. G.; SERAPHIM, O. J.; BORJA, M. E. L. Estimativa de Perdas de Solo e do Potencial Natural de Erosão da Bacia de Contribuição da Microcentral

Hidrelétrica do Lageado, Botucatu – SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 302-309, 2015.

OLIVETTI, D. et al. Spatial and Temporal Modeling of Water Erosion in Dystrophic Red Latosol (Oxisol) Used for Farming and Cattle Raising Activities in a Sub-Basin in the South of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 1, p. 58-67, 2015.

OUYANG, W. et al. Soil erosion dynamics response to landscape pattern. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 408, n. 6, p. 1358-1366, 2010.

PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1777-1786, 2011.

PANAGOS, P. et al. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. **Land Use Policy**, Berlin, v. 48, p. 38-50, 2015a.

PANAGOS, P. et al. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. **Environmental Science & Policy**, Berlin, v. 51, p. 23-34, 2015b.

PNAD, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, 2015. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=759>> Acessado em: 26 set. 2020.

PRASANNAKUMAR, V. et al. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. **Geoscience Frontiers**, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 209-215, 2012.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 240 p.

RENARD, K. G. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture Handbook**, United States Department of Agriculture, v. 1, n. 703, p. 384, 1997.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EEESC-USP, 1998. 814 p.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de Fertilidade do solo e manejo adequado para as Regiões Tropicais**. ed. 8. Campinas, SP: Embrapa - Monitoramento por Satélite, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2010. 30 p.

SAITO, N. S. et al. Uso da Geotecnologia na estimativa da erosividade das chuvas e sua relação com o uso e ocupação do solo para o Espírito Santo. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, Mossoró, v. 4, n. 2, p. 51-63, 2009.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115–123, 2010.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2007. 153 p.

SILVA, M. L. N. et al. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2287-2298, 1999.

SOUZA, T. T. C.; ARAÚJO, R. C.; VITAL, A. F. M. Análise do Tema Solos nos livros Didáticos: um estudo de caso. **Revista Comunicação e Educação Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 6, n. 6, p. 20-42, 2016.

TAMENE, L.; LE, Q. B. Estimating soil erosion in sub-Saharan Africa based on landscape similarity mapping and using the revised universal soil loss equation (RUSLE). **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Ithaca, v. 102, n. 1, p. 17-31, 2015.

VAN REMORTEL, R. D.; MAICHLE, R. W.; HICKEY, R. Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. **Computers Geoscience**, Berlin, v. 30, n. 9, p. 1043-1053, 2004.

VERHEIJEN, G. G. A. et al. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth Science Reviews**, Amsterdã, v. 94, n. 4, p. 23-38, 2009.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.

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

YANG, X. Digital mapping of RUSLE slope length and steepness factor across New South Wales. **Soil Research**, Berlin, v. 53, n. 2, p. 216-225, 2015.

## CAPÍTULO II

## ARTIGO 1 - ESTIMATION OF WATER EROSION RATES IN THE ESPÍRITO SANTO STATE, BRAZIL

### ESTIMATIVA DAS TAXAS DE EROÇÃO HÍDRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, BRASIL

#### Resumo

A erosão hídrica é um processo geológico natural e muito comum nas regiões tropicais. É importante acompanhá-la para contenção de seus impactos físicos, ambientais e socioeconômicos. No Estado do Espírito Santo, o uso agropecuário do solo ocupa grande extensão territorial e são escassos os estudos relacionados à erosão hídrica. A modelagem espacial da erosão hídrica é eficaz para auxiliar na proposição de medidas mitigadoras, pois quando associada aos Sistemas de Informação Geográfica identifica as áreas mais propensas às perdas de solo. A Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE, é um modelo que exige poucos dados de entrada e é de fácil utilização, fornecendo resultados precisos para mitigar a erosão hídrica e promover o planejamento do uso sustentável do solo. O trabalho visa estimar as taxas da erosão hídrica no Estado do Espírito Santo pela RUSLE e comparar com os limites de Tolerância de Perda de Solos (TPS). Os parâmetros utilizados no modelo se baseiam no uso e manejo do solo, cobertura vegetal, atributos do solo, topografia e fatores climáticos. Cerca de 38,65% das áreas estaduais apresentam perdas de solo acima dos limites da TPS (7,79 a 14,14 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). As áreas de maior declividade com baixa cobertura vegetal concentraram as maiores taxas erosivas, e considerando todo o estado a perda de solo média anual foi de 33,55 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A RUSLE gerou um diagnóstico capaz de direcionar medidas mitigadoras da erosão as áreas mais susceptíveis, viabilizando planejamentos sustentáveis para favorecer o desenvolvimento socioeconômico estadual.

**Palavras-chave:** Modelagem. RUSLE. Conservação do solo.

#### Abstract

Water erosion is a natural geological process and very common in tropical regions. It is important to accompany it to contain its physical, environmental, and socio-economic impacts. In the State of Espírito Santo, agricultural land use occupies a large territorial extension and studies related to water erosion are scarce. The spatial modeling of water erosion is effective to assist in proposing mitigating measures because when associated with Geographic Information Systems, it identifies the areas most prone to soil losses. The Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE, is a model that requires little input data and is easy to use, providing accurate results to mitigate water erosion and promote sustainable land use planning. The work aims to estimate the rates of water erosion in the State of Espírito Santo by RUSLE and to compare with the limits of Tolerance of Soil Loss (TPS). The parameters used in the model are based on the use and management of the soil, vegetation cover, soil attributes, topography, and climatic factors. About 38.65% of the state areas show soil losses above the limits of the TPS (7.79 to 14.14 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). The areas with the highest declivity with low vegetation cover concentrated the highest erosion rates and considering the entire state the average annual soil loss was 33.55 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. RUSLE generated a diagnosis capable of directing erosion mitigation measures to the most susceptible areas, enabling sustainable planning to favor the state's socio-economic development.

