

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Warlen Librelon de Oliveira

**PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE PARA
MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Belo Horizonte

2024

Warlen Librelon de Oliveira

**PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE PARA
MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais
como requisito parcial para a obtenção do título de
Doutor

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antônio Nero
Coorientador: Prof. Dr. Diego Rodrigues Macedo

Belo Horizonte

2024

O48p
2024

Oliveira, Warlen Librelon de.

Proposta de um índice de impedância de superfície para modelagem de processos erosivos em bacias hidrográficas [manuscrito] / Warlen Librelon de Oliveira. – 2024.

134 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Marcelo Antônio Nero.

Coorientador: Diego Rodrigues Macedo.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 86-94.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Sedimentologia – Teses. 3. Bacias hidrográficas – Teses. I. Nero, Marcelo Antônio. II. Macedo, Diego Rodrigues. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

**"PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE PARA MODELAGEM DE
PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS"**

Warlen Librelon de Oliveira

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **07 de outubro de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Marcelo Antônio Nero - Orientador

Universidade Federal de Minas Gerais

Diego Rodrigues Macedo - Coorientador

Universidade Federal de Minas Gerais

Antônio Pereira Magalhães Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais

Frederico Wagner de Azevedo Lopes

Universidade Federal de Minas Gerais

Vagner Braga Nunes Coelho

Universidade Federal de Minas Gerais

Luís Felipe Soares Cherem

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 14 de outubro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Diego Rodrigues Macedo, Professor do Magistério Superior**, em 14/10/2024, às 12:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 15/10/2024, às 10:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Wagner de Azevedo Lopes, Professor do Magistério Superior**, em 16/10/2024, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Felipe Soares Cherem, Professor do Magistério Superior**, em 16/10/2024, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Pereira Magalhaes Junior, Professor do Magistério Superior**, em 17/10/2024, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vagner Braga Nunes Coelho, Chefe de departamento**, em 20/10/2024, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3639464 e o código CRC C2ED44A1.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder condições para a busca constante de conhecimento e dedicação para conquistar os objetivos.

Aos meus pais Rosimar Librelon de Oliveira (em memória) e Benedito Oliveira Santana, pela educação, caráter e responsabilidade para com as pessoas e com o trabalho.

Aos meus filhos Thainan Augusto Campos Librelon e Luanna Alice Campos Librelon, por estarem sempre ao lado e acreditando nas minhas escolhas.

A toda família que acompanharem o percurso dessa longa estrada e sempre apoiando.

A Luciana A. F. Librelon pela paciência e no convívio direto durante todo esse estudo.

Aos amigos que tive que renunciar o convívio social por inúmeras vezes nesse período.

Aos amigos da Universidade que acompanharam de perto e sempre dispostos nas diversas contribuições e parceria na evolução do conhecimento, especialmente pela Andrea, Alessandra, Charles, Paulo Henrique, Heitor e Bárbara que estiveram mais próximos.

À coordenação, funcionários do programa e professores que tive a honra de estudar e que também contribuíram de maneira exemplar para meu conhecimento.

Ao professor Marcelo Antônio Nero (orientador) por ter conduzido de maneira brilhante, dedicado e atento aos mínimos detalhes.

Ao professor Diego Rodrigues Macedo (coorientador) pela contribuição irrefutável e o compartilhamento da experiência no tema em questão.

Aos membros da banca profs.: Antônio Pereira Magalhães Júnior, Frederico Wagner de Azevedo Lopes, Vagner Braga Nunes Coelho e Luís Felipe Soares Cherem pelas excelentes contribuições no processo de avaliação.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de doutorado nos últimos 22 meses que permitiu a realização do trabalho.

