



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

LUIZA VIVIAN SANTOS

AVALIAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NA BACIA DO RIO MAQUINÉ/RS  
UTILIZANDO O SOFTWARE SWAT

Porto Alegre

2024

LUIZA VIVIAN SANTOS

AVALIAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NA BACIA DO RIO MAQUINÉ/RS  
UTILIZANDO O SOFTWARE SWAT

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Andrades Paixão

Porto Alegre

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Santos, Luiza Vivian  
AVALIAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NA BACIA DO RIO  
MAQUINÉ/R\$ UTILIZANDO O SOFTWARE SWAT / Luiza Vivian  
Santos. -- 2024.  
57 f.  
Orientador: Maurício Andrades Paixão.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. práticas conservacionistas. 2.  
hidrossedimentologia. 3. agricultura familiar. I.  
Paixão, Maurício Andrades, orient. II. Título.

LUIZA VIVIAN SANTOS

AVALIAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NA BACIA DO RIO MAQUINÉ/RS  
UTILIZANDO O SOFTWARE SWAT

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 14 de fevereiro de 2024 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. –Maurício Andrades Paixão –  
Departamento de Obras Hidráulicas (DOH) - UFRGS

.....  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Nilza Maria dos Reis Castro – Departamento de Obras Hidráulicas  
(DOH) - UFRGS

.....  
Eng. M.Sc. Fernando Campo Zambrano

Conceito:.....

Dedico este trabalho a meus pais, Sebastião e Lidionete, e ao meu irmão, Artur, que sempre me apoiaram, e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação, estiveram ao meu lado.

## RESUMO

Este estudo propõe-se a avançar na compreensão da dinâmica hidrossedimentológica associada a erosão por escoamento superficial na bacia do rio Maquiné, através do *software* SWAT (Soil and Water Assessment Tool), e da interferência da adoção de práticas conservacionistas na produção de sedimentos em áreas mais sensíveis. Para a construção do modelo, utilizou-se dados de Reanálise do Sistema de Previsão Climática (CFSR) como entrada de informações climáticas, o modelo digital de elevação Anadem como dado de entrada de superfície, e o levantamento o Mapbiomas como dado de uso e ocupação do solo. A porção da bacia do rio Maquiné estudada tem 515 km<sup>2</sup> de área de drenagem, com exutório definido na estação Maquiné. Para a calibração, utilizou-se dados da estação fluviométrica disponíveis na bacia (série de vazão média mensal entre o período 1/1/1985 a 31/12/2013). Para avaliar a representatividade do modelo, utilizou-se o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Dois cenários foram simulados, o primeiro visando representar as dinâmicas hidrossedimentológicas atuais na bacia, e o segundo com o aumento de práticas conservacionistas. Na calibração do SWAT obteve-se o valor de NSE de 0,420, sendo classificado como insatisfatório, não representando todas as dinâmicas ocorrentes na bacia. Entretanto, visto que o hidrograma gerado representou de forma adequada os valores médios de vazão, entende-se que o resultado obtido pode ser utilizado como norteador de ações de mitigação, desde que com parcimônia. Ainda, o modelo demonstrou as potencialidades da adoção de práticas conservacionistas na bacia do rio Maquiné quanto a redução das perdas socioeconômicas causadas pela erosão e pelo transporte de sedimentos.

**Palavras-chave:** práticas conservacionistas, hidrossedimentologia, agricultura familiar.

## ABSTRACT

This study aims to advance the understanding of the hydrosedimentological dynamics associated with erosion due to surface runoff in the Maquiné river basin, through the software SWAT (Soil and Water Assessment Tool), and the interference of the adoption of conservative practices in the production of sediments in more sensitive areas. To build the model, the data used was: Climate Prediction System Reanalysis (CFSR), as input for climate information; the digital elevation model Anadem, as digital surface input data; the Mapbiomas survey, as soil use and occupation information. The drainage area of the studied basin was 515 km<sup>2</sup>, and the outlet was defined as the Maquiné station (CPRM). For calibration, data from the fluvimetric station available in the basin was used (average monthly flow series between the period 1/1/1985 to 12/31/2013). To assess the representativeness of the model, the Nash-Sutcliffe Coefficient (NSE) was used. Two scenarios were simulated, the first aiming to represent the current hydrosedimentological dynamics in the basin, and the second with the increase in conservation practices. In the SWAT calibration, an NSE value of 0,420 was obtained, being classified as unsatisfactory, unrepresentative of all the dynamics occurring in the basin. However, since the generated hydrograph adequately represented the average flow values, it is understood that the result obtained can be used as a guide for mitigation actions, as long as they are used sparingly. Furthermore, the model demonstrated the potential of adopting conservative practices in the Maquiné river basin in terms of reducing socioeconomic losses caused by erosion and sediment transport.

**Keywords:** conservative practices, hydrosedimentology, family farming.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do trabalho.....	28
Figura 2. Localização da bacia e dos principais afluentes do rio Maquiné. ....	30
Figura 3. Precipitação acumulada mensal em 2023 - Estação Telemétrica Maquiné. ...	31
Figura 4. Uso e ocupação do solo para 2022 (Mapbiomas). ....	32
Figura 4. Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Maquiné. ....	33
Figura 5. Mapa pedológico da bacia do rio Maquiné. ....	34
Figura 6. Classificação climática de Köppen-Geiger para a bacia do rio Maquiné.....	35
Figura 7. Locais visitados e registrados em campo.....	40
Figura 8. Lavouras de alface com solo exposto e início de erosão superficial. ....	41
Figura 9. Lavoura de milho com solo exposto. ....	41
Figura 10. Lavouras de hortaliças com solo exposto e sedimentos grosseiros.....	41
Figura 12. Sub-bacias, hidrografia e HRU's geradas pelo SWAT. ....	47
Figura 13. Gráfico gerado pelo modelo com a série observada e a simulada.....	48
Figura 14. Balanço hídrico no modelo calibrado.....	48
Figura 15. Fluxo sedimentológico no modelo calibrado.....	49
Figura 16. Modelagem hidrológica no cenário 1.....	50
Figura 17. Resultado da produção de sedimento no Cenário 1.....	51
Figura 18. Resultado da produção de sedimentos no cenário 2.....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos afluentes que compõem a vazão do rio Maquiné.....	30
Tabela 2. Área e percentual relativo às classes de uso e ocupação ocorrentes na bacia. .....	32
Tabela 3. Compatibilização das classes de uso e ocupação do solo com a tipologia do SWAT.....	36
Tabela 4. Classes de declividade.....	38
Tabela 5. Estações e dados climáticos utilizados na modelagem.....	39
Tabela 6. Coeficientes que compõem a modelagem da bacia.....	43
Tabela 7. – Classificação do coeficiente NSE para calibração em modelagem de vazões .....	45
Tabela 8. Cenário simulados.....	46

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVOS .....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos Específicos .....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Hidrossedimentologia .....	17
3.2	Produção de sedimentos em bacias hidrográficas .....	18
3.3	Práticas conservacionistas .....	19
3.4	Modelagem hidrossedimentológica .....	21
3.4.1	USLE .....	21
3.4.2	MUSLE .....	22
3.4.3	RUSLE.....	23
3.4.4	SWAT (Soil and Water Assessment Tool) .....	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
4.1	Organização do trabalho .....	28
4.2	Área de estudo .....	29
4.2.1	Caracterização hidrológica .....	30
4.2.2	Uso e ocupação do solo .....	31
4.2.3	Relevo .....	33
4.2.4	Pedologia.....	33
4.2.5	Clima .....	35
4.3	Dados de entrada .....	36
4.3.1	Modelo digital de terreno (MDT).....	36
4.3.2	Uso e ocupação do solo .....	36
4.3.3	Tipos de solo .....	37
4.3.4	Unidades de Resposta Hidrológica (HRU) .....	37
4.3.5	Variáveis climáticas .....	38

4.4	Visita de campo .....	39
4.5	Modelagem com o SWAT.....	42
4.6	Cenários .....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5.1	Cenário 1: Swat aplicado e calibrado para uso do solo atual .....	49
5.2	Cenário 2: Aumento do fator P .....	51
6	CONCLUSÕES .....	53
7	RECOMENDAÇÕES.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

# 1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural de desprendimento e arraste de partículas de solo, que pode ou não se dar através da interação com a água. Quando a água faz parte do processo, ele é entendido como hidrossedimentológico. O ciclo hidrossedimentológico, ao contrário do ciclo hidrológico, é aberto, ou seja, não há retorno de sedimento ao solo (Bordas, 1993). Ainda, sob a perspectiva hidrossedimentológica, os sedimentos têm sido reconhecidos como vetores para a transferência de nutrientes e poluentes dos ecossistemas terrestres aos ecossistemas aquáticos, visto que carregam tais substâncias junto ao escoamento (Sari et al., 2013).

Os processos erosivos, responsáveis pela produção de sedimentos, são decorrentes da presença de condições favoráveis a seu desenvolvimento. Apesar de ser um processo natural, a erosão tem sido fortemente intensificada pelas ações antrópicas, especialmente, pela remoção da cobertura vegetal e manejo inadequado do solo. Além da degradação do solo, os processos erosivos geram outros prejuízos, como os socioeconômicos decorrentes da perda de solos agricultáveis, e o assoreamento de cursos d'água. Entender as causas e consequências de tais processos para além de suas relações diretas, possibilita diagnosticar suas ocorrências e aplicar medidas mitigadoras de conservação em diferentes contextos (Guerra et al., 2017).

Nesse sentido, técnicas de manejo adequado do solo são amplamente pesquisadas. No contexto da agricultura, esse tópico é tratado como práticas conservacionistas. Esse tipo de manejo envolve um conjunto de técnicas agrícolas de baixo impacto, que tem como preceitos básicos a menor perturbação possível do solo, a cobertura permanente da área cultivada e a rotação de culturas. Um dos principais tipos de desagregação do solo, a erosão por salpicamento de partículas, por exemplo, é diminuída ou até eliminada em cenários de práticas conservacionistas, visto que a cobertura vegetal (viva ou morta) absorve o impacto das gotas da chuva, o que reduz o desprendimento do solo (Silva & Schulz, 2002).

Entretanto, com a expansão agrícola das últimas décadas, áreas vulneráveis, como margens de rios, têm sido ocupadas para a prática da

agricultura. Além disso, o uso de técnicas convencionais de manejo do solo aumenta o grau de vulnerabilidade, em especial, de pequenos produtores. Uma parte considerável da agricultura familiar se estabelece em regiões com pouca aptidão agrícola e alto grau de vulnerabilidade ambiental, como regiões de declives íngremes e solos rasos. Tais condições favorecem a ocorrência da erosão hídrica, ou seja, o arraste do solo pela água. Assim, a produtividade dos solos é reduzida e a transferência de sedimentos e poluentes para os corpos hídricos é intensificada (Merten & Minella, 2003).

Diversos estudos (Belló, 2004; Costas, 2003; Mariani et al., 2024; Sari et al., 2013) vêm tentando demonstrar a dinâmica hidrossedimentológica e suas relações com o uso e ocupação do solo. Entretanto, a despeito da relevância dos estudos de processos hidrossedimentológicos, é notória a falta de dados e de monitoramento no contexto brasileiro. Decorre-se disso, incertezas que comprometem o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Carvalho, 2008). Portanto, o presente estudo visa corroborar com as pesquisas hidrossedimentológicas, em especial no contexto de bacias declivosas e que têm a agricultura como grande fomentador econômico, como é o caso da bacia do rio Maquiné.

Há consenso na literatura de que o uso e ocupação do solo exercem influência direta no aumento ou diminuição dos processos degradantes ao ambiente. A remoção da vegetação resulta em prejuízos diretos aos recursos hídricos e à biodiversidade (Pereira et al., 2016; Cruz; LanzaNova e Bisognin, 2019), destacando-se o aumento da suscetibilidade à erosão e o consequente assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Portanto, os estudos de simulação hidrossedimentológica possibilitam, entre outras aplicações, a previsão do regime fluvial, assim como as taxas de escoamento superficial em pequenas e grandes bacias hidrográficas, sob diferentes cenários climáticos e de cobertura do solo. Tais estudos constituem uma ferramenta crucial para estratégias de gestão dos recursos hídricos (VENZON et al. 2018).

Maquiné é um município do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul (RS) que se destaca pela produção agrícola, em especial, de hortaliças e produtos orgânicos. De acordo com a Fundação de Economia e Estatística do RS, em 2021, a agricultura representava mais de 20% do PIB municipal de Maquiné. Entretanto, a bacia do rio Maquiné é marcada historicamente pela susceptibilidade a ocorrência de desastres hidrossedimentológicos. Tal susceptibilidade está diretamente relacionada às características físicas e climáticas da região, bem como às áreas ocupadas pela comunidade local. No ano de 2023, após o ciclone extratropical do mês de junho, Maquiné foi o município com o maior prejuízo econômico decorrente de perdas na agricultura. A Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater) estimou o montante de R\$ 52.200.000, mais de 33% do total do estado de perdas na agropecuária apenas nesse evento climatológico.

Nesse contexto, além da susceptibilidade, um dos desafios existentes consiste na falta de monitoramento para que seja possível definir áreas prioritárias para aplicação dos recursos financeiros, a fim de reduzir os prejuízos socioeconômicos. Dessa forma, a modelagem hidrossedimentológica surge como possibilidade de geração de informações em bacias com monitoramento incipiente, e como ferramenta de suporte para os tomadores de decisão. Assim, este trabalho foi realizado com o propósito de aprofundar o conhecimento acerca do ciclo hidrossedimentológico da bacia do rio Maquiné e das relações com os tipos de uso e ocupação e manejo agrícola do solo na região, através da modelagem com o software Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

O SWAT é um dos modelos hidrossedimentológicos mais empregados mundialmente devido a sua estrutura e capacidade de representação adequada dos fenômenos físicos durante o ciclo hidrológico e da capacidade de permitir que variados processos e características de uso e ocupação sejam simulados em uma bacia hidrográfica (Arnold et al., 1998). Vale ressaltar que, apesar de Maquiné ter muitos registros de grandes movimentos de massa, como desprendimentos em encostas, tais processos não foram considerados no modelo, limitando-se aos processos erosivos associados ao escoamento superficial.