**Keywords:** Modeling. RUSLE. Soil conservation.

## 1 INTRODUÇÃO

No Estado do Espírito Santo, aproximadamente 70% do território é coberto por pastagem, lavouras anuais e perenes e floresta plantada (MAPBIOMAS PROJECT, 2019). Nessas áreas a erosão hídrica é um problema comum, sobretudo nas regiões com declividade mais acentuada. Além disso, a conversão de terras naturais em sistemas agrícolas e sua exploração acima da capacidade de recuperação do solo tem contribuído para aumentar as taxas de perdas de solo (LAL, 2007).

De acordo com Dechen *et al.* (2015), no Brasil os custos da erosão do solo relacionados as perdas de nutrientes como P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup> e Mg<sup>+</sup> em cultivos temporários são de cerca de US\$ 1,3 bilhões anuais. Ao reduzir a disponibilidade de solos férteis, a sustentabilidade dos sistemas agrícolas fica comprometida, devido ao aumento das

perdas de solos pela erosão. As consequências causadas pela erosão podem interferir nos processos hidrológicos locais e regionais, alterar o fluxo dos sedimentos e até mesmo afetar os padrões climáticos (DOTTERWEICH, 2013).

Desse modo, a adoção de tecnologias preditivas, como a modelagem da erosão hídrica, é uma alternativa afim de auxiliar na adoção de práticas sustentáveis nas atividades agropecuárias. Em alguns países europeus, a modelagem da erosão hídrica em grandes áreas contribui para a proposição e adoção de políticas ambientais e agrícolas que visam diminuir os impactos negativos da erosão (ALEWELL *et al.*, 2019). No Brasil, apesar da grande quantidade de estudos sobre os efeitos deletérios da erosão hídrica (BESKOW *et al.*, 2009; STEINMETZ *et al.*, 2018; LENSE *et al.*, 2021) os mesmos são ainda pouco utilizados pelos órgãos e agências governamentais, porém a estimativa da erosão hídrica é de grande utilidade na formulação do planejamento de gestões sustentáveis e na implantação de práticas conservacionistas dos solos.

A Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE (RENARD *et al.*, 1997) é um modelo amplamente utilizado em todo o mundo para a estimativa das taxas erosivas (OLIVEIRA; SERAPHIM; BORJA, 2015; PANAGOS *et al.*, 2015). Um diferencial da RUSLE é a necessidade de poucos dados de entrada e a superação de restrições climáticas e geográficas em regiões com carência de informações (BHANDARI *et al.*, 2015). Após estimar as perdas de solo pela RUSLE, sobretudo de grandes extensões, os Sistemas de Informação Geográfica possibilitam a espacialização dos resultados (GANASRI; RAMESH, 2016).

Os resultados das estimativas das taxas de perdas de solos podem ser comparados aos limites de Tolerância de Perda de Solo - TPS, (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A TPS é um índice de sustentabilidade do solo, que indica qual nível de erosão um solo pode suportar sem comprometer sua capacidade produtiva. Os valores encontrados para a TPS são de grande importância para tomada de decisões para controle da erosão hídrica. Embora a curto prazo seja possível utilizar os valores de TPS como um índice de sustentabilidade do solo, a longo prazo as taxas de erosão devem tender a zero para que a capacidade produtiva das terras agricultáveis seja sustentável (FAO; ITPS, 2015; MENDES JÚNIOR *et al.*, 2018).

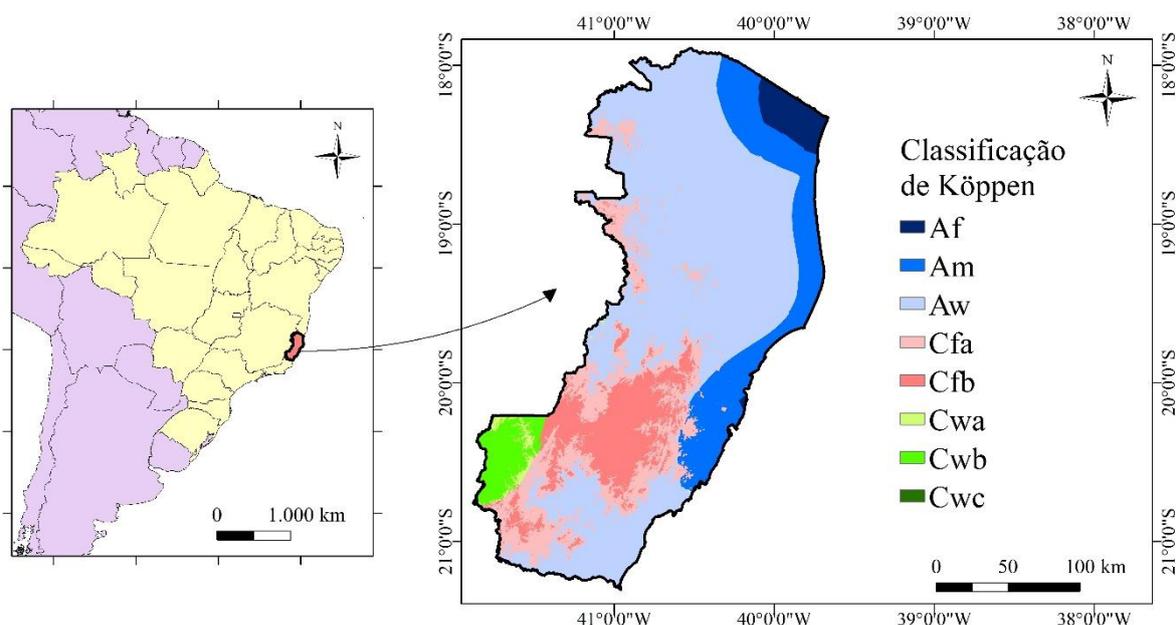
Sendo assim, esse trabalho visa estimar as taxas de perdas de solo por erosão hídrica no Estado do Espírito Santo por meio da RUSLE e comparar com os limites de TPS.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na área do Estado do Espírito Santo, localizado na região Sudeste do Brasil, entre as latitudes 17° 53' e 21° 17' e entre as longitudes 39° 39' e 41° 52', Datum SIRGAS 2000 (Figura 1). O estado apresenta uma extensão territorial de 46.184,1 km<sup>2</sup>.