RESUMO

A conectividade de sedimentos é um método utilizado para avaliar a probabilidade de transporte de sedimentos e prever possíveis impactos ambientais negativos. Ela envolve a transferência integrada de sedimentos, com componentes estruturais e funcionais. Os índices de conectividade de sedimentos são ferramentas valiosas para a gestão do uso da terra, especialmente no que diz respeito à identificação de áreas de risco para escorregamentos e movimentos de massa. No entanto, a impedância da superfície, um dos parâmetros usados nesses índices, enfrenta críticas devido à incerteza associada ao uso de valores tabelados que não refletem a diversidade das paisagens. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um novo índice de impedância da superfície (IIS) que integra o peso relativo das variáveis uso e ocupação da terra, solo e declividade obtidos a partir de modelagens hidrossedimentológicas. A proposta visa ajustar a representação da impedância da superfície para melhor ponderar a resistência ao fluxo de sedimentos, contribuindo para uma modelagem mais precisa da dinâmica dos sedimentos. A metodologia foi estruturada em cinco blocos sequenciais: modelagem hidrossedimentológica; identificação da importância relativa das variáveis espaciais (uso da terra, tipos de solo e declividade); formulação do índice de impedância baseado nessas variáveis; validação do índice; aplicação do índice desenvolvido nas regiões modeladas utilizando como parâmetro no índice de Cavalli (2013). Diversos *softwares* livres foram utilizados, incluindo o QGIS para geoprocessamento, o SWAT para modelagem hidrossedimentológica, e o R para as análises estatísticas. Um *software* de gestão desenvolvido pelo autor integrou os dados com esses *softwares* para uma melhor organização e processamentos. As áreas de estudo incluíram diversas bacias hidrográficas no Brasil, selecionadas por suas características hidrológicas e por conta dos dados de monitoramento sedimentológico. A modelagem hidrossedimentológica utilizou o SWAT para simular a produção de sedimentos, com a calibração e a validação dos modelos baseadas em coeficientes de eficiência. A importância relativa das variáveis espaciais foi determinada com o emprego de Redes Neurais Artificiais. O índice de impedância de superfície (IIS) foi validado com a equação USLE e aplicado na conectividade sedimentológica, utilizando o *software* SedInConnect para calcular os índices de conectividade. A calibração e a validação dos modelos hidrossedimentológicos garantiram a precisão das simulações. A análise dos resultados mostrou que as simulações de vazão e de sedimentos tiveram um bom ajuste, com coeficientes de eficiência satisfatórios. A análise da distribuição das taxas de produção de sedimento revelou que a agricultura possui maiores taxas, especialmente nas áreas de maior densidade. A importância relativa das variáveis espaciais foi determinada empregando-se Redes Neurais Artificiais, mostrando que a agricultura tem maior influência na taxa de produção de sedimento. O IIS foi validado pela adaptação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), demonstrando-se correlações satisfatórias com a taxa de produção de sedimento. A aplicação do IIS no Índice de Conectividade de Sedimento (IC) apresentou maior coerência com a taxa de produção de sedimentos em comparação com o uso da rugosidade de superfície.

Palavras-chave: hidrossedimentologia; conectividade sedimentológica; modelagem SWAT; erosão de solo; dinâmica de sedimentos.