No que diz respeito ao manejo de bacias hidrográficas, há consenso na literatura de que o uso e ocupação do solo exercem influência direta no aumento ou diminuição dos processos degradantes ao ambiente. A remoção da vegetação resulta em prejuízos diretos aos recursos hídricos e à biodiversidade (Pereira et al., 2016; Cruz; Lanzaova e Bisognin, 2019), destacando-se o aumento da suscetibilidade à erosão e o conseqüente assoreamento de cursos d'água e reservatórios.

Portanto, os estudos de simulação hidrossedimentológica possibilitam, entre outras aplicações, a previsão do regime fluvial, assim como as taxas de escoamento superficial em pequenas e grandes bacias hidrográficas, sob diferentes cenários climáticos e de cobertura do solo. Tais estudos constituem uma ferramenta crucial para estratégias de gestão dos recursos hídricos (VENZON et al. 2018).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da adoção de práticas conservacionistas na produção de sedimentos na bacia do rio Maquiné – RS.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a dinâmica hidrossedimentológica da bacia do rio Maquiné por meio do modelo SWAT;
- Avaliar quais são as regiões prioritárias para a tomada de decisão de uso e manejo de áreas agrícolas.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A agricultura, o solo e os recursos hídricos estão intrinsecamente ligados. O manejo sustentável desses recursos é essencial para garantir a segurança alimentar, preservar o meio ambiente e promover uma agricultura resiliente a longo prazo. Dessa forma, entender quais as relações e suas principais variáveis entre tais esferas se torna fundamental para tomada de decisões quanto ao manejo delas. Portanto, este capítulo visa apresentar o entendimento que já se tem sobre a relação da hidrossedimentologia com o manejo dos solos e com a agricultura.

#### 3.1 Hidrossedimentologia

A hidrossedimentologia aborda o estudo das interações da água e dos sedimentos, através de processos associados ao ciclo hidrológico terrestre (Carvalho, 2008). O ciclo hidrossedimentológico, ao contrário do ciclo hidrológico, é um ciclo aberto no tempo/espaço da percepção humana, e é intimamente vinculado e totalmente dependente daquele. Os mecanismos determinantes dos processos sedimentológicos fluviais estão relacionados às condições geomorfológicas e ecológicas predominantes nas bacias hidrográficas e em muitos aspectos podem derivar ou ser intensificados por ações antrópicas (Vanzela, 2004).

Sendo assim, o comportamento de uma bacia hidrográfica em relação aos sedimentos é bastante variável, dependendo, sobretudo, do tipo e do uso do solo, da cobertura vegetal, da declividade, do regime de chuvas e das atividades humanas desenvolvidas. De maneira geral, existe maior erosão e transporte de sedimentos nas maiores altitudes de uma bacia; e decresce com a diminuição das declividades e da intensidade das chuvas, ou seja, na medida em que há o distanciamento das regiões mais montanhosas. Assim sendo, a degradação do solo predomina na alta bacia, enquanto a deposição prevalece na parte baixa (CARVALHO, 2008).

A hidrossedimentologia fundamenta-se nos princípios da hidrologia e da sedimentologia, mas incorpora também elementos próprios, como aspectos sociais e econômicos. Os processos hidrológicos desempenham um papel crucial na desagregação, transporte e deposição de sedimentos, exercendo

influência direta na evolução ou formação de encostas e canais (Zanandrea et al., 2017). Esses elementos, por sua vez, condicionam os processos hidrológicos, como o escoamento. (Goerl et al., 2012) exemplifica tais relações com o fluxo de água sobre uma superfície natural que provoca a movimentação de sedimentos e, conseqüentemente, as alterações topográficas, que por sua vez controlam as características do fluxo de água. Isto é, o processo modifica a forma que por sua vez condiciona o processo.

Portanto, assim como o ciclo hidrológico mostra que a vazão de um curso hídrico é diretamente influenciada pela precipitação ocorrida em sua bacia hidrográfica, o ciclo hidrossedimentológico sofre influência direta do ciclo hidrológico e das características geológicas do solo.

### 3.2 Produção de sedimentos em bacias hidrográficas

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica está diretamente ligada à sua dinâmica hidrossedimentológica. Os processos hidrossedimentológicos são muito complexos, abrangendo a desagregação das partículas do solo, o transporte, e a deposição das partículas nas calhas dos rios, lagos e reservatórios, encostas, entre outros (Carvalho, 2008). Assim, a produção de sedimentos está relacionada, também, à probabilidade de que o sedimento erodido alcance um ponto de controle, visto que só o monitoramento é capaz de fornecer informações precisas sobre o transporte do sedimento erodido. Esta gama de processos constitui a dinâmica hidrossedimentológica de determinada bacia hidrográfica.

Entretanto, as características ambientais envolvidas, as quais incluem o relevo, os solos, o material de origem, o manejo do solo, o clima, o tipo de uso, a relação da comunidade com a área, entre outros, controlam esta dinâmica. Estes processos são contínuos ao longo do tempo e são os responsáveis pela formatação da superfície terrestre. Desta maneira, pode-se afirmar que os processos hidrossedimentológicos controlam a evolução da paisagem (Zanandrea et al., 2017).

Carvalho (2008) define a produção de sedimentos como a quantidade de material erodido que consegue completar o percurso, desde a origem até o ponto

de controle, ou exutório, tal como um reservatório ou uma posição do curso d'água, como um posto fluviométrico. A transferência física de sedimentos de uma fonte através da bacia de drenagem por meio do desprendimento e transporte de sedimentos, controlado pela forma como o sedimento se move entre todas as zonas geomorfológicas de uma paisagem, é definida como conectividade de sedimentos por Bracken et al. (2015).

Zanandrea et al. (2017) ressalta que a produção de sedimentos, por retratar a quantidade de sedimentos que passa por uma seção de controle por unidade de tempo, é uma variável que se refere às características daquela determinada seção. Além disso, o valor final da produção de sedimentos está condicionado pelas características da área a montante da seção de análise. Assim, para uma bacia de estudo, com uma seção de controle, haverá um único valor de produção de sedimentos por unidade de tempo, ou seja, é uma variável concentrada.

Morgan (2009) ressalta que avaliações da produção de sedimentos associadas a eventos extremos de precipitação apresentam uma elevada variabilidade nas taxas de erosão. Contudo, quando se avalia as taxas de erosão as agrupando em categorias relacionadas ao solo, como, por exemplo, cobertura vegetal *versus* terras cultivadas *versus* solo descoberto, cada grupo segue um padrão bastante semelhante. Ou seja, apesar de a chuva ser o principal agente erosivo do solo nos climas tropicais úmidos (Almeida Filho, 2008) em razão da existência de uma precipitação anual frequentemente maior e mais intensa nessas regiões quando comparadas a regiões de ocorrência de outros tipos climáticos (Bonan, 2002) a taxa de erosão é fortemente dependente do uso e ocupação do solo.

### 3.3 Práticas conservacionistas

Apenas 22% da área terrestre do planeta, 14.900 milhões de hectares, são potencialmente produtivas (Morgan, 2005). Nessa área, é necessário produzir 97% do abastecimento alimentar global (3% vem dos oceanos, rios e lagos). A pressão para alimentar a população mundial em constante crescimento infere no uso mais intensivo das terras agrícolas existentes e na expansão da agricultura para terras mais vulneráveis, o que implica no aumento substancial

da erosão (Pereira & Castro, 2022). Nesse contexto, não controlar a erosão implica, a longo prazo, em insegurança alimentar.

A prevenção da erosão do solo, ou seja, reduzir a taxa de perda de solo para aproximadamente o que ocorreria em condições naturais, depende da seleção de estratégias apropriadas para conservação do solo, o que, por sua vez, requer uma compreensão profunda dos processos que corroboram com a erosão. Os fatores que influenciam a taxa de erosão podem ser considerados sob três aspectos: energia, resistência e proteção (Morgan, 2005).

Nos aspectos relacionados a energia, estão a capacidade potencial da chuva, do escoamento superficial e do vento para causar erosão. Esse potencial é chamado de erosividade. Quanto aos associados a resistência do solo, os fatores mais relevantes são as propriedades mecânicas e químicas. Práticas que corroboram com infiltração de água no solo reduzem o escoamento superficial e, conseqüentemente a erodibilidade. Já práticas que desagregam solo, aumentam a erodibilidade. A proteção, por sua vez, está associada a fatores relativos à cobertura vegetal. Ao interceptar a chuva e reduzir a velocidade do escoamento e do vento, a cobertura vegetal protege o solo da erosão. Diferentes coberturas vegetais proporcionam diferentes graus de proteção (Morgan, 2005).

Considerando que o setor agrícola brasileiro é o principal usuário dos recursos hídricos e, também, um dos grandes afetados por eventos climáticos extremos, entende-se que ações para a melhora da utilização da água e manejo dos solos são de benefício geral. É importante observar que a expansão agrícola altera as dinâmicas da água e do solo, como o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração da água no solo, impactando diretamente a disponibilidade hídrica (Magalhães et al., 2018).

Portanto, representar fenômenos que caracterizam os sistemas naturais através de modelos matemáticos corrobora com a compreensão das dinâmicas e dá suporte aos tomadores de decisão. Assim, modelos hidrossedimentológicos desempenham um papel crucial no entendimento de processos físicos ao longo do tempo e fornecem previsões passíveis de serem revertidas, dependendo de sua magnitude e gravidade (Oliveira, 2016).

### 3.4 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

As primeiras tentativas matemáticas de modelar o transporte de sedimentos datam do século XIX através da Lei de Stokes, que determinou a velocidade de sedimentação de uma partícula através do balanço das forças peso, empuxo e arrasto hidrodinâmico. A partir do século XX, intensificou-se os estudos empíricos que culminaram em formulações capazes de descrever cargas de sedimentos transportadas pelo escoamento de água. A seguir, serão abordados quatro dos principais modelos hidrossedimentológicos: USLE, MUSLE, MUSLE e SWAT.

#### 3.4.1 USLE

A USLE (*Universal Soil Loss Equation*) é um modelo matemático de base empírica para estimar perda do solo por erosão laminar (não considerando erosão em sulco, voçoroca, nem deslizamento de terra). A USLE foi desenvolvida pelo Departamento de Agricultura do governo dos Estados Unidos (USDA), na década de 70, com o objetivo de determinar perdas do solo por erosão laminar em pequenas parcelas agrícolas e para um longo período. Tais parcelas, também chamadas de parcelas unitárias ou parcelas de Wischmeier, são definidas por Wischmeier (1959) como parcelas experimentais com 3,5 metros de largura por 22,1 metros de comprimento, ou a distância entre dois terraços, com uma área total de 77,35 m<sup>2</sup> e com 9% de declive uniforme, em solo descoberto continuamente e sistema de preparo convencional (uma aração + duas gradagens do solo) no sentido de declive e mantida livre de cultura ou resíduos, permanentemente em pousio.

Esse modelo foi e continua sendo utilizado em todo o mundo. Os componentes da USLE são agrupados em seis fatores, que auxiliam no entendimento da atuação dos processos de erosão acelerada e de diferentes níveis de susceptibilidade (Maciel, 2000). O produto dos fatores representa a média anual de perdas de solo (WISCHMEER, 1976) e estão relacionados da seguinte forma:

Equação 1. Equação Universal de Perda do Solo.

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Onde:

$A$  = representa a estimativa de perda média anual de solo em determinada área, em condições específicas de uso e ocupação do solo (t/ha.ano);

$R$  = Erosividade da chuva (Mj.mm/ha.h.ano);

$K$  - Erodibilidade do solo (t.h/Mj.mm);

$L$  = Comprimento de rampa (m);

$S$  = Declividade de rança (%);

$C$  = Uso e manejo do solo (faixa de valores admissíveis: 0 a 1);

$P$  = Práticas conservacionistas (faixa de valores admissíveis: 0 a 1).

A precisão da USLE foi testada considerando-se os dados obtidos em 2300 parcelas, durante vários anos e em 189 locais espalhados pelos vários estados dos Estados Unidos da América. A estimativa de perdas de solo de cada parcela foi comparada com a obtida a campo. Como resultado, em média foi perdido  $27,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  com uma média de erro de  $3,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  em 159 estimativas. Oitenta e quatro por cento das estimativas possuíam erro menor do que  $4,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; 2/3 das estimativas que excederam  $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  foram de comparações com registros de perdas de solo de menos de 10 anos, provavelmente, pelos efeitos cíclicos das chuvas (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

### 3.4.2 MUSLE

Williams (1975) propôs uma modificação na USLE afim de aprimorar a equação quando utilizada para simulação de eventos chuvosos isolados, substituindo o fator  $R$  da USLE pelo produto de um fator de volume de escoamento superficial e da vazão de pico do hidrograma de cheia, dando uma nova forma à equação, que ficou conhecida como MUSLE (Equação Universal de Perda de Solo Modificada), apresentada na Equação 2:

Equação 2. Equação Universal de Perda de Solo Modificada

$$A = a(Q_s \cdot q_p)^b \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Onde:

$A$  = a produção de sedimentos na bacia devido a uma chuva individual (t/ha);

$Q_s$  = o volume de escoamento superficial ( $m^3$ );

$Q_p$  = a vazão de pico do escoamento superficial ( $m^3/s$ );

$K, L, S, C, P$  = os fatores da USLE;

$a, b$  = coeficientes calibrados para cada bacia.

Entretanto, essas abordagens focadas apenas na representação espacial, com estimativas médias de longo período, não permitem conhecer os processos dinâmicos que envolvem os fluxos de sedimentos, como as cargas efetivamente transportadas pelos rios (Fagundes, 2022).

### 3.4.3 RUSLE

Em 1987, o Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, conjuntamente com outros organismos, começou a revisar a USLE. Os avanços computacionais, principalmente na área de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto (SR), permitiram modificações no modelo original da USLE, incorporando elementos, variáveis e novos métodos de levantamento de dados. O resultado ficou conhecido como Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*), a qual, entre outras modificações, incorpora o conceito de vários valores do fator  $K$  ao longo do ano agrícola, um novo método para o cálculo do fator  $C$  e outro para o cálculo do fator  $P$  (Renard, 1997).