**Figura 1** – Mapa de localização e Mapa Climático do Estado do Espírito Santo, Brasil, de acordo com a classificação de Köppen. Adaptado de Alvares *et al.* (2013). Notas: Af = clima equatorial, Am = clima tropical de monção, Aw = clima tropical de savana, Cfa = clima subtropical úmido, Cfb = clima oceânico temperado, Cwa = Clima subtropical úmido com inverno seco, Cwb = clima subtropical de altitude e Cwc = clima subtropical frio de altitude.



Fonte: Autor (2021).

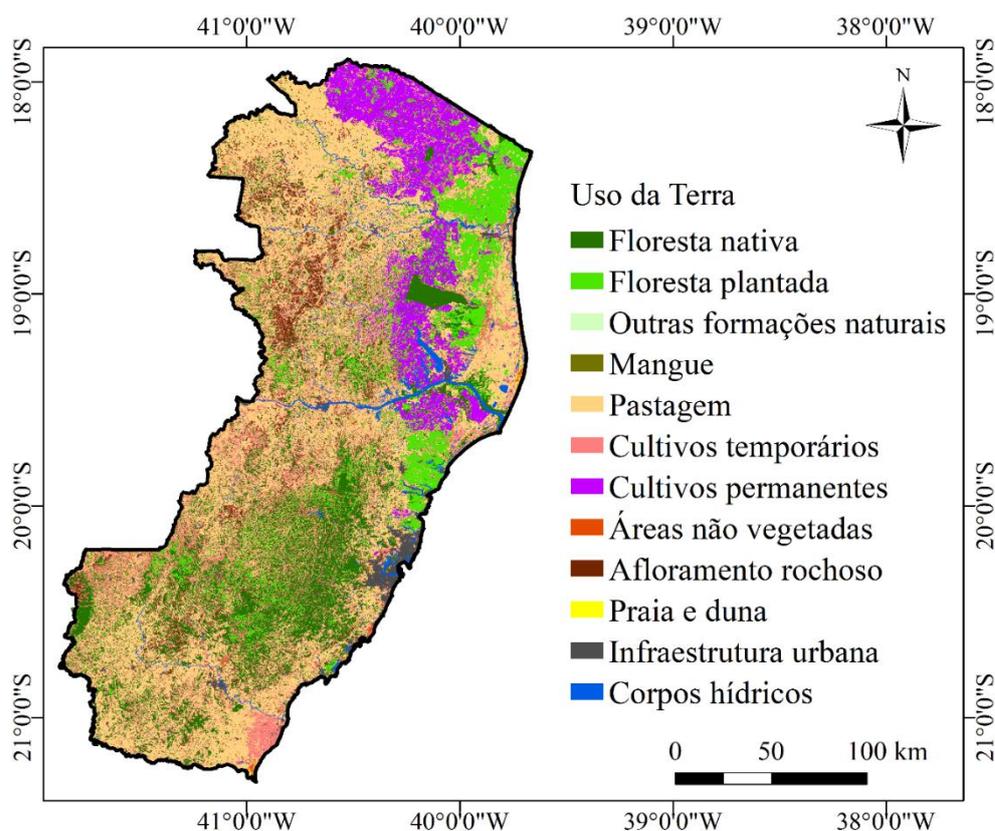
Por estar localizado basicamente em uma região litorânea do sudeste brasileiro, a característica climática geral do Estado do Espírito Santo é um regime tropical quente e chuvoso, não possuindo uma estação fria definida. De acordo com Alvares *et al.* (2013), que aplicaram a classificação de Köppen, a maior parte do estado é classificada com um clima do tipo Aw (Tropical de Savana) (Figura 1). As

temperaturas médias do estado variam entre 22 e 24° C e o volume anual pluviométrico é superior a 1.400 mm, concentrando-se especialmente no verão Alvares *et al.* (2013); INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2020).

As principais classes de uso da terra no Estado do Espírito Santo (Figura 2) são as pastagens (39,12%), seguidas pelas florestas nativas (24,60%), cultivos temporários (18,65%) e permanentes (8,30%). Além dessas, também são registradas áreas com florestas plantadas (5,64%), infraestrutura urbana (1,38%), corpos hídricos (1,03%), afloramentos rochosos (0,70%), outras formações naturais (0,18%), áreas não vegetadas (0,17%), áreas de mangue (0,14%) e praias e dunas (0,09%). A classe de uso floresta plantada consistem principalmente em áreas de eucalipto.