ABSTRACT

Sediment connectivity is a method used to assess the probability of sediment transport and predict potential negative environmental impacts. It involves the integrated transfer of sediments, with structural and functional components. Sediment connectivity indices are valuable tools for land use management, especially with regard to identifying areas at risk for landslides and mass movements. However, surface impedance, one of the parameters used in these indices, faces criticism due to the uncertainty associated with the use of tabulated values that do not reflect the diversity of landscapes. Thus, this work proposes the development of a new surface impedance index (SII) that integrates the relative weight of the variables land use and occupation, soil and slope obtained from hydrosedimentological modeling. The proposal aims to adjust the representation of surface impedance to better weight the resistance to sediment flow, contributing to a more accurate modeling of sediment dynamics. The methodology was structured in five sequential blocks: hydrosedimentological modeling; identification of the relative importance of spatial variables (land use, soil types, and slope); formulation of the impedance index based on these variables; validation of the index; application of the developed index in the modeled regions using the Cavalli index (2013) as a parameter. Several free software programs were used, including QGIS for geoprocessing, SWAT for hydrosedimentological modeling, and R for statistical analysis. A management software developed by the author integrated the data with these programs for better organization and processing. The study areas included several river basins in Brazil, selected for their hydrological characteristics and sedimentological monitoring data. The hydrosedimentological modeling used SWAT to simulate sediment production, with calibration and validation of the models based on efficiency coefficients. The relative importance of the spatial variables was determined using Artificial Neural Networks. The surface impedance index (SII) was validated with the USLE equation and applied to sedimentological connectivity, using the SedInConnect software to calculate the connectivity indices. Calibration and validation of the hydrosedimentological models ensured the accuracy of the simulations. The analysis of the results showed that the flow and sediment simulations had a good fit, with satisfactory efficiency coefficients. The analysis of the distribution of sediment production rates revealed that agriculture has higher rates, especially in areas of higher density. The relative importance of the spatial variables was determined using Artificial Neural Networks, showing that agriculture has a greater influence on the sediment production rate. The SII was validated by adapting the Universal Soil Loss Equation (USLE), demonstrating satisfactory correlations with the sediment production rate. The application of the SII in the Sediment Connectivity Index (SI) showed greater coherence with the sediment production rate compared to the use of surface roughness.