#### 3.4.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O SWAT é um modelo físico, semi-distribuído e contínuo no tempo, o qual foi desenvolvido para analisar os impactos de diferentes usos do solo sobre os recursos hídricos em bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 2012). Ele é processado em uma interface SIG – QSWAT+, sendo utilizados dados tabulares e informações espaciais na sua simulação. A calibração do modelo pode ser processada de diversas formas, dentre elas, utilizando o aplicativo SWAT Toolbox+.

No SWAT, uma bacia hidrográfica é dividida em várias sub-bacias, e estas são subdivididas em áreas menores, chamadas Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit* - HRU). As HRUs consistem em unidades do terreno homogêneas quanto ao tipo de solo, uso e cobertura do solo, relevo e declividade (Jang et al., 2018).

As simulações hidrossedimentológicas realizadas pelo modelo SWAT podem ser de alta complexidade a depender do objetivo do estudo e dos dados disponíveis. Em termos gerais, pode-se dizer que o modelo funciona em duas etapas: processos terrestres e processos de propagação do ciclo hidrológico.

Na etapa terrestre, pode-se inserir dados de sete macro componentes: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas. Já a etapa de propagação do ciclo hidrológico é dividida em duas macros componentes: propagação no canal principal e propagação no reservatório.

A componente hidrologia é a base para a simulação do escoamento superficial da água, sendo regida pela equação do balanço hídrico (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2002; Bonumá *et al.* 2009; Castro, 2013), representada pela Equação 3 abaixo:

Equação 3. Equação do balanço hídrico

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$



Onde:  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo,  $t$  é o tempo (dias),  $R_i$  é a precipitação (mm),  $Q_i$  é o escoamento superficial (mm),  $ET_i$  é a evapotranspiração (mm),  $P_i$  é a percolação (mm), e  $QR_i$  é o fluxo de retorno (mm). O modelo utiliza uma formulação modificada do Método da Curva Número (CN), do *Soil Conservation Service* (SCS, 1972), para calcular o escoamento superficial associados as classes, usos e manejos do solo, Equação 4.

Equação 4. Equação modificada do Método da Curva Número.

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - I_a)^2}{(P_i - I_a + S)}$$

Onde:  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial total (mm);  $P_i$  é a precipitação total (mm);  $I_a$  é a abstração inicial (o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial em mm), e  $S$  é o parâmetro de retenção (mm) o qual varia com o uso. O modelo também oferece o método de Green-Ampt (1911), porém este requer o fornecimento de dados sub-diários de precipitação. O cálculo da variável  $S$  se dá através da Equação 5:

Equação 5. Equação da retenção (S)

$$S = 25,4 \cdot \frac{100}{CN} - 10$$

Onde:  $CN$  (número de deflúvio) é um valor adimensional que variar entre 1 (cobertura muito permeável) e 100 (cobertura completamente impermeável), dependendo da umidade, tipos e usos do solo.

Para o cálculo da vazão de pico, o modelo utiliza o Método Racional Modificado (Neitsch *et al.*, 2002) de acordo com a Equação 6:

Equação 6. Equação da vazão de pico.

$$Q_{pico} = \frac{CN \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Onde  $Q_{pico}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $i$  é a intensidade da precipitação (mm/h); e  $A$  é a área da bacia ( $km^2$ ), e 3,6 é um fator de conversão de unidades.

Para realizar a estimativa de produção de sedimentos, o modelo utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*). A equação visa quantificar a erosão bruta e a produção de

sedimentos a partir do escoamento superficial, representando assim a energia utilizada na desagregação e transporte de sedimentos. A Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) utilizada pelo modelo SWAT é apresentada pela Equação 7.

Equação 7. Equação MUSLE

$$Sed = 11,8. (Q_{surf} \cdot q_{pico} \cdot A)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot L \cdot CFRG$$

Onde: *Sed* é a produção de sedimentos na bacia (t/dia); *Q<sub>surf</sub>* é o escoamento superficial para a bacia (mm/ha); *q<sub>pico</sub>* é a vazão de pico (m<sup>3</sup>/s); *A* é a área da bacia (ha); *K* é o fator de erodibilidade do solo; *C* é o fator de cobertura e manejo do solo (adimensional); *P* é o fator de práticas conservacionistas (adimensional), *L* é o fator topográfico (comprimento e inclinação da rampa) e *CFRG* é o fator de fragmento grosseiro (rochas).

O fator *K* de Erodibilidade do solo representa a suscetibilidade do solo em ser erodido, e é dado pelas características intrínsecas de cada tipo de solo. Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram Equação 8 para calcular o fator erodibilidade do solo:

Equação 8. Equação do fator K de erodibilidade.

$$K = \frac{0,00021 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2,25 \cdot (C_{perm} - 3)}{100}$$

Onde: *K* é o fator de erodibilidade do solo; *M* é o parâmetro de tamanho das partículas; *OM* é a matéria orgânica (%); *C<sub>soilstr</sub>* é o código da estrutura do solo e *C<sub>perm</sub>* é a permeabilidade do perfil.

O código da estrutura do solo e a permeabilidade do perfil são características tabeladas presentes no banco de dados do modelo SWAT. O fator de cobertura e manejo do solo é definido segundo Lino (2009) como a taxa de perda de solo durante o ciclo de crescimento da planta, sendo determinado pela Equação 9:

Equação 9. Equação do fator de cobertura e manejo do solo.

$$C_{USLE} = \exp([in(0,8) - in(C_{USLE,mn})] * \exp[-0,00115 * rsd_{surf}] + in[C_{USLE}])$$

Onde:  $C_{usle}$  é o fator de cobertura e manejo do solo;  $C_{usle,mn}$  é o valor mínimo para o fator e  $rsd_{surf}$  é a quantidade de resíduo na superfície do solo (kg/ha). O valor mínimo do fator de cobertura é obtido pela Equação 10:

Equação 10. Equação do valor mínimo do fator de cobertura.

$$C_{USLE} = 1,463 \ln[C_{USLE}] + 0,1034$$

Segundo Wischmeier e Smith (1978), o fator de práticas conservacionistas expressa a relação entre a intensidade de perdas de solo quando uma prática conservacionista é empregada e quando a cultura está plantada no sentido do declive.

O fator comprimento e inclinação da rampa (fator topografia), segundo Marchioro (2008), é calculado pelo modelo hidrológico SWAT utilizando a Equação 11:

Equação 11. Equação do fator topografia.

$$LS_{USLE} = \left( \frac{L_{hill}}{22,1} \right)^m * (65,41 * \text{sen}^2 + (a_{hill}) + 4,56 * \text{sen}(a_{hill}) + 0,065)$$

Onde:  $L_{hill}$  é o comprimento da encosta (mm);  $m$  é o fator exponencial e  $\alpha_{hill}$  é o ângulo da declividade da encosta (°).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Organização do trabalho

Esse trabalho visa simular a produção de sedimentos associada a alteração de uso e práticas agrícolas de manejo do solo, com o recorte específico de erosão superficial, não sendo simulados processos de erosão por movimento de massa, como escorregamento de encosta ou solapamento de margens de rio. Para tal, optou-se pela utilização do software SWAT tendo em vista a inexistência de trabalhos que utilizaram esse *software* para avaliação dos processos erosivos associados a escoamento superficial e suas relações com o manejo do solo na bacia do rio Maquiné, e os benefícios que tal tipo de estudo pode gerar para a comunidade local. O fluxograma da Figura 1 apresenta as etapas do trabalho.

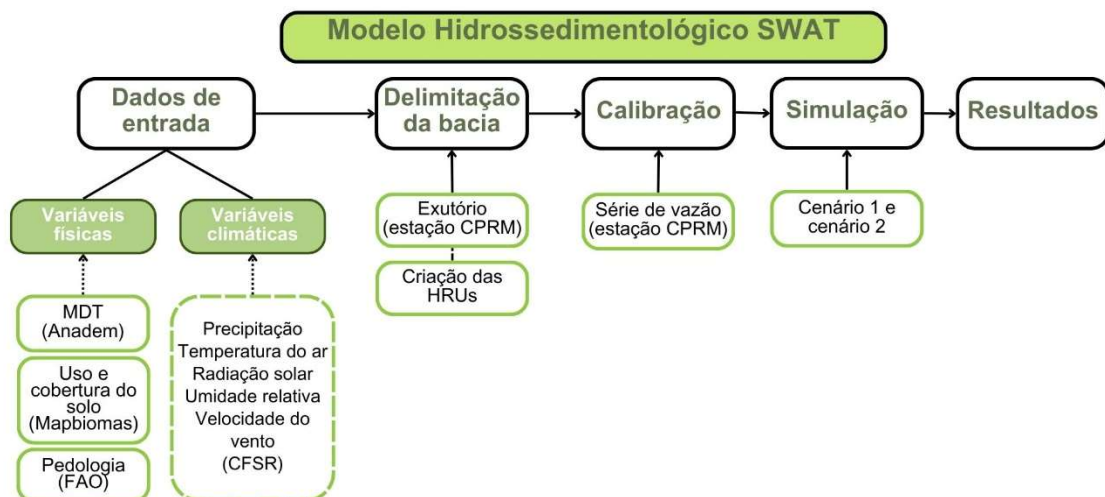


Figura 1. Fluxograma do trabalho.  
Fonte: a autora.

## 4.2 Área de estudo

O presente trabalho foi conduzido na bacia hidrográfica do rio Maquiné localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Os limites geográficos são de latitude 29° 23'S a 29°45'S e longitude 50°07'W a 50°22'W, abrangendo uma área de drenagem de 515 km<sup>2</sup>. A área de estudo localiza-se inteiramente no bioma Mata Atlântica e está inserida predominantemente no município de Maquiné/RS com uma pequena parte localizada ao norte no município de São Francisco de Paula/RS (Figura 2).

Segundo os dados do último censo demográfico, o município de Maquiné tem 7.418 habitantes e densidade demográfica de 12,09 hab/km<sup>2</sup>. Os dados do último Censo Agropecuário (IBGE, 2019) apontam que, em 2017, existiam 532 estabelecimentos agropecuários no município. Desse total, 30% estão vinculados ao plantio de culturas temporárias, 25% à pecuária, 23% a lavouras permanentes e 20% à horticultura. Além disso, no município predominam estabelecimentos enquadrados como agricultura familiar (92%)

Na bacia do rio Maquiné, já foram registradas diversas ocorrências de fenômenos naturais desencadeados por chuvas intensas, como escorregamentos de terra. Tais eventos vêm trazendo imensos prejuízos ao município, como, por exemplo, o ciclone extratropical que ocorreu entre os dias 14 e 16 de junho de 2023. Neste evento, a CPRM registrou 290mm de chuva em 48h e, aproximadamente, 80% da cidade ficou ilhada (Pickbrenner, 2023). A Emater estimou uma perda de R\$52 milhões para a cidade de Maquiné, sendo também a cidade que registrou o maior prejuízo na agricultura e na pecuária no estado (Emater, 2023).

Essas condições evidenciam que a bacia do rio Maquiné é caracterizada por processos hidrossedimentológicos frequentes, justificando ainda mais sua escolha para o presente estudo. A adoção de práticas conservacionistas na bacia pode auxiliar na redução das perdas de solo e, eventualmente, na redução dos efeitos de eventos hidrológicos extremos.

#### 4.2.1 Caracterização hidrológica

O rio Maquiné é formado por diversos afluentes, dos quais destacam-se os arroios Lajeado, Garapiá, Forqueta, do Ouro, Encantado, Pinheiro e Água Parada. A Figura 2 apresenta a localização dos principais afluentes e a diferença entre os limites da bacia hidrográfica do rio e do município de Maquiné. A Tabela 1 apresenta as principais características de cada um dos corpos hídricos que compõem a vazão do rio Maquiné.

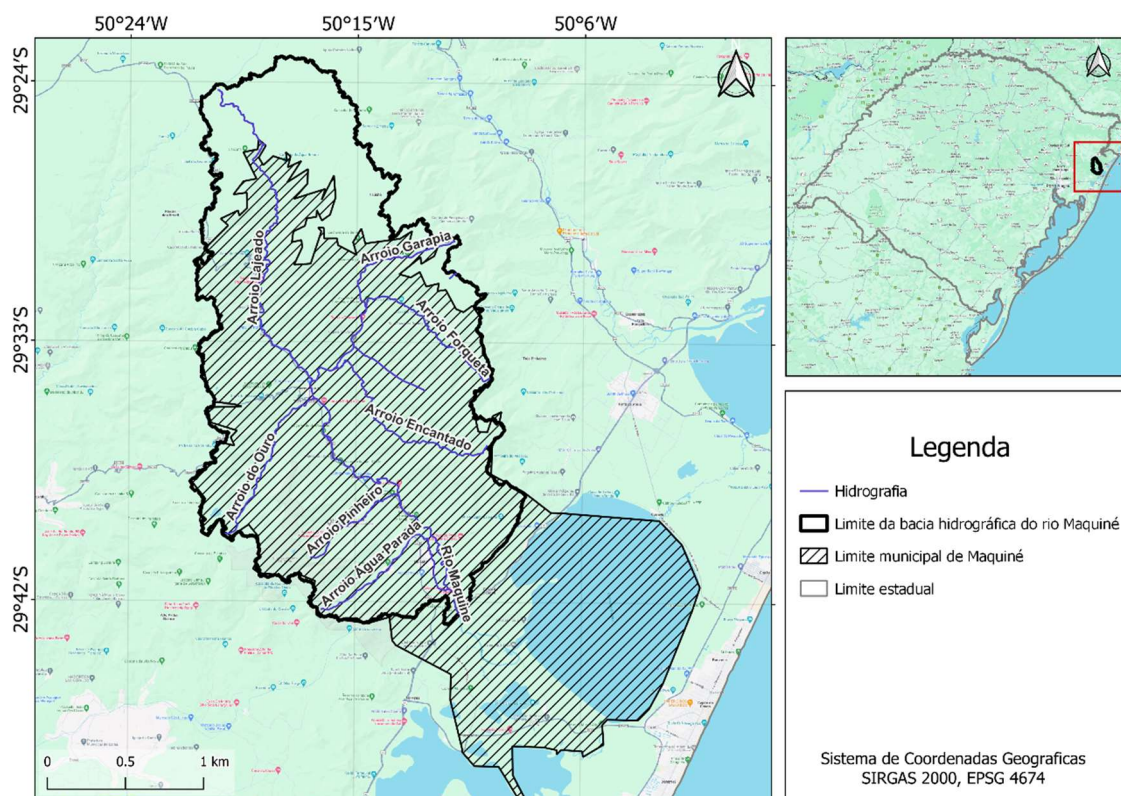


Figura 2. Localização da bacia e dos principais afluentes do rio Maquiné.  
Fonte: a autora.