Na figura 2 está representado o mapa de uso da terra, que foi adaptado do Projeto Mapbiomas (2019).

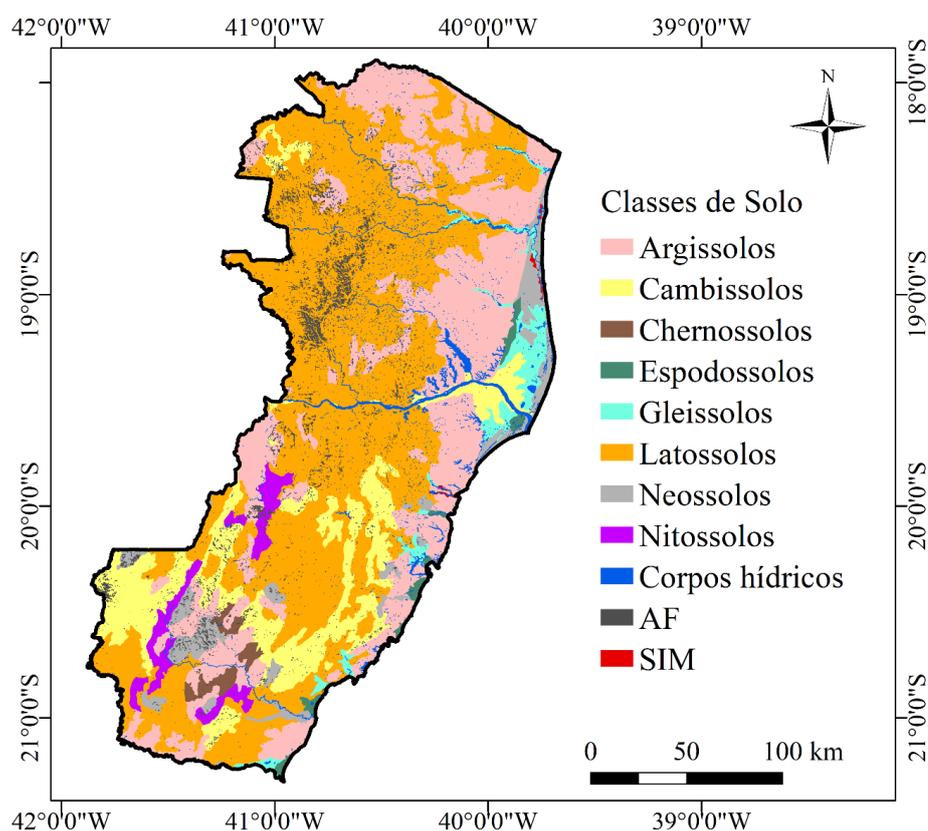
**Figura 2** – Mapa de uso da Terra do Estado do Espírito Santo, Brasil. Adaptado do Projeto Mapbiomas (2019).



Fonte: Autor (2021).

Os Latossolos são a principal classe de solo do Espírito Santo (49,71%), em seguida estão os Argissolos (25,50%) e Cambissolos (12,00%). As demais classes de solo são Neossolos (4,13%), Gleissolos (2,70%), Nitossolos (2,30%), Chernossolos (0,93%), Espodossolos (0,85%), Áreas de Afloramento Rochoso (0,70%) e Solos Indiscriminados de Mangue (0,15%). O mapa digital de solos do Estado do Espírito Santo, escala 1:250.000 (CUNHA *et al.*, 2016), está ilustrado na Figura 3.

**Figura 3** – Mapa digital de solos do Estado do Espírito Santo, Brasil. Adaptado de Cunha *et al.* (2016). Notas: AF = Áreas de Afloramento Rochoso, SIM = Solos Indiscriminados de Mangue.

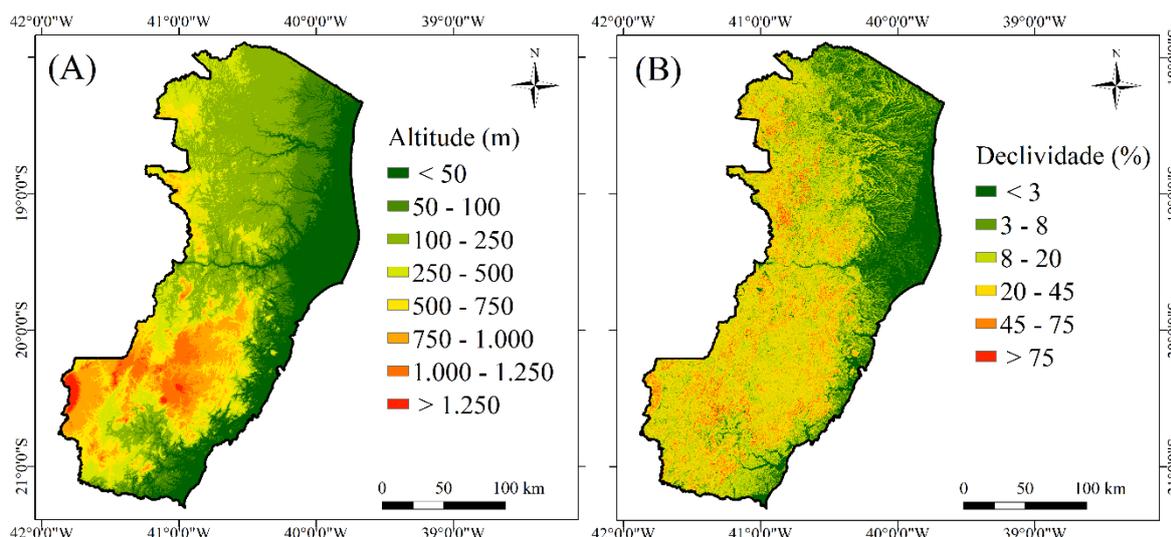


Fonte: Autor (2021).