Keywords: hydro sedimentology; sedimentological connectivity; swat modeling; soil erosion; sediment dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismo de funcionamento do modelo SWAT	18
Figura 2 - Esquema da geração de HRU na bacia hidrográfica	19
Figura 3 - Representação esquemática do ciclo hidrológico	19
Figura 4 - Processos de fluxos modelados no SWAT	20
Figura 5 – Fluxograma Geral do projeto	29
Figura 6 – Fluxograma discriminado dos módulos do projeto	30
Figura 7 – Bacias aplicadas na modelagem hidrossedimentológica	33
Figura 8 – Estrutura da metodologia de modelagem do SWAT	35
Figura 9 – Mapas para modelagem hidrossedimentológica – Bacia do Alto Paraguai	36
Figura 10 - Tela do software SedInConnect	50
Figura 11 - Componentes da paisagem para o índice de conectividade de sedimentos	51
Figura 12 - Taxas de produção de sedimento para bacias simuladas	60
Figura 13 - Intervalo de taxas de produção de sedimento – Bacias selecionadas	62
Figura 15 - Distribuição da taxa de produção de sedimento por uso e ocupação do solo	64
Figura 16 - Distribuição da taxa de produção de sedimento por tipo de solo	66
Figura 17: Distribuição da taxa de produção de sedimento por declividade	68
Figura 18 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Agricultura/Latossolo	70
Figura 19 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Pastagem/Argissolo	71
Figura 20 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Vegetação Natural/Argissolo	71
Figura 21 - Taxa de produção de sedimento por HRU – Vegetação Natural/Declividade:0 a 3%	72
Figura 22 - Taxa de produção de sedimento por HRU – Latossolo/Declividade: 0 a 3%	72
Figura 23 - Importância relativa das classes de uso e ocupação do solo	73
Figura 24 - Importância relativa para classes de solo	74
Figura 25 - Importância relativa para classe de declividade	74
Figura 26 - Correlação da USLE Tradicional com USLE Adaptada	76
Figura 27 - Resultados da USLE Adaptada com IIS	77
Figura 28 - Aplicação do Índice de Conectividade de Sedimento para a Bacia hidrográfica do Rio Jauru	78
Figura 29 - Comparação dos Índices de Conectividade de sedimento com a taxa de produção de sedimento. (A) IIS, (B)Rugosidade de superfície e (C) Taxa de produção de sedimentos	79
Figura 30 - Índice de conectividade com IIS com resolução de 90m (A), 30m (B) e 2,5m (C)	80
Figura 31 - Índice de conectividade com IR com resolução de 90m (A), 30m(B) e 2,5m (C)	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações hidrossedimentológicas aplicadas nas modelagens	37
Tabela 2 - Variáveis climáticas das estações de monitoramento (não seria interessante colocar coluna de unidade de medida?).....	40
Tabela 3 - Reclassificação de uso e ocupação da terra para o projeto.....	43
Tabela 4 - Estrutura de tabela no formato dummy para uso na RNA.....	45
Tabela 5 - Configurações das RNAs para identificação das importâncias relativas das classes	46
Tabela 6 – Pesos das variáveis hidrossedimentológicas por grupo	46
Tabela 7 – Importância relativa das variáveis hidrossedimentológicas geral.....	47
Tabela 8 - Quantidade de sub-bacias e HRUs das áreas modeladas.....	52
Tabela 9 - Parâmetros calibrados para as bacias	56
Tabela 10 - Características dos arquivos de entrada de parâmetros do SWAT	57
Tabela 11 - Resultados das simulações para vazão	57
Tabela 12 - Resultados das simulações para sedimentos.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Relação de softwares aplicados no projeto	31
Quadro 2 - Estações climáticas com dados de precipitação aplicadas nas.....	38
Quadro 3 - Interpretação para coeficiente KGE.....	41
Quadro 4 - Interpretação para coeficiente pBias.....	42
Quadro 5 - Interpretação para coeficiente de Pearson.....	43
Quadro 6 - Configuração das áreas das classes após a modelagem	53
Quadro 7 - Configuração das áreas das classes após a modelagem (cont.).....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANA – Agência Nacional de Água e Saneamento
- CFSR – Climate Forecast System Reanalysis
- EIA – Estudo de Impacto Ambiental
- HRU – Hydrological Response Unit
- IC – Índice de conectividade
- ICJ – Index Connectivity Join
- ICR – Índice de Concentração de Rugosidade
- IIS – Índice de Impedância de Superfície
- IR_d – Importância Relativa da Declividade
- IR_s – Importância Relativa do Solo
- IR_u – Importância Relativa de Uso da Terra
- KGE – Kling-Gupta Efficiency
- MAD – Median Absolute Directional
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MCS – Monte Carlo Simulation
- MUSLE – Modified Universal Soil Loss Equation
- NCEP – National Centers for Environmental Prediction
- RCI – Relative Connect Index
- RI – Índice de Rugosidade
- RNA – Redes Neurais Artificiais
- SCI – Simplified Connectivity Index
- SEED – Sediment Delivery Distributed
- SSP – Specific Sediment Potential
- SWAT – Soil and Water Assessment Tool
- USLE – Universal Soil Loss Equation

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMAS DE PESQUISA	14
1.2. HIPÓTESES.....	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1. Objetivo geral	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA	16
2.2. CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA	21
2.3. RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE E IMPEDÂNCIA.....	25
2.4. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. ESTRUTURA GERAL	29
3.2. ÁREAS DE ESTUDO.....	32
3.3. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA	34
3.3.1. Série histórica climática e hidrossedimentológica	37
3.3.2. Calibração e validação dos modelos hidrossedimentológicos	40
3.4. DINÂMICA DE SEDIMENTOS	43
3.4.1. Análise de distribuição da taxa de sedimento	44
3.4.2. Relações entre variáveis espaciais e taxa de sedimento	44
3.4.3. Importância relativa das variáveis espaciais na taxa de sedimento	44
3.5. PROPOSTA DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS.....	46
3.5.1. Validação do Índice de Impedância de Superfície (IIS)	47
3.5.2. Aplicação do IIS na conectividade sedimentológica	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA	52
4.1.1. Estrutura das bacias e HRUs	52
4.1.2. Calibração dos modelos	55
4.1.3. Resultados das simulações	57
4.2. DINÂMICA DOS SEDIMENTOS	60
4.2.1. Produção de sedimento nas áreas de estudo	60
4.2.2. Distribuição das taxas de produção de sedimento	62
4.2.3. Taxa de sedimento sob influência das variáveis espaciais combinadas	70
4.2.4. Importância relativa do uso e ocupação da terra, solo e declividade na taxa de sedimento	73