Tabela 1. Características dos afluentes que compõem a vazão do rio Maquiné.

Nome	Altitude (m)		Comprimento (m)	Declividade	
	Nascente	Exutório		m	%
Arroio Água Parada	859,8	1	13.637	0,063	6,3%
Arroio do Ouro	836,5	52,03	11.888	0,066	6,6%
Arroio Encantado	718,1	66,96	14.917	0,044	4,4%
Arroio Forqueta	790,2	66,64	16.704	0,043	4,3%
Arroio Garapiá	875,3	118	9.270	0,082	8,2%
Arroio Lajeado	922,6	59,4	26.945	0,032	3,2%
Arroio Ligeiro	722,9	83,62	5.473	0,117	11,7%
Arroio Pinheiro	634,4	15,6	8.058	0,077	7,7%

Nome	Altitude (m)		Comprimento (m)	Declividade	
	Nascente	Exutório		m	%
Rio Maquiné	66,1	1	25.996	0,003	0,3%

Fonte: a autora.

Quanto ao regime de chuvas, segundo os dados do HidroWeb (ANA), para o ano de 2023, a máxima acumulada mensal ocorreu no mês de junho, com 372,2mm, e a mínima acumulada no mês de outubro, com 19,2mm. Os registros de precipitação acumulada nos demais meses do ano são apresentadas na Figura 3.

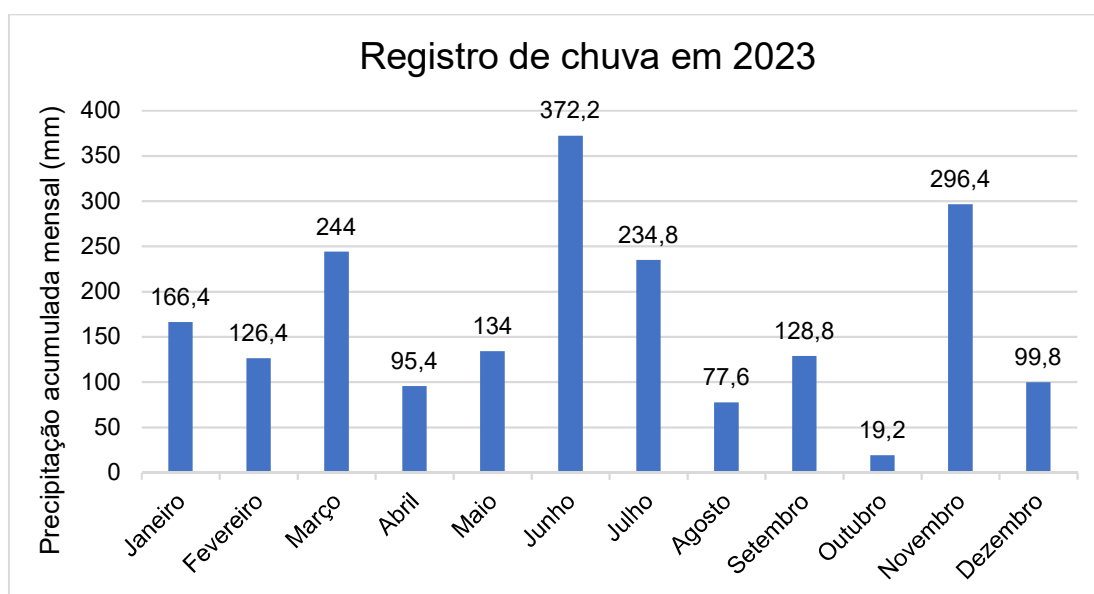


Figura 3. Precipitação acumulada mensal em 2023 - Estação Telemétrica Maquiné.

Fonte: a autora.

Os dados telemétricos (chuva e vazão) da estação Maquiné (código 293950120) são registrados desde a data 22/11/2019 até atualmente. Entretanto, não foi possível obter em tempo hábil os valores tabulares para o cálculo de estatísticas climáticas e demais utilizações por indisponibilidade do portal.

#### 4.2.2 Uso e ocupação do solo

Segundo o levantamento de uso e ocupação do solo elaborado pelo Mapbiomas, em 2022, a bacia do rio Maquiné era ocupada de acordo com a Figura 4. A Tabela 2 apresenta o percentual relativo à área total da bacia de cada classe de uso e ocupação.



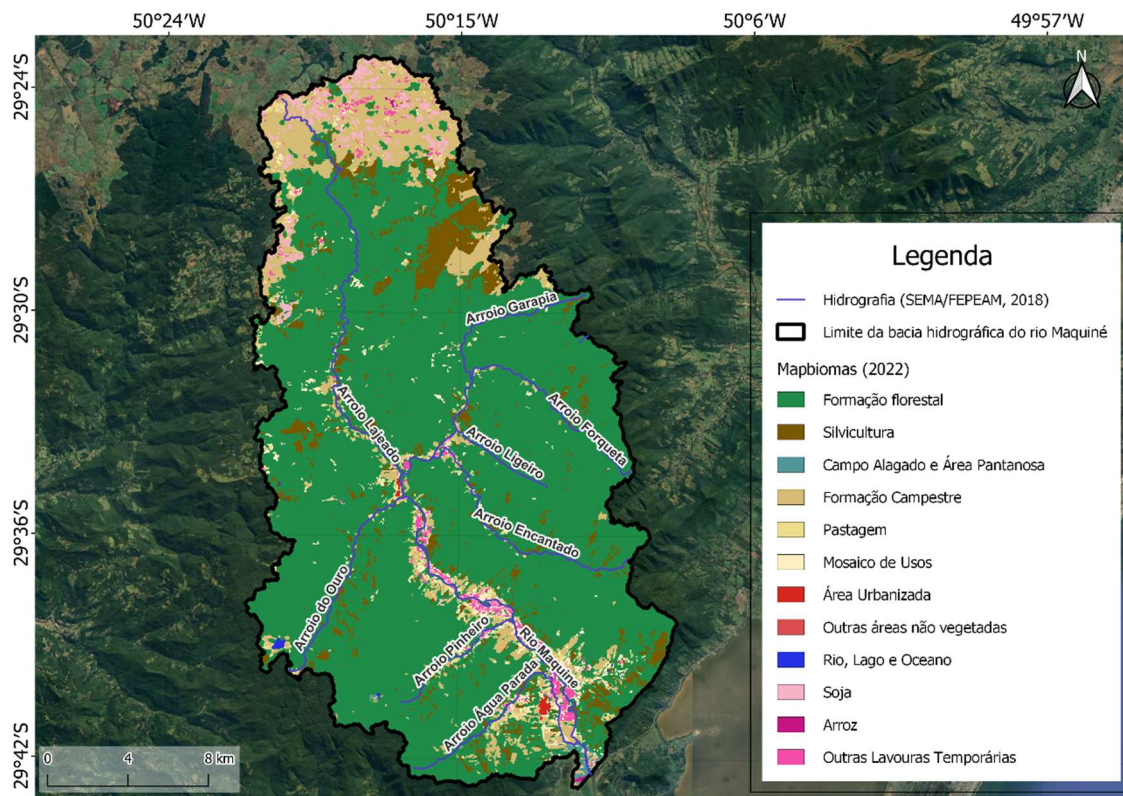


Figura 4. Uso e ocupação do solo para 2022 (Mapbiomas).

Fonte: a autora.

Tabela 2. Área e percentual relativo às classes de uso e ocupação ocorrentes na bacia.

Legenda	Código	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentagem da área total
Outras Áreas não vegetadas	25	0.04	0.01%
Arroz	40	0.27	0.05%
Área Urbanizada	24	0.54	0.11%
Rio, Lago e Oceano	33	0.62	0.12%
Campo Alagado e Área Pantanosa	11	1.13	0.22%
Outras Lavouras Temporárias	41	5.64	1.09%
Pastagem	15	6.98	1.35%
Soja	39	8.77	1.70%
Mosaico de Usos	21	11.96	2.33%
Silvicultura	9	35.82	6.94%
Formação Campestre	12	51.52	10.03%
Formação Florestal	3	392.06	76.06%
Total	-	515.35	100%

Fonte: a autora.



#### 4.2.3 Relevo

A caracterização altimétrica da bacia foi realizada a partir do modelo digital de terreno Anadem (ANA/UFRGS, 2023). Há grande variação altimétrica na bacia, com os pontos mais altos – topos de morro – com cotas próximas a 970m e os mais baixos próximos ao nível do mar como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

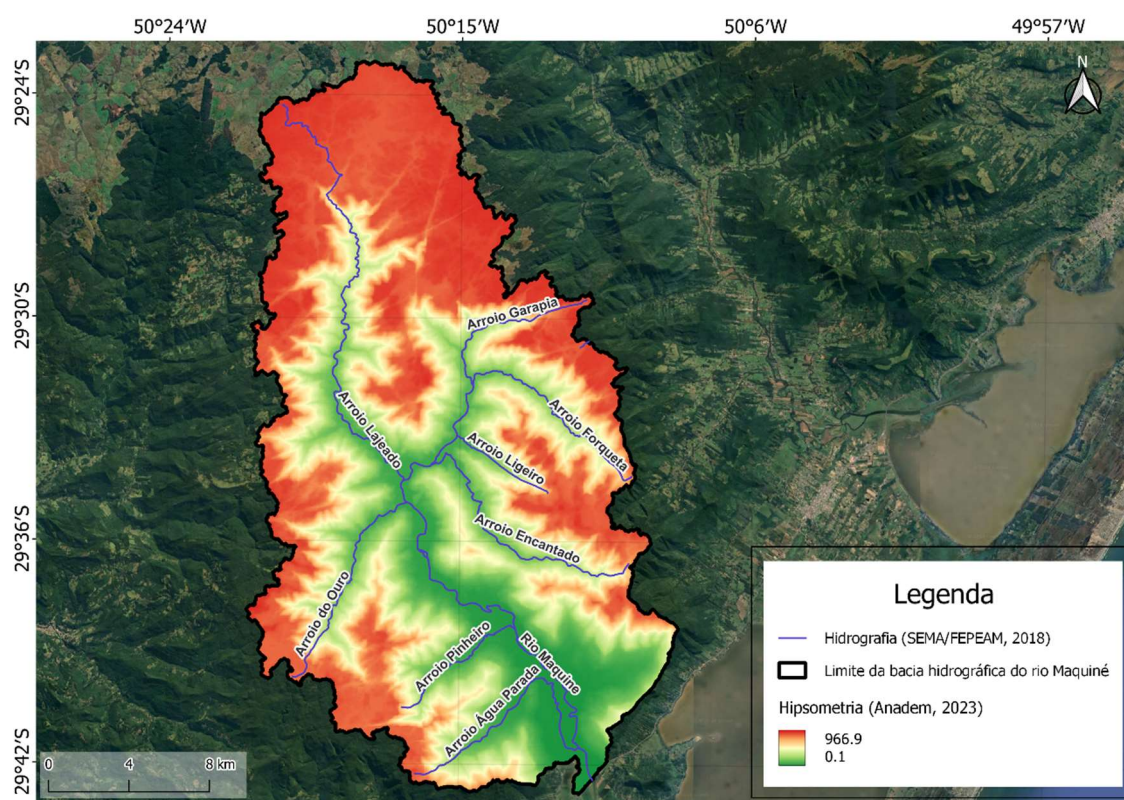


Figura 5. Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Maquiné.  
Fonte: a autora.

A área de estudo está inserida no contexto geológico da formação da Serra Geral, região centro-leste da Bacia do Paraná. Em relação ao relevo, a paisagem característica desta região é determinada por planícies e montanhas bem definidas ao longo de todo o vale do rio Maquiné, sendo cerca de 30% da região composta por áreas consideradas de planície ou com baixa declividade, e o restante, áreas de maior declividade (Menezes et al., 2022).

#### 4.2.4 Pedologia

Quanto a pedologia, os solos que predominam na região de estudo são da ordem Neossolos Litólico Chernossólico (RLm) e Cambissolo Húmico Alumínico (CHa), representando, respectivamente 55,2 e 31% da área da bacia

(Brasil, 1973). A Figura 6 apresenta a distribuição espacial pedológica e os tipos de solo ocorrentes na bacia.