A altitude média do Espírito Santo varia entre 650 e 750 m e seu ponto mais alto na Serra do Caparaó, no Pico da Bandeira, com 2.892 m (Figura 4A). O Modelo Digital de Elevação SRTM (MDE), com resolução espacial de 30 m, foi extraído da plataforma digital Brasil em Relevo, regulada pela Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária - Embrapa (MIRANDA, 2005). O mapa de declividade (Figura 4B) foi gerado a partir do MDE, utilizando a ferramenta Slope do ArcMap 10.5 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2017).

**Figura 4** – Modelo Digital de Elevação (A) e Mapa de Declividade (B) do Estado do Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Autor (2021).

No Estado do Espírito Santo predominam os relevos com declividade entre 8 – 20% e 20 - 45%, representando 28% e 30% do estado, respectivamente.

### Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE

O modelo RUSLE é representado conforme a Equação 1.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{Equação 1}$$

Em que, A é a perda de solo média anual, em  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ; R é o fator erosividade da chuva, em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ; K é o fator erodibilidade do solo, em  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ; LS é o fator topográfico, adimensional, C é o fator uso e manejo do solo, adimensional, e P é o fator práticas conservacionistas, adimensional.

O fator R reflete o efeito das precipitações pluviométricas na erosão hídrica do solo. O fator R foi determinado com base nos resultados de Saito *et al.* (2009), que

calcularam a erosividade média anual para o Espírito Santo, a partir de 88 estações pluviométricas distribuídas no estado.

O fator K reflete a suscetibilidade que cada solo apresenta à erosão hídrica. Os parâmetros variam de acordo com as particularidades do solo, sendo quanto maiores os valores, maior a susceptibilidade à erosão. Para cada uma das principais classes de solo presentes no Espírito Santo foi determinado um valor de K, com base em informações obtidas na literatura especializada (Tabela 1).

**Tabela 1** – Valores do fator K para os solos do Estado do Espírito Santo, Brasil.

Classe de solo*	K**	Classe de solo*	K**
	Mg ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>		Mg ha <sup>-1</sup> MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>
Argissolos	0.0425	Gleissolos	0.0361
Cambissolos	0.0508	Latosolos	0.0162
Chernossolos	0.0309	Neossolos	0.0351
Espodossolos	0.0592	Nitossolos	0.0237

\*Sistema Brasileiro de Classificação de solos (Santos *et al.*, 2018). \*\*Valores obtidos de Silva e Alvares (2005).

O fator LS representa a influência exercida pelo relevo nas taxas de perdas de solo. Para o cálculo desse parâmetro foi utilizada a metodologia de Moore e Burch, (1986), que se baseia no MDE (Equação 2).

$$LS = \left(\frac{FA \cdot 30}{22.13}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\sin(S)}{0.0896}\right)^{1.3} \quad \text{Equação 2}$$

Em que, LS é o fator topográfico, adimensional; FA representa o acúmulo de fluxo expresso como o número de células da grade do MDE; S é a declividade do relevo em graus e 30 é a resolução espacial do MDE em metros.

O parâmetro LS foi calculado utilizando a ferramenta Raster Calculator do ArcMap 10.5 (ESRI, 2017).

O fator C representa a proteção da cobertura vegetal do solo contra o processo erosivo. Este fator apresenta valores mais altos em áreas de menor densidade vegetal e valores menores em áreas com boa cobertura vegetal. Para o Espírito Santo, o fator C foi determinado com base em valores da literatura científica (Tabela 2).

**Tabela 2** – Valores dos fatores C e P para as classes de uso da terra do Estado do Espírito Santo, Brasil.

Uso de solo	C	P*	Autores
Floresta nativa	0,020	0,2	Martins <i>et al.</i> (2010).
Floresta plantada	0,300	1,0	Martins <i>et al.</i> (2010).
Outras formações naturais	0,020	0,2	Martins <i>et al.</i> (2010).
Pastagem	0,050	0,5	Silva <i>et al.</i> (2010)
Cultivos temporários	0,206	0,5	Silva <i>et al.</i> (2010)
Cultivos permanentes	0,135	0,5	Silva <i>et al.</i> (2010)
Áreas não vegetadas	1,000	1,0	Mendes Júnior <i>et al.</i> (2018)
Mangue**	-	-	-
Afloramento rochoso**	-	-	-
Praia e duna**	-	-	-
Infraestrutura urbana**	-	-	-
Corpos Hídricos**	-	-	-

\* Valores adaptados de Bertoni e Lombardi Neto (2017). \*\*Áreas não consideradas no cálculo de perda de solo.

O fator P varia de próximo a 0 até 1, de acordo com a presença ou ausência de práticas de manejo conservacionistas do solo. O parâmetro foi determinado conforme os valores relatados por Bertoni e Lombardi Neto (2017) (Tabela 2).