4.3. VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS.....	75
4.4. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS.....	78
5. CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE.....	95
Apêndice A - Mapas de entrada para modelagem hidrossedimentológica	95
Apêndice B - Calibração e validação para vazão	101
Apêndice C - Calibração e validação para sedimento.....	105
Apêndice D – Taxa média de produção de sedimento por agrupamento de HRU	108
Apêndice E - Aplicações do Índice de Conectividade Cavalli (2013)	116
Apêndice F - Software de gestão da modelagem hidrossedimentológica	122

1. INTRODUÇÃO

A sedimentologia trata dos processos de produção, transporte e deposição de sedimentos a partir da sua origem até o exutório de uma bacia ou em um ponto específico de controle. Essa dinâmica pode ocorrer por meio hídrico, eólico, arraste do movimento de animais ou ações antrópicas (Perry; Taylor, 2007). São inúmeros os impactos negativos de origem sedimentológica como: Destruição de nascentes por processos erosivos na cabeceira de rios, aumento da turbidez em água de captação para abastecimento, depósito de partículas em reservatório provocando assoreamento, danos nas terras agrícolas tornando o solo infértil e possibilidade do carreamento de poluentes para o corpo hídrico são alguns exemplos (Carvalho, 2008). Apesar de serem processos naturais, os mesmos podem ser intensificados pelas atividades humanas.

A conectividade de sedimentos é um dos métodos que pode avaliar a probabilidade de ocorrer o transporte de sedimentos e assim prever possíveis impactos negativos ao ambiente. Para alguns autores a conectividade hidrossedimentológica é definida como: transferência de água mediada de matéria, energia e/ou organismos dentro ou entre os elementos do ciclo hidrológico (Pringle, 2001); passagem da água entre compartimentos da paisagem a partir de escoamento na bacia hidrográfica, causando efeitos sobre os processos biológicos e escoamento de sedimentos (Bracken *et al.*, 2013); estimativa da conexão potencial entre o sedimento erodido nas encostas e o sistema de riachos (Borselli; Cassi; Torri, 2008); transferência integrada de sedimentos por toda a bacia hidrográfica, de qualquer fonte possível para determinado ponto de controle em um sistema, onde o vetor de transporte é única e exclusivamente a água, com ligações ao longo da cascata de sedimentos (Zanandrea; Kobiyama; Michel, 2017). Segundo Heckamnn *et al.* (2018), a conectividade determina o grau em que um sistema facilita a transferência de material por ele mesmo e junto com os componentes da paisagem.

Borselli, Cassi e Torri, (2008) desenvolveram o índice de conectividade (IC), propondo uma quantificação do grau de possibilidade dos sedimentos se conectarem a um ponto de controle a partir de uma origem. Esse índice utiliza dados de base estrutural, os quais estão relacionados à topografia e ao uso e ocupação do solo, que são aplicados como parâmetros na equação. Em 2013, um novo índice foi apresentado através de uma adaptação do IC, citado anteriormente, propondo uma alteração no fator de ponderação ao fluxo de sedimentos (Cavalli *et al.*, 2013), o qual substituiu o fator C (referente ao uso e manejo da terra) dos modelos de USLE-RUSLE (Renard *et al.*, 1997) pelo índice de rugosidade baseado na topografia residual (diferença entre

a elevação observada e a esperada) (Cavalli; Marchi, 2008) (Cavalli *et al.*, 2008). Em 2020 outro índice de conectividade foi desenvolvido através de uma adaptação de Borselli (2008) e Cavalli (2013), trazendo uma nova perspectiva integrando à formulação original, variáveis derivadas da precipitação como representação do componente funcional e uma substituição do fator C pelo RS (*Relative Smoothness*) que é um fator de impedância baseado no coeficiente de Manning (Zanandrea; Michel; Kobiyama, 2020). Persichillo et al. (2018) também aplicaram o coeficiente de Manning como elemento de ponderação do fator W no IC para avaliar a conectividade de sedimentos em função do uso da terra em diferentes cenários.