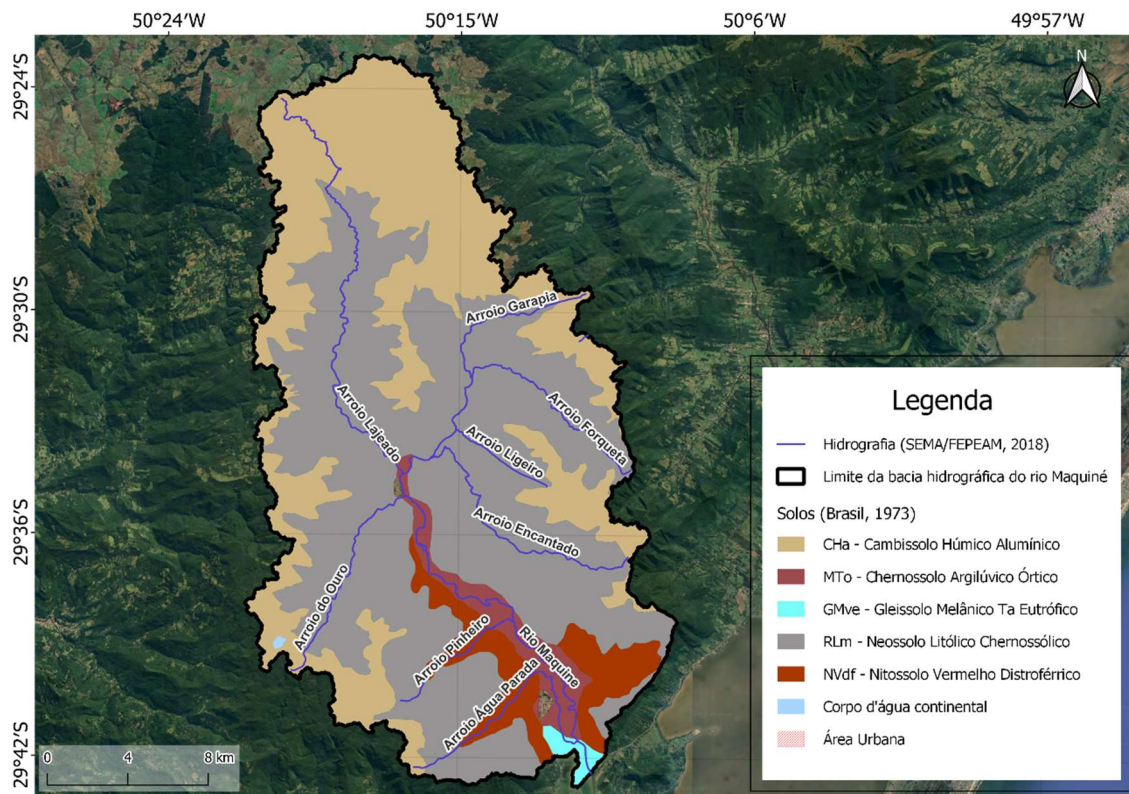


Figura 6. Mapa pedológico da bacia do rio Maquiné.

Fonte: a autora.

Os solos do tipo Neossolos Litólico Chernossólico são solos rasos, nos quais, geralmente, a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos. As limitações ao uso agrícola estão relacionadas a pouca profundidade do solo, presença da rocha e aos declives acentuados associados às áreas de ocorrência destes solos. Estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas agrícolas e elevam o risco de erosão. A fertilidade desse tipo de solo está condicionada à soma de bases e à presença de alumínio. São normalmente indicados para preservação da flora e fauna, mas em algumas regiões, verifica-se que estes solos são utilizados para pastagem, como no Rio Grande do Sul (Embrapa Solos, 2018).

Nas regiões de maior altitude, observa-se a ocorrência dos Cambissolos Húmicos Alumínicos. Esse tipo de solo são solos em estágio intermediário de intemperismo, com relação média a alta de silte e argila. Decorrem do



intemperismo que age sobre rochas sedimentares com elevados teores de matéria orgânica e baixa fertilidade natural, geralmente associados a áreas de relevo ondulado. Os terrenos associados a esse tipo de solo possuem baixa a muito baixa permeabilidade e pouca profundidade, com teores relativamente elevados de minerais primários facilmente intemperizáveis (SANTOS, 2015). Estão associados à média a alta suscetibilidade à erosão, tendo em vista seu fraco estruturamento e maturidade, principalmente quando associados a relevo forte ondulado em posições mais declivosas da paisagem (Embrapa Solos, 2018) como é o caso de Maquiné.

#### 4.2.5 Clima

De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é caracterizado como Subtropical úmido com verões quentes (Cfa) e Subtropical úmido com verões brandos e invernos frios (Cfb) (Castro & Rocha, 2019). O tipo climático Cfb ocorre nas áreas mais elevadas, em altitudes superiores a 700 metros, correspondendo as regiões de encosta e ao planalto. A temperatura média na região é inferior a 22°C para o mês mais quente.

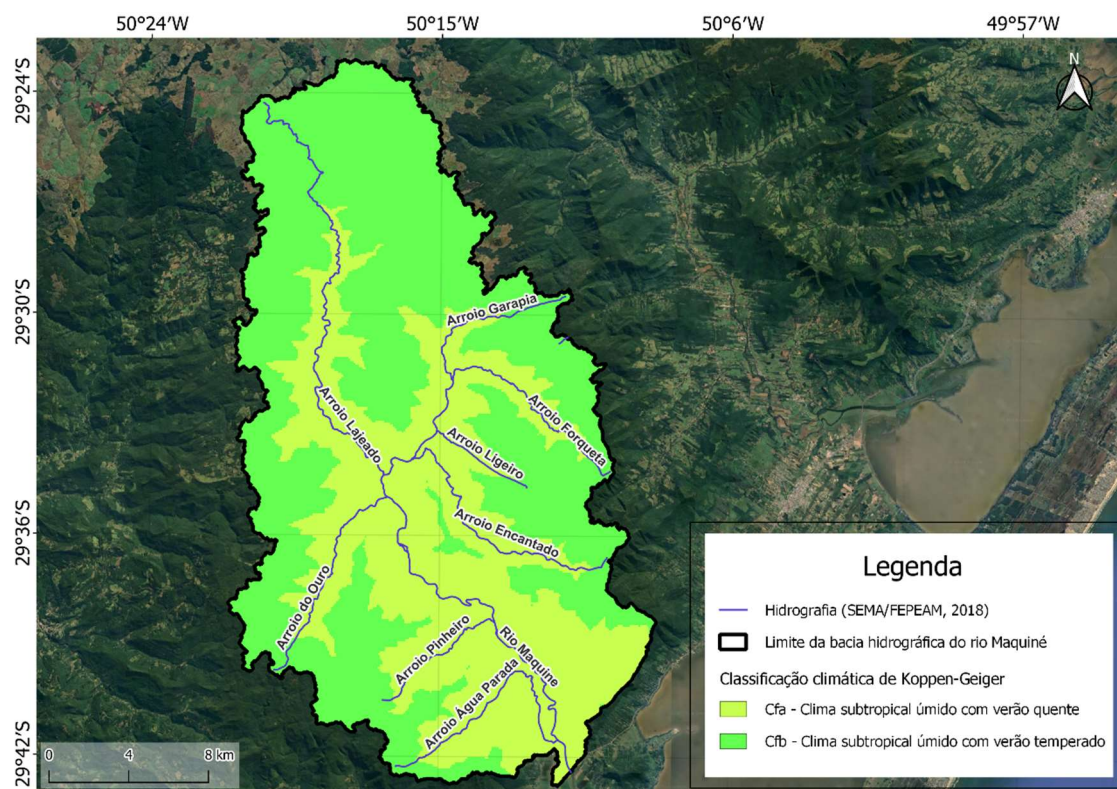


Figura 7. Classificação climática de Köppen-Geiger para a bacia do rio Maquiné.

Fonte: a autora.

O tipo Cfa abrange as áreas mais baixas pertencentes à planície costeira e parte inferior da encosta, em cotas geralmente inferiores a 700 metros, e caracteriza-se por temperaturas médias compreendidas entre -3°C e 18°C para o mês mais frio e superiores a 22°C para o mês mais quente, com a precipitação total superior a 1200 mm (Castro & Rocha, 2019).

### 4.3 Dados de entrada

#### 4.3.1 Modelo digital de terreno (MDT)

Para este estudo utilizou-se o MDT Anadem (ANA/UFRGS, 2023). O ANADEM é um modelo digital do terreno calculado a partir do MDT Copernicus GLO-30 com remoção de viés causado pela vegetação, com resolução espacial de 30 metros, e disponível para toda a América do Sul. O produto foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

#### 4.3.2 Uso e ocupação do solo

Como dado de entrada de uso e ocupação do solo, utilizou-se os mapas produzidos pelo Mapbiomas, coleção 8 (MAPBIOMAS, 2018). A Coleção 8 cobre o período de 1985 a 2022. Os mapas de cobertura e uso da terra do programa são produzidos por uma rede colaborativa de instituições brasileiras e especialistas em conservação e uso da terra. As imagens utilizadas pelo projeto são das séries históricas produzidas pelos satélites *Landsat*, com 30 m de resolução espacial. Todas as imagens disponíveis no ano são usadas para geração de mosaicos, com as bandas de reflectância, índices espectrais, temporais e de textura.

As classes de usos e coberturas do solo na bacia do rio Maquiné para o ano de 2022 foram apresentadas na Figura 4 e a compatibilização com a tipologia integrada ao banco de dados do SWAT é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Compatibilização das classes de uso e ocupação do solo com a tipologia do SWAT.

Legenda	Código	Código SWAT	Legenda SWAT
Outras Áreas não vegetadas	25	URML	Residential-Med/Low density
Arroz	40	RICE	Rice
Área Urbanizada	24	URHD	Residential-High Density
Rio, Lago e Oceano	33	WATR	Water

<b>Legenda</b>	<b>Código</b>	<b>Código SWAT</b>	<b>Legenda SWAT</b>
Campo Alagado e Área Pantanosa	11	WETW	Wetland_wet
Outras Lavouras Temporárias	41	AGRL	Agricultural land generic
Pastagem	15	PAST	Pasture
Soja	39	SOYB	Soybean
Mosaico de Usos	21	CRGR	Cropland/Grassland mosaic
Silvicultura	9	PINE	forest platation
Formação Campestre	12	GRAS	Grassland
Formação Florestal	3	FRSD_SUHF	Forest formation

Fonte: a autora.

#### 4.3.3 Tipos de solo

Para inserção dos dados de tipo de solo, é necessária a construção de um banco de dados com informações específicas de diferentes parâmetros para cada tipologia pedológica, sendo estes: HYDCRP (grupo hidrológico), SOL\_Z.MX (profundidade máxima), SOL\_Z (profundidade da camada), SOL\_BD (densidade aparente), SOL\_AWC (armazenamento de água no solo), SOL\_K (condutividade hidráulica), SOL\_CBN (carbono orgânico), CLAY (argila), SILT (silte), SAND (areia), ROCK (seixo), USLE\_K (erodibilidade).

Devido às limitações de dados enfrentadas, se optou por utilizar o modelo global de solos da FAO/UNESCO disponibilizado pelo SWAT. O modelo de solos da FAO/UNESCO foi preparado usando a série de mapas topográficos da Sociedade Geográfica Americana de Nova York em uma escala de 1:5.000.000, e conta com os arquivos associados “*Lookup\_Soil\_FAO-UNESCO.txt*”, que contém a correspondência entre o mapa de solos e o banco de dados de solos, e a tabela “*usersoil*” no banco de dados principal do SWAT, ambos necessários para a execução da simulação (Abbaspour, 2019).

#### 4.3.4 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU)

As Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU's) foram definidas após a inserção dos dados de relevo (obtidos por meio do MDT), mapas de classes, uso e ocupação do solo, e faixas de declividade. Nesta etapa da modelagem, foi feito inicialmente o delineamento da bacia do rio Maquiné em sub-bacias e posteriormente em HRU's. Para a obtenção dessas, foram inseridas as faixas de declividade da Embrapa (2009). As classes de declividade atribuídas a cada intervalo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Classes de declividade.

<b>Intervalo de declividade (%)</b>	<b>Classe atribuída</b>
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave Ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte Ondulado
45 – 75	Montanhoso
75<	Escarpado

Fonte: EMBRAPA (2009).

A etapa de geração das HRU's possibilita que o usuário adeque a quantidade de unidades gerada pelo modelo de acordo com o obtivo do estudo e da capacidade computacional que se tem disponível.

#### 4.3.5 Variáveis climáticas

Para o cálculo do balanço hídrico, é necessário que se insira dados de clima. A inserção dos dados climáticos é de suma importância e se dá de duas maneiras: através do banco de dados do gerador climático, de caráter obrigatório e que será usado para preencher possíveis falhas na série histórica, e através do banco de dados observados.

É comum que as séries de dados existentes disponíveis sejam inadequadas em termos de extensão e cobertura espacial, o que explica a necessidade de utilizar geradores meteorológicos que resolvam esses problemas. Esses geradores são capazes de produzir dados com as mesmas propriedades estatísticas dos dados observados (Vesely et al., 2019). O SWAT disponibiliza o gerador de clima WGEN, que pode preencher dados meteorológicos ausentes quando os dados observados não estão disponíveis (Richardson, 1981).

Na bacia do rio Maquiné, a estação de monitoramento existente é a estação fluviométrica Maquiné, código 87317030, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), que não possui pluviômetro, apenas uma série de vazão, a qual foi utilizada para calibração do modelo. Tal situação é comum no Brasil, visto que a rede de estações meteorológicas é relativamente recente, com poucas estações no país com séries consistentes (BIER et al, 2017).

Dessa forma, os desenvolvedores do SWAT, para ajudar os usuários, incluíram em seu site (SWAT, 2020) a opção de baixar dados diários de clima global (precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa) do Sistema de Previsão Climática Reanalizado (*Climate Forecast System Reanalysis - CFSR*) com resolução espacial de 38km (Saha et al., 2010) em formato de arquivo SWAT para um determinado local e período. Além disso, o SWAT também fornece um arquivo de banco de dados que inclui todos os dados estatísticos meteorológicos necessários para a operação do WGEN.

Segundo Menezes et al. (2019), que avaliou o uso de dados de reanálise (CFSR) na bacia do rio Maquiné, estes dados mostraram baixas correlações quando comparados a dados monitorados. Entretanto, dada a limitação de disponibilidade de dados, se optou por utilizar os dados climatológicos do CFSR. A utilização dos dados de acordo com cada etapa da modelagem é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Estações e dados climáticos utilizados na modelagem.

Origem	Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Tipo de dado	Intervalo de tempo	Etapa
CFSR	p-298-506	1	-29,82	-50,63	142	Precipitação, umidade relativa, temperatura, radiação solar, velocidade do vento	01/01/1979 a 31/07/2014	Simulação
	p-295-506	3	-29,51	-50,63	599			
	p-298-503	5	-29,82	-50,31	389			
	p-295-503	7	-29,51	-50,31	308			
CPRM	Maquiné	87317030	-29,65	-50,21	13	Vazão	1/1/1985 a 31/12/2013	Calibração manual

Fonte: a autora.