Todos os parâmetros do modelo RUSLE foram convertidos a formato de dados raster, e multiplicados entre si na ferramenta Raster Calculator do *software* ArcMap 10.5 (ESRI, 2017), o que gerou a espacialização dos resultados.

As perdas de solo calculadas para o Espírito Santo foram comparadas com os limites de Tolerância de Perda de Solo (TPS), de cada classe de solo conforme a Tabela 3.

**Tabela 3** – Limites de Tolerância de Perda de Solo (TPS) para os solos do Estado do Espírito Santo, Brasil.

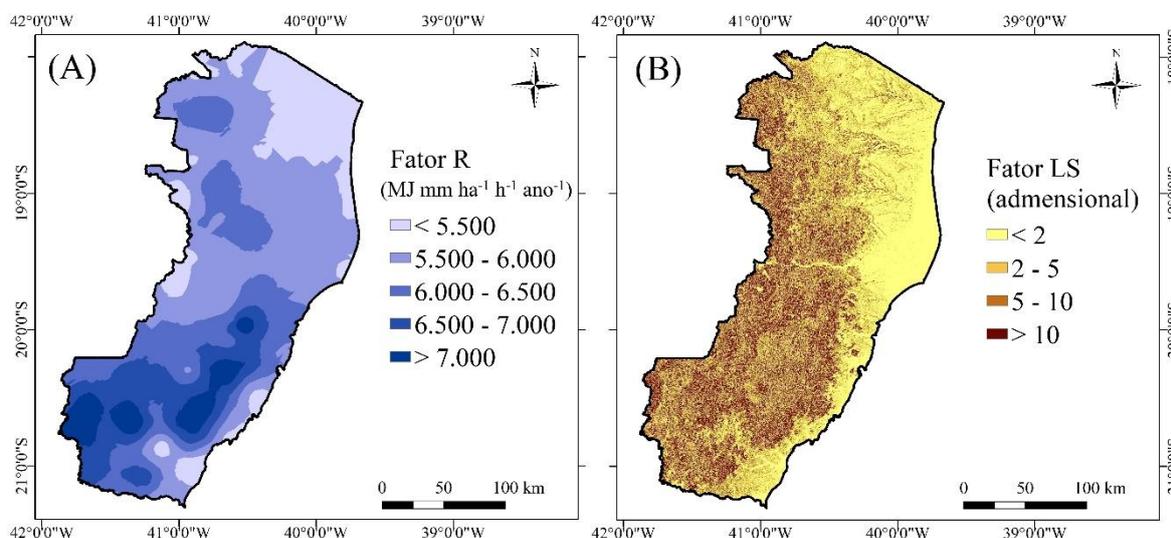
Classes de solo*	TPS (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Autores
Argissolos	8,61	Nunes <i>et al.</i> , (2012)
Cambissolos	13,65	Nunes <i>et al.</i> , (2012)
Chernossolos	13,13	Muniz <i>et al.</i> (2015)
Espodossolos	7,79	Mannigel <i>et al.</i> , (2002)
Gleissolos	14,14	Nunes <i>et al.</i> , (2012)
Latossolos	12,73	Nunes <i>et al.</i> , (2012)
Neossolos	10,48	Nunes <i>et al.</i> , (2012)
Nitossolos	11,10	Mannigel <i>et al.</i> , (2002)

\*Sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS *et al.*, 2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A erosividade para o Espírito Santo variou entre 4.843 e 7.783 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 5A), com uma média de 6.012 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, estando de acordo com os valores observados por Mello *et al.* (2013). A classificação desses autores avalia a erosividade do estado como “muito forte”, em função do elevado índice pluviométrico, sobretudo nas mesorregiões Central e Sul Espírito-Santense. A localização geográfica do estado é um fator que explica o elevado índice pluviométrico, por ser litorâneo e ser mais propenso a receber chuvas vindas do oceano. Além disso, os pontos de maior erosividade estão relacionados com as áreas de maior altitude, indicando as áreas onde as precipitações são mais intensas.

**Figura 5** – Distribuição espacial da Erosividade da chuva- K (5A) e Fator Topográfico - LS (5B) para o Estado do Espírito Santo, Brasil.