Os resultados obtidos pelos índices de conectividade podem contribuir para gestão de uso da terra associado à qualidade das águas referentes aos sólidos em suspensão, bem como identificar áreas de riscos para escorregamentos e movimento de massa. Entre vários parâmetros usados nos índices de conectividade hidrossedimentológica, a impedância da superfície tem sido questionada pela incerteza devido ao uso de valores tabelados e/ou por não atender a diversidade das paisagens, o que pode prejudicar a representação real da área de estudo (Zanandrea; Michel; Kobiyama, 2020). Os modelos hidrossedimentológicos que propõe como objetivo central o cálculo da produção de sedimentos, não identificam a importância relativa das variáveis de entrada na resposta dos sedimentos. Identificar o peso que as variáveis espaciais ponderam na taxa de sedimentos é essencial para que essa influência seja compreendida. Dessa forma, melhorar o parâmetro de impedância da superfície em função de outras variáveis inerentes ao processo, contribuirá para uma melhor eficiência dos índices de conectividade de sedimentos. Sendo assim, esse trabalho propõe o desenvolvimento de um novo índice de impedância da superfície que leve em consideração o grau de sensibilidade ou peso relativo das classes das variáveis de forma integrada para solo, uso da terra e declividade. Espera-se uma boa aplicabilidade desse índice, uma vez que os dados de uso da terra, solo e declividade são de fácil obtenção, seja na forma secundária quanto na forma primária.

1.1. PROBLEMAS DE PESQUISA

Modelos hidrossedimentológicos não ponderam as variáveis de entrada para identificar o grau de influência sobre a produção de sedimentos, dificultando assim a inserção de elementos que contribuam para ajustar os índices que propõe modelar a dinâmica dos sedimentos. Diante disso, como melhorar a eficiência dos índices de conectividade hidrossedimentológica a partir

de uma nova representação da impedância da superfície como elemento de ponderação da resistência ao fluxo de sedimentos?

1.2. HIPÓTESES

- 1) As variáveis uso da terra, tipo de solo e declividade influenciam, de forma diferenciada, a taxa de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, apresentando relevâncias distintas na modelagem hidrossedimentológica e impactando diretamente a precisão e os resultados da estimativa de sedimentos;
- 2) A importância relativa das classes de uso e ocupação da terra, tipos de solo, declividade aplicados na impedância da superfície, melhoram a resposta do índice de conectividade hidrossedimentológica, quando comparado ao índice de rugosidade de terreno.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver um novo índice de impedância de superfície em função da importância relativa das classes de uso e ocupação da terra, solo e declividade com base na taxa de produção de sedimentos obtidas na modelagem hidrossedimentológica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar a modelagem hidrossedimentológica em diversas bacias hidrográficas para calcular a taxa de produção de sedimento, que servirá como dado primário para a formulação do índice de impedância de superfície;
- Determinar a importância relativa das classes uso da terra, tipo de solo e declividade em relação à taxa de produção de sedimento, utilizando redes neurais artificiais;
- Formular o novo Índice de Impedância de Superfície (IIS) fundamentado na importância relativa das classes de uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade, validar com adaptação da equação universal de perda de solo (Universal Soil Loss Equation - USLE) e aplicar como parâmetro de resistência ao fluxo de sedimento, no índice de conectividade de sedimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