#### 4.4 Visita de campo

Visando a melhor compreensão da realidade atual da bacia e das dinâmicas ali existentes, realizou-se uma visita de campo no dia 27 de outubro de 2023 com o objetivo de coletar dados de manejo e cultivos existentes. Percorreu-se as margens do rio Maquiné, e as propriedades existentes entre a confluência do Arroio Lageado com os Arroios Garapiá e do Ouro (ponto mais a montante visitado) até a seção da estação Maquiné (ponto mais a jusante e exutório da bacia delimitada). A Figura 8 apresenta a localização dos pontos visitados e registrados.

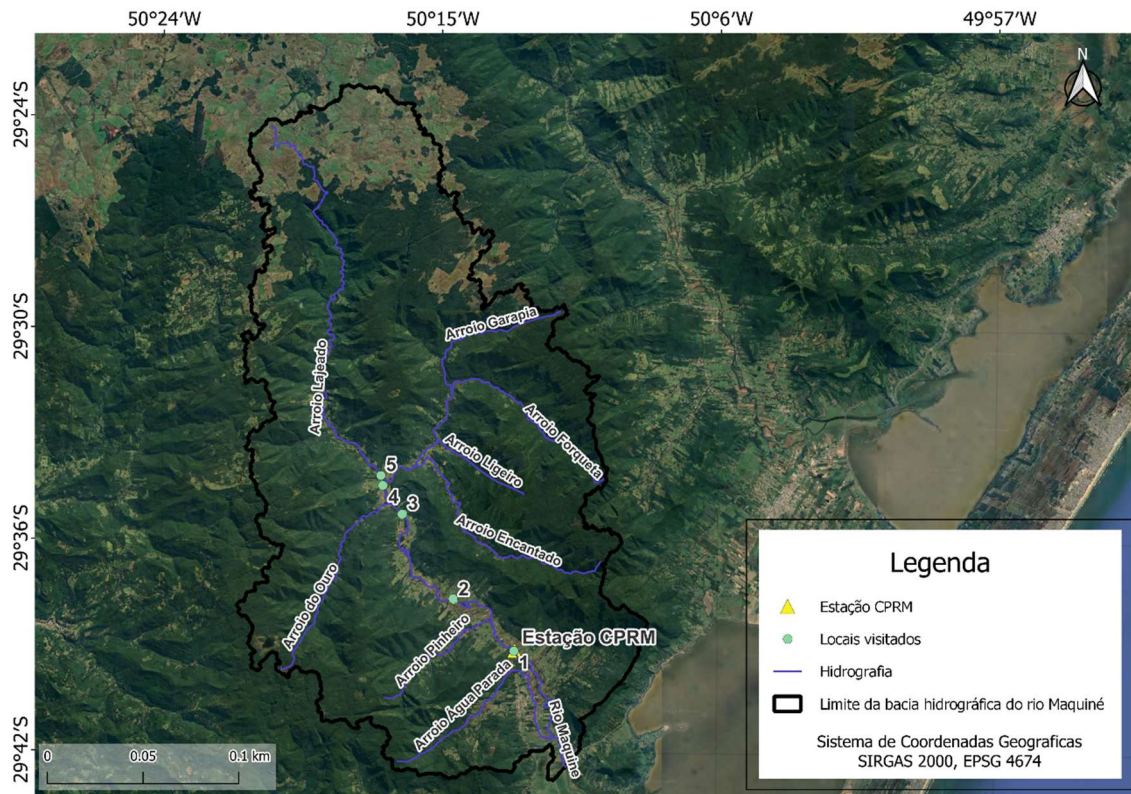


Figura 8. Locais visitados e registrados em campo.

Identificou-se *in loco* que a bacia é produtora de hortaliças, majoritariamente de alface, repolho, tomate e milho, o que condiz com o levantamento do censo agropecuário (IBGE, 2019). Todas as propriedades apresentaram indícios de manejo convencional do solo, ou seja, revolvimento completo da porção superficial do solo entre culturas. As Figuras de 6 a 8 apresentam as condições do solo e das culturas encontradas *in situ*.





Figura 9. Lavouras de alface com solo exposto e indício de erosão superficial.



Figura 10. Lavoura de milho com solo exposto.



Figura 11. Lavouras de hortaliças com solo exposto e sedimentos grosseiros.

Fonte: a autora.



#### 4.5 Modelagem com o SWAT

O SWAT, por ser um modelo de alta complexidade, já apresenta valores padrão para todos os coeficientes necessários nos cálculos, bem como o intervalo adequado de cada um, possibilitando que o usuário insira ou altere apenas os que julgar conveniente ou que tiver informações específicas. Dessa forma, dadas as limitações de dados da área de estudo e o objetivo final do presente trabalho, optou-se por alterar apenas alguns coeficientes das componentes hidrologia e sedimentos da etapa terrestre, e o fator P de manejo agrícola para a avaliação de adoção ou redução de práticas conservacionistas. Ademais, os valores associados a nutrientes e demais parâmetros de qualidade da água não foram alterados.

Atribuiu-se o valor de 0,05 de Manning (n) para toda a hidrografia gerada, que é usualmente associado a canais naturais com leito irregular (Porto, 1998), como é o caso da hidrografia de Maquiné. Para o cálculo de evapotranspiração, optou-se pelo método de Penman-Monteith, e, para a propagação da vazão, o método de Muskingum-Cunge. Os demais valores de coeficientes utilizados para a modelagem da bacia são apresentados na Tabela 6 na coluna “Valor”. Os intervalos de valores sugeridos e valores padrão também são apresentados.

Tabela 6. Coeficientes que compõem a modelagem da bacia.

Valor	Unidade	Descrição*	Variável no SWAT+	Padrão	Intervalo recomendado
3		Índice de área foliar em que não ocorre evaporação da superfície da água	lai_noevap	3	0 - 10
0		Armazenamento inicial de água no solo expresso como uma fração do conteúdo de água da capacidade de campo	sw_init	0	0 - 1
4		Coeficiente de atraso do escoamento superficial	surq_lag	4	0 - 24
1		Fator de ajuste da taxa de pico para encaminhamento de sedimentos na sub-bacia (canais tributários)	adj_pkrt	1	0,5 - 2
1		Fator de ajuste da taxa de pico para encaminhamento de sedimentos no canal principal	adj_pkrt_sed	1	0 - 2
0		Parâmetro linear para calcular a quantidade máxima de sedimentos que pode ser arrastada durante a rotação de sedimentos no canal	lin_sed	0,0001	0,0001 - 0,01
1		Parâmetro expoente para cálculo de sedimentos arrastados na rotação de sedimentos no canal	exp_sed	1	1 - 1,5
0		Fator de taxa de mineralização do húmus de nutrientes orgânicos ativos (N e P)	orgn_min	0,0003	0,001 - 0,003
20		Parâmetro de distribuição de absorção de nitrogênio	n_uptake	20	0 - 100
20		Parâmetro de distribuição de absorção de fósforo	p_uptake	20	0 - 100
0,1		Coeficiente de percolação de nitrato	n_perc	0,1	0 - 1
10	10 m <sup>3</sup> /Mg	Coeficiente de percolação de fósforo	p_perc	10	10 - 17,5
175	m <sup>3</sup> /Mg	Coeficiente de partição de fósforo no solo	p_soil	175	100 - 200
0,4		Índice de disponibilidade de fósforo	p_avail	0,4	0,01 - 0,7
0,05		Coeficiente de decomposição de resíduos	rsd_decomp	0,05	0,02 - 0,1
0,5		Coeficiente de percolação de pesticidas	pest_perc	0,5	0 - 1
0,75		Coeficiente de calibração para controlar o impacto da constante de tempo de armazenamento para o alcance em profundidade máxima	msk_co1	0,75	0 - 10
0,25		Coeficiente de calibração usado para controlar o impacto da constante de tempo de armazenamento para vazão baixa (onde vazão baixa ocorre quando o rio está a 0,1 profundidade de margem) sobre o valor de km calculado para o trecho	msk_co2	0,25	0 - 10
0,2		O fator de ponderação controla a importância relativa da taxa de entrada e taxa de saída na determinação do armazenamento ao alcance	msk_x	0,2	0 - 0,3
0,5		Coeficiente de concentração para fluxo de ladrilho e lixiviação da camada inferior	nperco_lchtile	0,5	0 - 1
0,6		Alcance do fator de ajuste de evaporação	evap_adj	0,6	0,5 - 1
1		Coeficiente de armazenamento de canal	scoef	1	0 - 1
1,4		Coeficiente de taxa exponencial de desnitrificação	denit_exp	1,4	0 - 3
1,3		Limite de desnitrificação teor de água	denit_frac	1,3	0 - 1

Valor	Unidade	Descrição*	Variável no SWAT+	Padrão	Intervalo recomendado
0,15		Fração de esterco aplicada em áreas de terra que possuem unidades formadoras de colônias ativas	man_bact	0,15	0 - 1
0		Fator de ajuste para tempo base do hidrograma unitário subdiário	adj_uhyd	0	0 - 1
0		Parâmetro para ajuste de solo congelado na infiltração/escoamento	cn_froz	0,000862	
0	hrs	Limite de tempo usado para definir dormência	dorm_hr	0	0 - 24
0	mm/km	Taxa de lapso de precipitação: mm por km de diferença de elevação	plaps	0	-25 - 25
0	deg C/km	Taxa de lapso de temperatura: graus C por km de diferença de elevação	tlaps	6,5	3 - 8
20	kg/ha	Fixação máxima diária-n	n_fix_max	20	1 - 20
0,01		Decaimento mínimo diário de resíduos	rsd_decay	0,01	0 - 0,05
0,3		Fator de cobertura de resíduos para cálculo da fração de cobertura	rsd_cover	0,3	0,1 - 0,5
1		Abstração inicial máxima para áreas urbanas ao usar Green & Ampt	urb_init_abst	1	0 - 1
5		Coeficiente alfa para hidrograma de unidade de função gama	uhyd_alpha	5	0,5 - 10
1		Coeficiente de erosão por respingo	splash	1	0,9 - 3,1
0,7		Coeficiente de erosão do sulco	rill	0,7	0,5 - 2
1,2		Coeficiente exponencial para escoamento superficial	surq_exp	1,2	1 - 3
0,03		Parâmetro de escala para cobertura e fator de manejo para erosão por escoamento superficial	cov_mgt	0,03	0,001 - 0,45
50	mm	Diâmetro médio das partículas do canal principal	cha_d50	50	10 - 100
400	ppm	Concentração de CO2 no início da simulação	CO <sub>2</sub>	400	100 - 1000
0	dias	Máximo de dias para atrasar hidrogramas para HRU, RU e canais de solos não drenantes	day_lag_max	0	0 - 3

\*A coluna de descrição foi traduzi da forma livre pela autora. Fonte: adaptado de SWAT+.

O trabalho desenvolvido por Moreira et al. (2019) na mesma bacia identificou maior sensibilidade nos coeficientes CN2 (número da curva para condição de umidade II); CANMAX (máximo interceptado pela vegetação) e GW\_REVAP (coeficiente de ascensão da água à zona de saturação) no SWAT. Assim, tais coeficientes tiveram seus valores alterados na etapa de calibração a partir da variação das vazões simuladas.

Para a calibração do modelo, se utilizou os dados de vazão da estação Maquiné do período de 1/1/1985 a 31/12/2013. Tal intervalo foi definido por estar compreendido pela série de dados climáticos monitorados por satélite. Ainda quanto a calibração, utilizou-se toda a série de vazão monitorada disponível, de forma que a etapa de validação com dados monitorados não foi realizada. Esta é uma limitação deste trabalho que pode ser superada em estudos futuros dividindo-se a série monitorada em intervalos temporais, ou de características climáticas semelhantes, como anos úmidos e anos secos, por exemplo.

Para avaliação dos resultados obtidos após a calibração, foi escolhida a função objetivo Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), amplamente empregada na literatura envolvendo modelagem hidrológica por meio do SWAT e cujo cálculo é apresentado na Equação 12.

Equação 12. Equação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - E)^2}$$

Onde  $E_m$  é o valor monitorado;  $E_s$  é o valor simulado;  $n$  é o número de eventos;  $E$  é a média de eventos monitorados. A classificação qualitativa dos valores de NSE, segundo Moriasi et al. (2015) é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7. – Classificação do coeficiente NSE para calibração em modelagem de vazões

<b>Classificação</b>	<b>NSE</b>
Muito boa	0,75 a 1
Boa	0,65 a 0,75
Satisfatória	0,50 a 0,65
Insatisfatória	<0,50

Fonte: Adaptado de (Moriasi et al., 2015).

Ao total, foram geradas 214 HRUs, sendo estas consideradas adequadas para representar as condições na bacia. Apesar de o modelo SWAT criar automaticamente um número maior de HRUs, devido às limitações computacionais, optou-se por reduzir o número destas.

#### 4.6 Cenários

Para avaliar a produção de sedimentos na bacia do rio Maquiné e o impacto da adoção de práticas conservacionistas nesta produção, dividiu-se a modelagem em dois cenários apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Cenário simulados.

<b>Cenário</b>	<b>Descrição</b>
1	Modelo calibrado para uso do solo atual com valores de práticas conservacionistas padrão. Neste cenário, espera-se reproduzir as condições atuais, com calibração a partir de dados observados de hidrograma no exutório da bacia. O modelo será considerado calibrado quando conseguir reproduzir os dados observados. No entanto, ressalta-se a inexistência de séries de concentração de sedimentos, de modo que o modelo será considerado calibrado apenas pelas vazões observadas.
2	Simulação com aumento dos valores de práticas conservacionistas nas regiões de maior produção de sedimentos. Esse cenário visa avaliar como se daria a produção de sedimentos na bacia caso as regiões mais sensíveis adotassem práticas conservacionistas.

Fonte: a autora.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira etapa de processamento, o SWAT gerou a bacia, as sub-bacias, e a hidrografia a partir do ponto de exutório escolhido. Neste trabalho, foi definido como exutório a seção próxima à estação fluviométrica da CPRM para que, posteriormente, fosse inserida a série de vazão disponível. Nove sub-bacias foram geradas para subdividir a bacia hidrográfica do rio Maquiné. O mapa da Figura 12 apresenta tais divisões e as HRU's geradas pelo modelo.