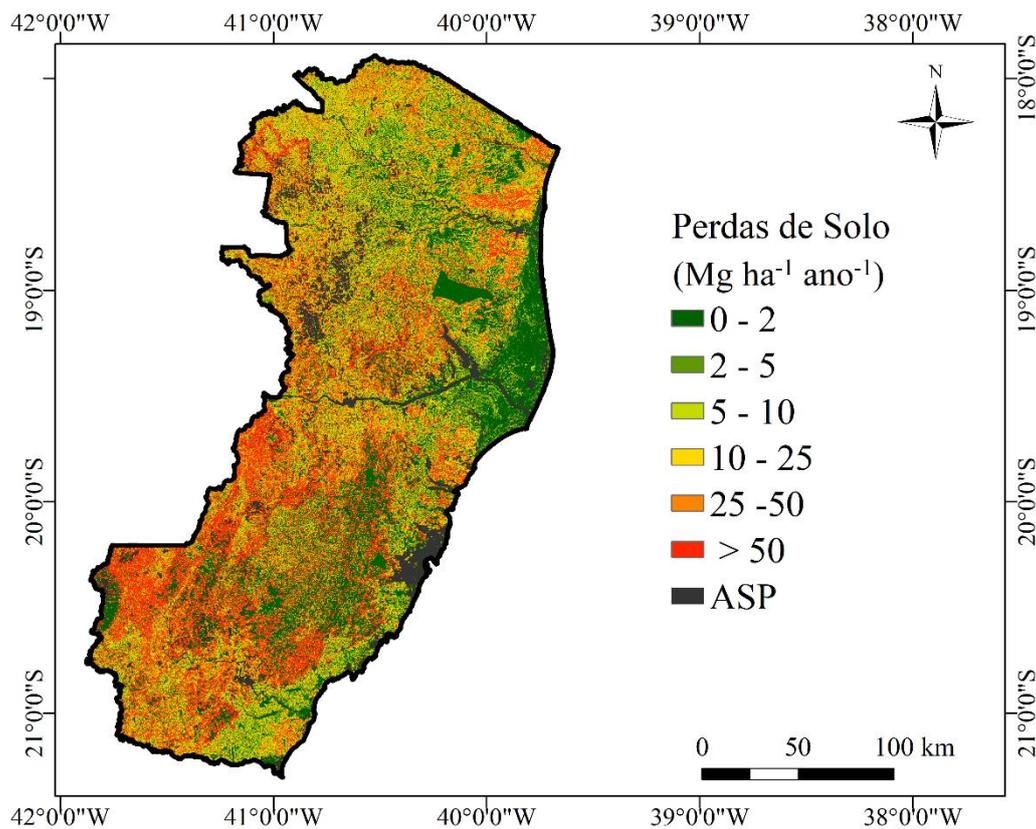


Fonte: Autor (2021).

A média do fator LS foi 4,6 (Figura 5B). O mapa indica que as regiões com vulnerabilidade a erosão abaixo de 2 se concentram principalmente na costa, onde se encontram as menores declividades. Por outro lado, em 24,85% da área estadual o fator LS foi maior que 10, configurando essas áreas como sendo altamente vulneráveis à erosão hídrica (BESKOW *et al.*, 2009). Esses locais carecem de incentivo às práticas de conservação do solo, com o intuito de reduzir o ganho de energia do escoamento superficial devido à topografia (STEINMETZ *et al.*, 2018).

A perda de solo total no Estado do Espírito Santo foi de cerca de 150 milhões de toneladas anuais com média estimada em  $33,55 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . A espacialização dessas perdas calculadas pela RUSLE está representada na Figura 6.

**Figura 6** – Distribuição Espacial das Perdas de Solo no Estado do Espírito Santo, Brasil. Notas: ASP = áreas não consideradas no cálculo de perda de solo (mangue, afloramento rochoso, praia e duna, infraestrutura urbana e corpos hídricos).



Fonte: Autor (2021).

As maiores perdas de solo foram registradas em áreas não vegetadas ( $137,05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), nos cultivos temporários ( $97,50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e nas áreas de floresta plantada ( $73,00 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), enquanto as menores perdas foram estimadas para às florestas nativas ( $2,65 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e outras formações naturais ( $1,58 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). Os cultivos permanentes apresentam menores valores de perdas de solo ( $18,20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) quando comparados aos valores dos cultivos temporários, pois nessa classe não ocorre revolvimento e exposição de solo com a mesma periodicidade que nos cultivos temporários. Nas áreas de pastagem, as perdas de solo foram de  $22,64 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

O Espírito Santo apresentou um elevado percentual de áreas com perdas de solo acima dos limites da TPS, cerca de 38,65%. Essas áreas devem ser priorizadas na adoção de práticas conservacionistas de mitigação à erosão. Além disso, os locais com perdas acima da TPS estão distribuídos em todo o estado, demonstrando a necessidade de um amplo plano de gerenciamento para redução da erosão hídrica.

Como o Espírito Santo apresenta grandes extensões cobertas por solos com alta susceptibilidade erosiva (Argissolos e Cambissolos, respectivamente 25,50% e 12,00%), atenção especial deve ser dada ao manejo desses solos, uma vez que quando associados a usos com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, atingem valores de perda de solo superiores aos limites de TPS.

No caso dos Latossolos que ocupam cerca de 50% da área do estado, ainda que possuam maior resistência à erosão hídrica, quando associados à cultivos agrícolas com práticas inadequadas de manejo apresentam também significativas perdas de solo, sobretudo nas áreas de maior declividade, indicando a importância da cobertura vegetal e das práticas de manejo na redução dos processos erosivos (LENSE *et al.*, 2020).

As regiões com alta erosividade e com maiores valores do fator LS demonstram que as diferentes classes de solo do estado estão sujeitas a altas taxas de erosão hídrica. Sendo assim, práticas de manejo, mudanças no uso do solo e manutenção da cobertura vegetal exercem uma importante atuação para redução das taxas erosivas, especialmente nas classes de solo mais vulneráveis à erosão hídrica (STEINMETZ *et al.*, 2018; LENSE *et al.*, 2020; 2021). Esses resultados revelam a necessidade de planejamento, implantação e disseminação de técnicas de manejo do solo e práticas conservacionistas mais eficazes para áreas agrícolas e de pastagem, bem como a redução de áreas expostas de solo, visando a redução dos locais com taxa de erosão superior aos limites de TPS.

Com base nos resultados da espacialização das perdas de solo, políticas públicas devem ser formuladas, visando a adequação do uso do solo de acordo com sua aptidão agrícola (LEPSCH *et al.*, 2015), principalmente nos locais com altas taxas erosivas. A articulação normativa deve perpassar os diferentes níveis hierárquicos da administração pública entre os governos municipais e estaduais buscando parcerias também com o governo federal, visando uma popularização das práticas conservacionistas e a proposição de políticas públicas que pautem o uso sustentável do solo baseadas em suas vulnerabilidades erosivas (LENSE *et al.*, 2021).