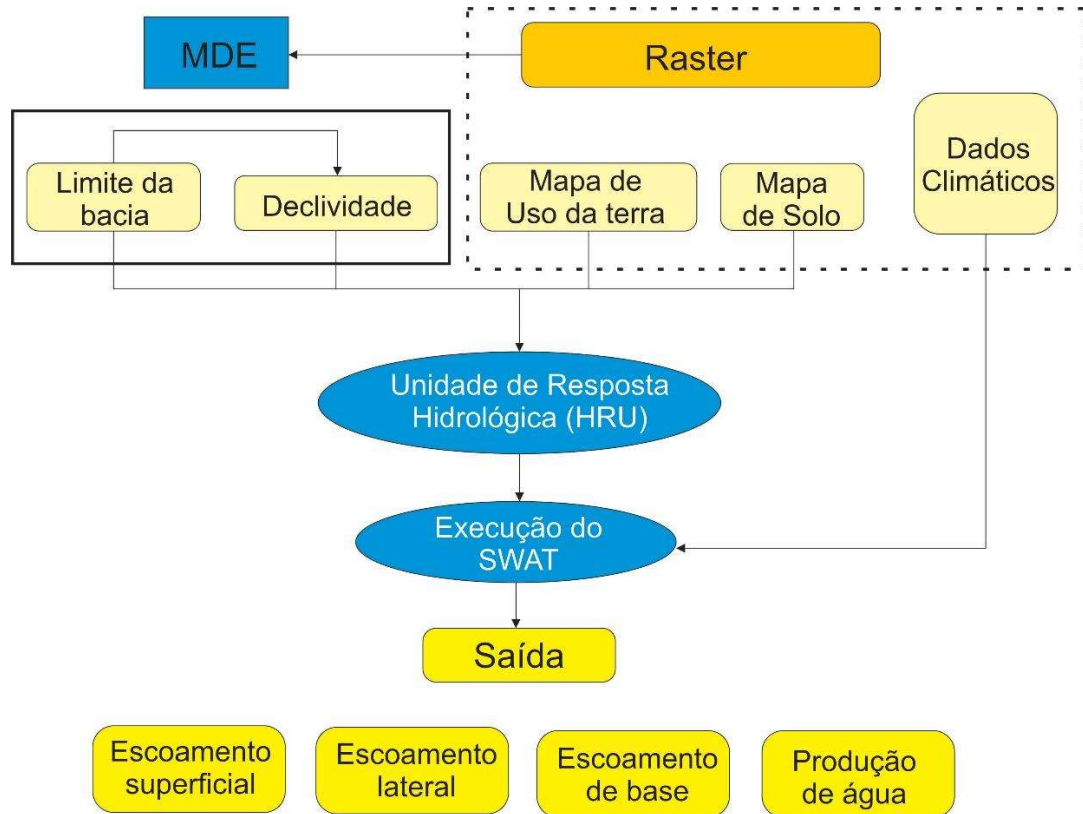
A modelagem é uma representação funcional de um sistema por meio de expressões matemáticas com base em processos, sendo: escalas temporais, escalas espaciais e nas técnicas de resolução. Os processos dão início por meio das entradas de dados, seguido pelas equações, pela determinação das condições iniciais e limitantes e, finalmente os dados de saída (Christofolletti, 2019). Um modelo hidrológico tem como objetivo central, a representação do movimento entre os compartimentos de uma bacia hidrográfica para prever condições diferentes das observadas. Dessa maneira, podem antecipar-se aos eventos e ter a oportunidade de uma tomada de decisão mais assertiva, identificando-se os impactos na alteração dos corpos d'água, da ocorrência de eventos extremos e de modo a reduzir as incertezas (Tucci, 2005). A dinâmica dos processos da paisagem é complexa quando se avalia no âmbito espacial e torna-se essa complexidade ainda maior quando inclui o tempo. Além dos processos serem influenciados no espaço-tempo, a iteração dos elementos bióticos, abióticos e antrópicos da paisagem promovem respostas diferentes no ambiente (BERTRAND, 2004).