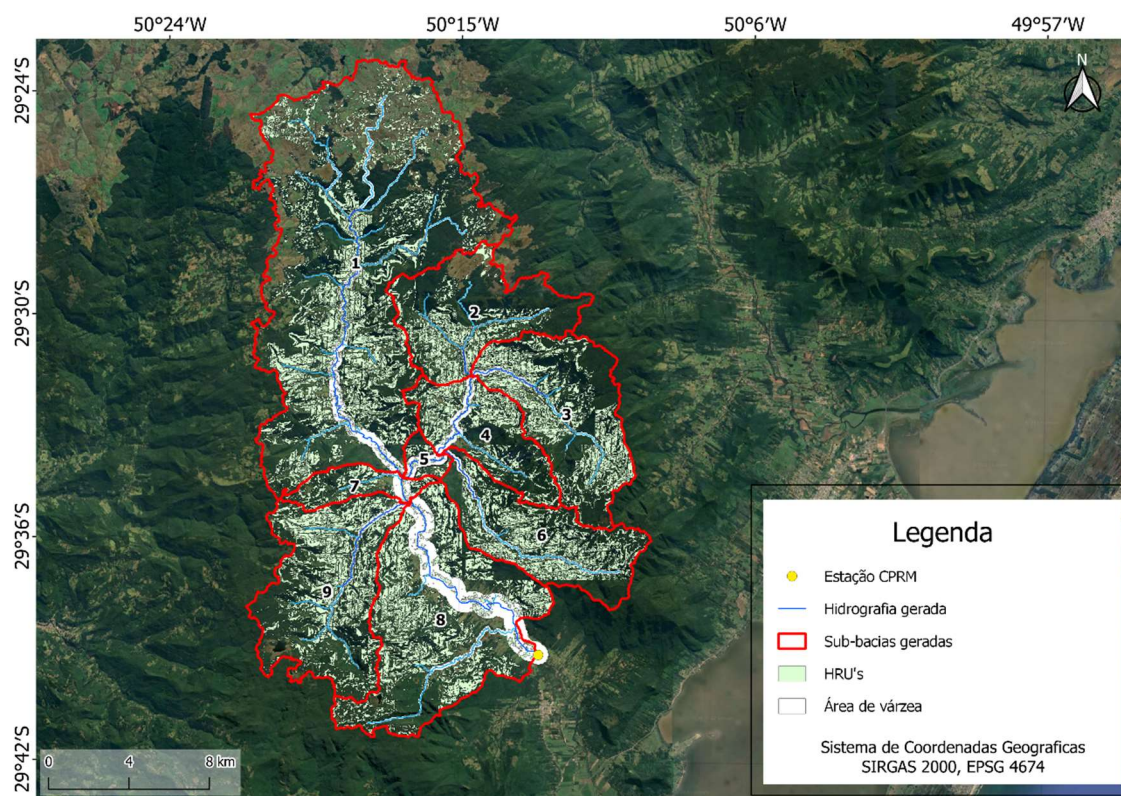


Figura 12. Sub-bacias, hidrografia e HRU's geradas pelo SWAT.

Fonte: a autora.

Todos os cenários foram simulados no período de 01/01/1979 a 31/07/2014 com 3 anos de aquecimento e passo de tempo mensal com o uso do solo atual. O gráfico da Figura 13 apresenta um comparativo entre a série observada e a simulada. O valor obtido de NSE foi de 0,420, sendo classificado como insatisfatório. Apesar disso, observa-se que, mesmo o hidrograma não simulando os picos de vazão, os valores médios são representados de forma adequada.

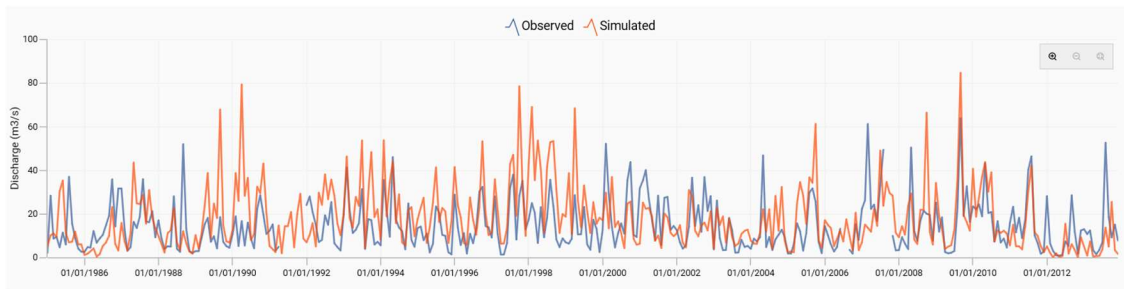


Figura 13. Gráfico gerado pelo modelo com a série observada e a simulada.

Fonte: a autora.

Na Figura 14 e na Figura 15. Fluxo sedimentológico no modelo calibrado. Figura 15 são apresentados o balanço hídrico e o fluxo de sedimentos básico no modelado calibrado.

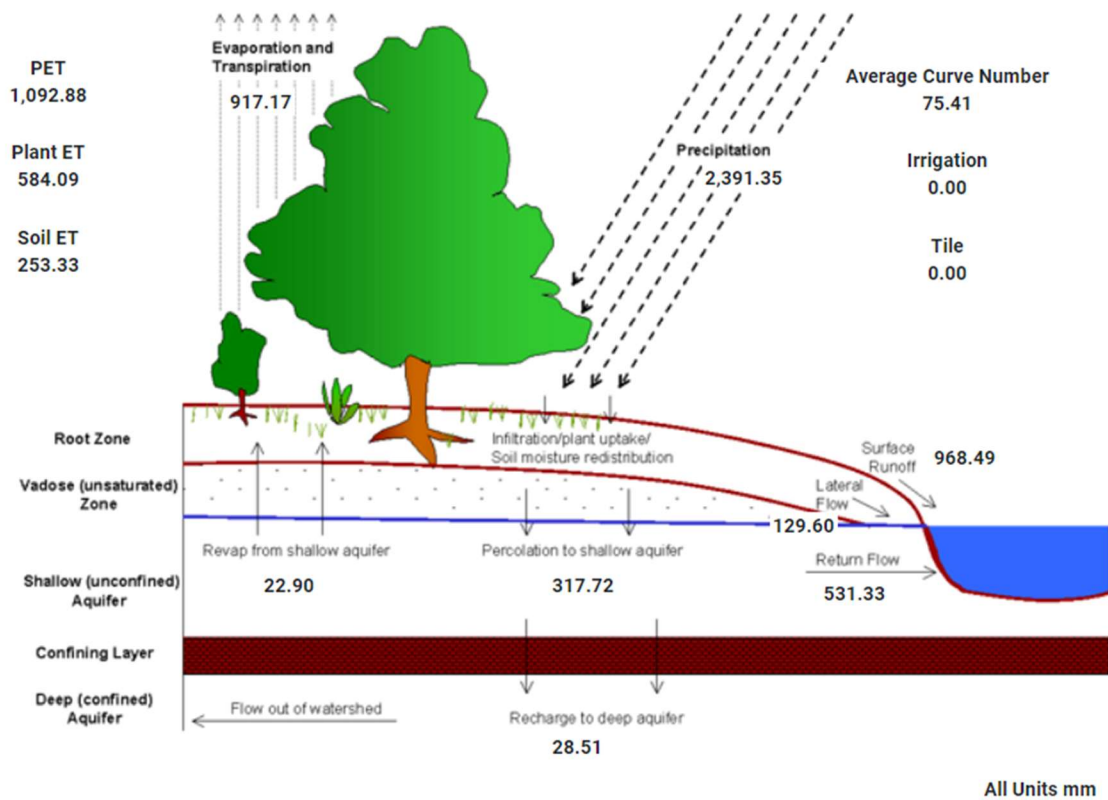


Figura 14. Balanço hídrico no modelo calibrado.

Fonte: a autora.



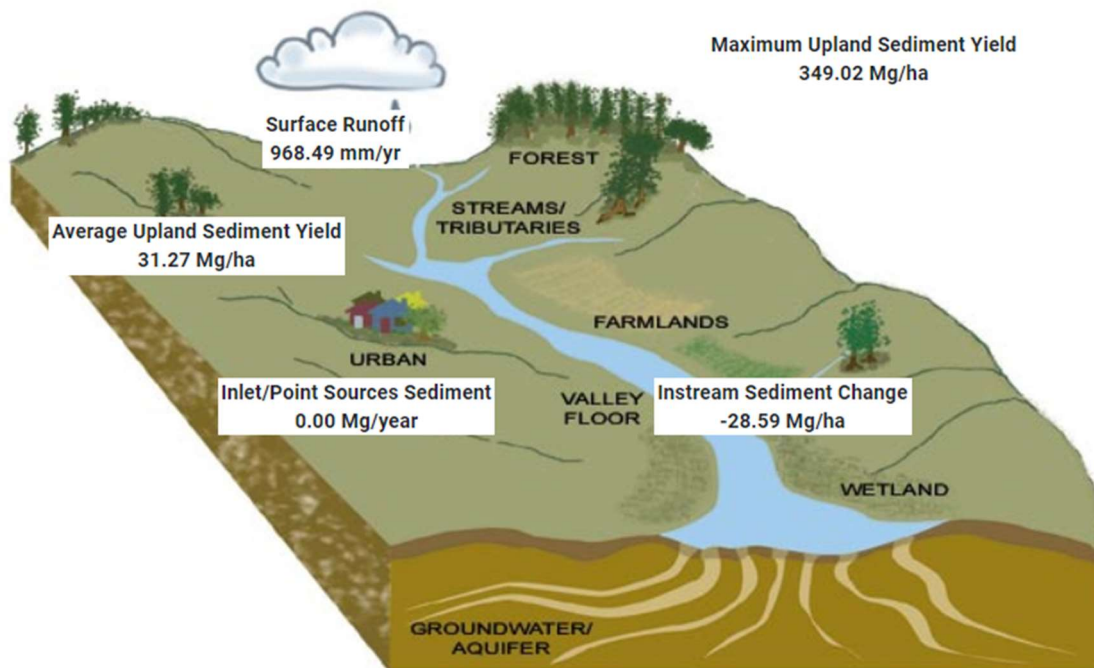


Figura 15. Fluxo sedimentológico no modelo calibrado.

Fonte: a autora.

Os quantitativos apresentados se mostraram coerentes quando comparados a trabalhos realizados em alguns dos afluentes do rio Maquiné, como no Arroio Garapiá (Bartelli, 2012) e no arroio Forqueta (Menezes, 2021). Entretanto, essa comparação subsidia-se em estimativas, visto que não foram encontrados dados monitorados de sedimento no restante da bacia e a calibração de todos os processos simulados se deu apenas com dados de vazão.

### 5.1 Cenário 1: Swat aplicado e calibrado para uso do solo atual

A Figura 16 apresenta as vazões médias calculadas para a bacia. Tal resultado mostra-se coerente com os valores médios observados, como apresentou anteriormente o hidrograma da Figura 13, e com as características geomorfológicas dos afluentes e do rio Maquiné.

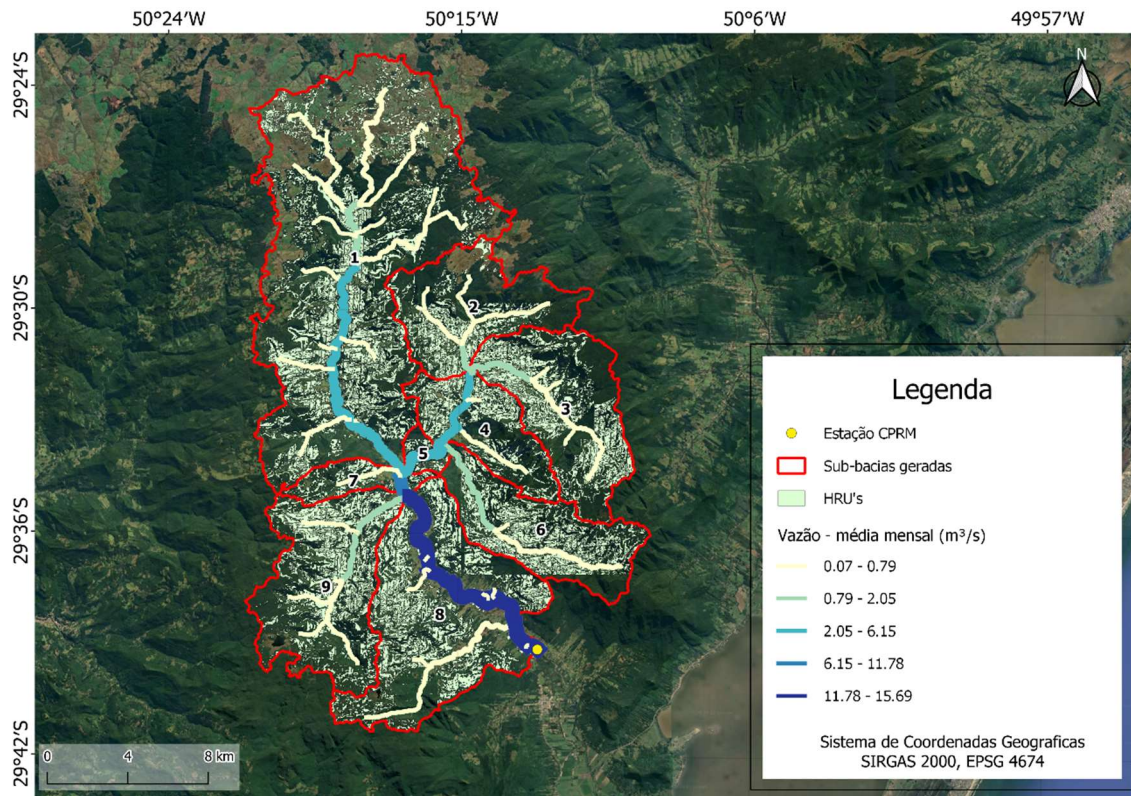


Figura 16. Modelagem hidrológica no cenário 1.

Fonte: a autora.