Com a oferta de informações sobre as técnicas sustentáveis de uso do solo, e a interação da população com esses dados favorece um cenário em que o desenvolvimento econômico e social coexistem com o respeito ao ambiente, tendendo à permanência dessas práticas com o passar do tempo através dos hábitos culturais das gerações. Visto isso, comprova-se a importância de aplicar o conhecimento

adquirido através da ciência geográfica como ferramenta de desenvolvimento numa sociedade em que anteriormente essas práticas eram incomuns.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. O Estado do Espírito Santo apresenta elevados índices de erosividade, relevos íngremes e solos com alta vulnerabilidade aos processos erosivos. Dessa forma, a cobertura vegetal e as práticas de manejo do solo, desempenham um papel essencial para a redução das perdas de solo na região.

2. A RUSLE estimou uma perda de solo média de 33,55 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo que em cerca de 38,65% do Espírito Santo as taxas erosivas estão acima dos limites da TPS. Essas áreas devem ser priorizadas em relação à adoção de medidas mitigadoras em relação ao processo erosivo do solo.

3. Os resultados obtidos com esse trabalho podem contribuir para a elaboração de cenários distintos de manejo do solo, planejamentos conservacionistas, assim como no auxílio de proposição de políticas públicas que almejem o incentivo, a conservação e ao uso sustentável do solo no Estado do Espírito Santo.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Especialmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela bolsa de estudos ofertada ao primeiro e segundo autor; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento ao estudo - Código Financeiro 001 e da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL -MG.

#### REFERÊNCIAS

ALEWELL, C. *et al.* Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 7, n. 3, p. 203-225, 2019.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 10. ed. São Paulo: Ícone, 2017. 392 p.

- BESKOW, S. *et al.* Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modelling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.
- BHANDARI, K. P.; ARYAL, J.; DARNASAWASDI, R. A geospatial approach to assessing soil erosion in a watershed by integrating socio-economic determinants and the RUSLE model. **Natural Hazards**, v. 75, n. 1, p. 321-342, 2015.
- CUNHA, A. M. *et al.* Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no geobases para uso dos dados em SIG. **Revista do Programa de Pós- Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES**, n. 22, v. 2, p. 32-65, 2016.
- DECHEN, S. C. F. *et al.* Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.
- DOTTERWEICH, M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation - A global synopsis. **Geomorphology**. v. 201, n. 1, p. 1-34. 2013.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ARCGIS Professional GIS for the desktop version 10.5**. Redlands, California, EUA, Software, 2017.
- FAO; ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR): Main Report. **Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils**, Rome, Italy: FAO - ITPS, 2015. 608p.
- GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, v. 7, n. 6, p. 953-961, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações pluviométricas convencionais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 03 jan. 2021.
- LAL, R. Soils and sustainable agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2001.
- LEPSCH, I. F. *et al.* **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2015. 170 p.
- LENSE, G. H. E. *et al.* Simulating the effect of Permanent Preservation Areas on soil erosion rates. **CERNE**, v. 26, n. 2, p. 193-201, 2020.
- LENSE, G. H. E. *et al.* Soil losses in the State of Rondônia, Brazil. **Ciência Rural**, v. 51, n. 5, e20200460, 2021.

- MANNIGEL, A. R. *et al.* Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.
- MARTINS, S. G. *et al.* Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em Mata Atlântica nos Tabuleiros Costeiros do Estado do Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 517-526, 2010.
- MELLO, C. R. *et al.* Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 203, n. 1, p. 88-102, 2013.
- MENDES JÚNIOR., H. *et al.* Water erosion in Oxisols under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 1, p. 70-84, 2018.
- MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acessado em: 13 Nov. 2020.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length slope factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986.
- NUNES, J. G. *et al.* Tolerância de perda de solo por erosão na região sul do Amazonas. **Ambiência: Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 8, n. 3, p. 859-868, 2012.
- OLIVEIRA, F. G.; SERAPHIM, O. J.; BORJA, M. E. L. Estimativa de Perdas de Solo e do Potencial Natural de Erosão da Bacia de Contribuição da Microcentral Hidrelétrica do Lageado, Botucatu – SP. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 302-309, 2015.
- PANAGOS, P. *et al.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. **Land Use Policy**, v. 48, p. 38-50, 2015.
- MAPBIOMAS PROJECT. **Coleção 5 Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**, 2019. Disponível em: <http://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em 14 jan. 2021.
- MUNIZ, M. S. *et al.* A determinação da capacidade de uso do solo através de fatores da EUPS. **Engenharia Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 149-167, 2015.
- RENARD, K. G. *et al.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agriculture Handbook**, United States Department of Agriculture, v. 1, n. 703, p. 384, 1997.
- SAITO, N. S. *et al.* Uso da Geotecnologia na estimativa da erosividade das chuvas e sua relação com o uso e ocupação do solo para o Espírito Santo. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 4, n. 2, p. 51-63, 2009.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 355 p.

SILVA, F. G. B. *et al.* Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. **Geociências**, v. 24, n. 1, p. 33-42, 2005.

STEINMETZ, A. A. *et al.* Assessment of soil loss vulnerability in data-scarce watersheds in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 6, p. 575-587, 2018.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. **Agriculture Handbook**, n. 537, Washington, USA, 1978. 58 p.