A Figura 17, que apresenta o resultado da modelagem da produção de sedimentos no cenário 1, aponta que as sub-bacias com maior produção de sedimentos são a 1 (arroio Lajeado, com dois trechos de maior produção) e a 9 (arroio do Ouro, trecho próximo a confluência com o rio Maquiné). Tal resultado pode ser associado às áreas antropizadas existentes nesses trechos, em especial, no segundo trecho do arroio Lajeado e no trecho próximo ao exutório do arroio do Ouro.

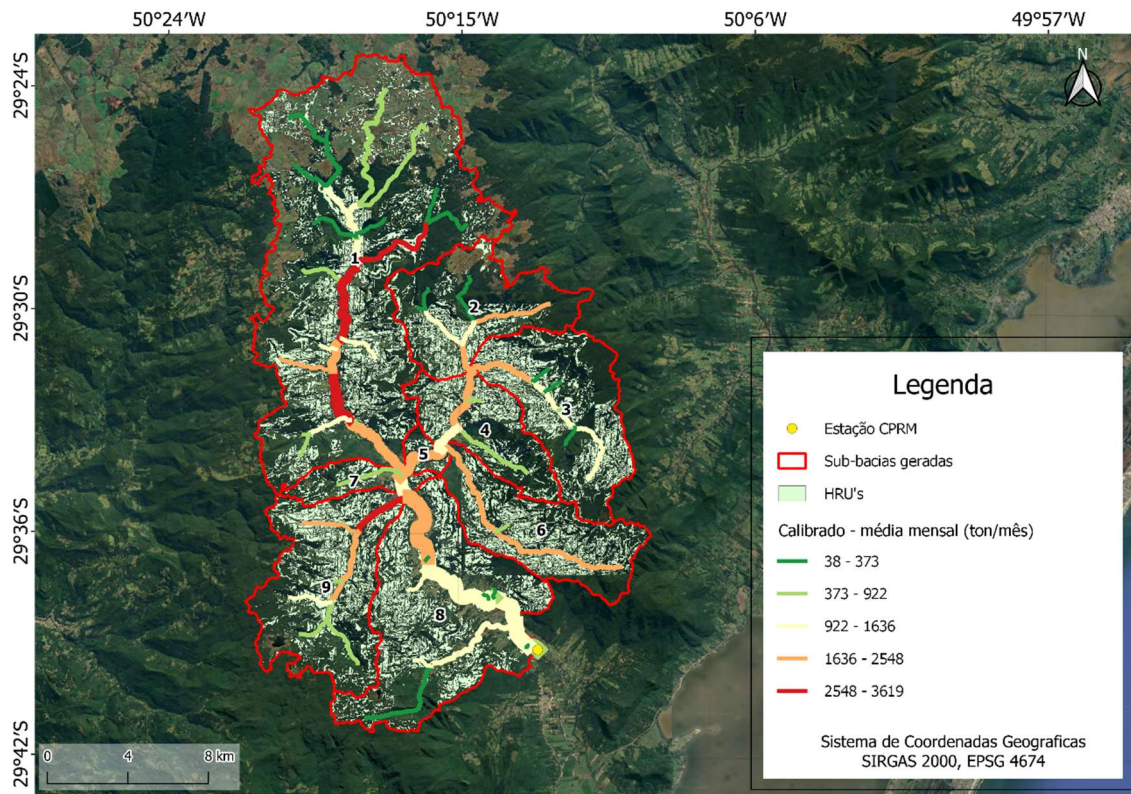


Figura 17. Resultado da produção de sedimento no Cenário 1.

Fonte: a autora.

Apesar de não ser possível afirmar que os resultados obtidos são representativos da realidade, pode-se dizer que a modelagem propicia uma compreensão geral dos processos hidrossedimentológicos na bacia.

## 5.2 Cenário 2: Aumento do fator P

Para simular o aumento das práticas conservacionista, aumentou-se em 50% o fator P nas bacias que apresentaram os maiores volumes de produção de sedimentos. O resultado do cenário 2 é apresentado na Figura 18.



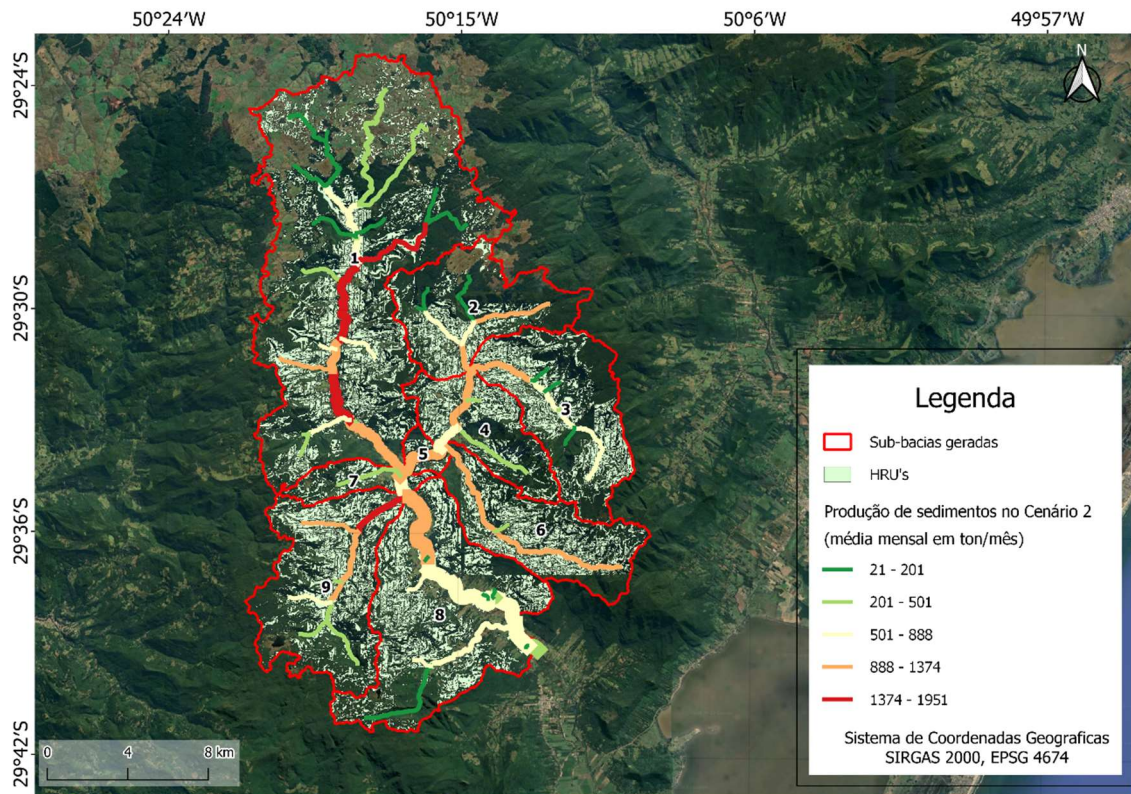


Figura 18. Resultado da produção de sedimentos no cenário 2.

Fonte: a autora.

A redução de sedimentos nos trechos de maior produção com a adoção de práticas conservacionista foi aproximadamente 54%. Ressalta-se que mesmo com a adoção das práticas, os trechos mais sensíveis permaneceram os mesmos. Portanto, pode-se concluir que de fato esses trechos são mais susceptíveis a erosão devido a suas características geológicas e de uso e ocupação. Outro ponto importante, é que apesar de a bacia 8 apresentar valores médios de produção nos dois cenários, ela é a que tem a maior vazão, conseqüentemente, é grande a sua capacidade de carrear grandes volumes de sedimentos.

## 6 CONCLUSÕES

O principal objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto da adoção de práticas conservacionistas na produção de sedimentos na bacia do rio Maquiné – RS através da modelagem hidrossedimentológicas com o SWAT. Como objetivos específicos, pretendia-se avaliar o desempenho do modelo para a bacia do rio Maquiné e quais as regiões mais susceptíveis a processos erosivos.

De forma geral, o modelo apresentou resultados coerentes com a realidade, não expondo valores esdrúxulos de produção de sedimentos. Entretanto, não se pode dizer que o modelo é representativo, pois está associado a muitas incertezas. Uma delas é que os dados climatológicos utilizados não representam bem as características climáticas da bacia. Além disso, o arquivo de tipos de solo utilizado está numa escala muito maior que a área da bacia, de forma que as características pedológicas não foram precisamente inseridas.

Outra limitação é que a modelagem realizada não considera processos erosivos do tipo movimento de massa que se sabe ocorrerem frequentemente em Maquiné. Quanto a etapa de calibração, ressalta-se que toda a série de vazão disponível foi utilizada, de forma que a etapa de validação do modelo não foi executada.

Portanto, conclui-se que o modelo tem potencialidades para agregar no conhecimento das dinâmicas hidrossedimentológicas da bacia, mas que estas não foram atingidas. Dessa forma, os resultados gerados neste estudo devem ser utilizados com parcimônia. A adoção de práticas conservacionistas indicou grande potencialidade de corroborar com a redução da perda de solo por erosão superficial, ainda que seja necessário o aprofundamento do tema na bacia do Maquiné.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se que trabalhos futuros enderecem os desafios apresentados pelas limitações deste trabalho e utilizem mais valores medidos em campo, como concentração de sedimentos, para calibração do modelo. Recomenda-se, portanto, que esforços sejam direcionados ao monitoramento

hidrossedimentológico na bacia, a fim de proteger a população e garantir a segurança alimentar e socioeconômica.

É comum que, tratando-se de eventos ambientais, a gestão pública seja do desastre, ou seja, pós sua ocorrência. Ressalta-se, portanto, que gerir visando a prevenção corrobora com a redução das perdas ambientais e humanas. Assim, recomenda-se que sejam intensificadas as ações dos órgãos gestores a fim de evitar os impactos e, posteriormente, mitigar seus prejuízos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida Filho, G. S. de. Processos erosivos urbanos (p. 40-63). In: Ambiente e Sedimentos. POLETO, C. (Org). Porto Alegre: ABRH, 2008, 404p.

Arnold, R. J. G., Srinivasan, A. R., Muttiah, R. S., & Williams, R. J. R. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

Bartelli, G. (2012). *BDU – Biblioteca Digital da UNIVATES* (<http://www.univates.br/bdu>).

Belló, S. L. (2004). *Características hidrosedimentométricas de duas pequenas áreas em fases distintas de urbanização em uma pequena bacia de encosta*.

Bonan, G. B. (2002). *Ecological climatology: Concepts and applications*. Cambridge University Press.

Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J., & Bogaart, P. (2015). Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177–188.

Carvalho, N. de O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. Editora Interciência.

Castro, D., & Rocha, C. M. da. (2019). *Ciclo das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí*. Via Sapiens.

Costas, M. F. T. (2003). *Avaliação hidrossedimentológica de uma pequena bacia em urbanização*. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26699>

Embrapa Solos. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Embrapa.

Fagundes, H. D. O. (2022). *SIMULAÇÃO DOS FLUXOS DE SEDIMENTOS NA AMÉRICA DO SUL*.

Goerl, R. F., Kobiyama, M., & Santos, I. (2012). HIDROGEOMORFOLOGIA: PRINCÍPIOS, CONCEITOS, PROCESSOS E APLICAÇÕES. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.166>

Guerra, A. J. T., Fullen, M. A., Jorge, M. do C. O., Bezerra, J. F. R., & Shokr, M. S. (2017). Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, 27(1), 27–41. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)

Jang, W. S., Engel, B., & Ryu, J. (2018). Efficient flow calibration method for accurate estimation of baseflow using a watershed scale hydrological model (SWAT). *Ecological Engineering*, 125, 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.007>

Maciel, M. M. (2000). *Aplicação da equação universal de perdas de solo (USLE) em ambiente de geoprocessamento e sua comparação com aptidão agrícola*. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/39052>

Mariani, P. P., dos Reis Castro, N. M., Sari, V., Schmitt, T. C., & Pedrollo, O. C. (2024). Different Infiltration Methods for Swat Model Seasonal Calibration of Flow and Sediment Production. *Water Resources Management*, 38(1), 303–322. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03671-1>

Menezes, D. (2019). *É SEMPRE ADEQUADO O USO DOS DADOS DE REANÁLISE (CFSR)? ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO MAQUINÉ/RS*. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5219>

Menezes, D. (2021). *CARACTERIZAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE TRECHO DO RIO FORQUETA, MAQUINÉ/RS*.

Menezes, D., Kobiyama, M., & Michel, G. (2022). Análise da composição da vazão na bacia hidrográfica do rio Forqueta (Maquiné/RS), Sul do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19(1), 11–0. <https://doi.org/10.21168/reg.v19e11>



Moreira, L. L., Schettert, T. F., Moraes, S. R., de Menezes, D., & Kobiyama, M. (2019). *XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*.

Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. John Wiley & Sons.

Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 58, 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

Pereira, C. N., & Castro, C. N. D. (2022). TD 2765—Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural. *Texto para Discussão*, 1–72. <https://doi.org/10.38116/td2765>

Pickbrenner, K. (2023). *Atlas pluviométrico do Brasil: Ciclone extratropical no Rio Grande do Sul em junho de 2023*. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

Renard, K. G. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Sari, V., Poletto, C., & Castro, N. M. dos R. (2013). *Caracterização dos processos hidrossedimentológicos em bacias rurais e urbanas*. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/248977>

Silva, A. M. da, & Schulz, H. E. (2002). Redução do desprendimento das partículas do solo mediante uso de resíduos vegetais de origem urbana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 531–534. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300026>

Vanzela, L. S. (2004). *Qualidade de água para a irrigação na microbacia do Córrego Três Barras no município de Marinópolis, SP*.

Venzon, P. T., Pinheiro, A., & Kaufmann, V. (2018). Hydrological simulation uncertainties in small basins through the SWAT model. *RBRH*, 23, e49. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180014>

Zanandrea, F., Kobiyama, M., & Michel, G. P. (2017). *Conectividade hidrossedimentológica: Uma abordagem conceitual*. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173604>

Williams, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA. ARS-S-40, 1975.

Wischmeier, W.H. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.*, Ankeny, 31:5-9, 1976.

Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (USDA AH-537).