O transporte de sedimentos se inicia com o desprendimento das partículas de um meio do qual fazem parte, seja o leito fluvial ou superfície da bacia hidrográfica, sob efeito de vários fatores naturais ou antrópicos. O deslocamento das partículas ocorre quando as forças hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento ultrapassam a resistência por elas oferecidas, definindo assim o processo de erosão. (Baptista; Lara, 2018). Os sedimentos são caracterizados pela forma, densidade, massa e tamanho da partícula. A dinâmica do sedimento é função de suas características, do meio em que será transportado e do tipo de transporte. Devido à diversidade das características das partículas, o transporte de sedimentos é um processo aleatório (Lamarre; Roy, 2008). A resistência de uma partícula de sedimento a ser mobilizada é avaliada pela tensão de cisalhamento crítica adimensional necessária para colocar em movimento uma partícula, sendo dependente do tamanho e da densidade (López *et al.*, 2020). Os segmentos rochosos tendem a aumentar a resistência à mudança e diminuir a resiliência, pois dependem da distribuição do tamanho dos grãos (Wohl, 2015). Os processos sedimentológicos sofrem uma importante influência do relevo da bacia hidrográfica, onde as que são de cabeceira, geralmente em relevo acidentado, por serem menores, possuem menor área deposicional e sendo maior o fornecimento sedimentar específico. Por outro lado, bacias hidrográficas maiores tendem a terem declividades amenizadas, favorecendo a deposição dos sedimentos antes da chegada aos

cursos d'água. É importante que os modelos sedimentológicos utilizem maiores detalhes do relevo, obtendo-se maior variedade de características da área (Magalhães Júnior; Barros, 2020).

Com o avanço do conhecimento, diversos modelos foram desenvolvidos ao longo do tempo, facilitando a interpretação dos processos hidrológicos. Paralelamente, com a evolução tecnológica, melhorias foram incorporadas aos modelos, proporcionando mais recursos e maior flexibilidade nos processos de execução. Sob a coordenação do Instituto de Recursos Hídricos do Texas e com o apoio de diversas entidades nos Estados Unidos, foi desenvolvido o software SWAT (*Soil and Water Assessment Tools* - Ferramentas de avaliação de solo e água) para prognosticar o impacto das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos. Este modelo considera a produção de sedimentos e a aplicação de produtos químicos nas plantações dentro dos grandes complexos de bacias hidrográficas, levando em conta o uso do terreno e as condições de gestão ao longo do tempo (Soil and Water Assessment Tools - SWAT Model Arnold *et al.*, 2012). Criado no início da década de 1990 e atualmente com várias versões de experiência, o modelo SWAT já foi utilizado em inúmeros estudos teóricos e aplicados. O SWAT é um modelo baseado em processos físicos e utiliza informações específicas sobre precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, características do solo, relevo e uso e ocupação da terra correspondente à bacia hidrográfica. Os processos físicos associados à dinâmica hídrica, transporte de sedimentos, gestão agrícola, ciclo de nutrientes, entre outros, são diretamente aplicados pelo modelo SWAT usando esses dados como entrada, conforme apresentado na Figura 1 (Barkey *et al.*, 2019).

Figura 1: Mecanismo de funcionamento do modelo SWAT



Fonte: adaptado (Barkey *et al.*, 2019)

O SWAT é considerado como modelo semidistribuído, onde todos os processos são calculados em cada unidade espacialmente delimitada. Uma das unidades espaciais usadas são as subbacias, as quais são geradas em função do Modelo Digital de Elevação (MDE) e alguns ajustes na configuração do modelo. Além da subbacia o modelo gera uma outra unidade espacial representada pela interseção (álgebra de mapas) dos mapas de uso e ocupação da terra, tipos de solo e declividade. Essa unidade é chamada de Unidade de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit - HRU*) (Figura 2), a qual é a principal unidade espacial que representa a fase terrestre para a execução dos processos hidrológicos (Soil and Water Assessment Tools - SWAT Model Arnold *et al.*, 2012).

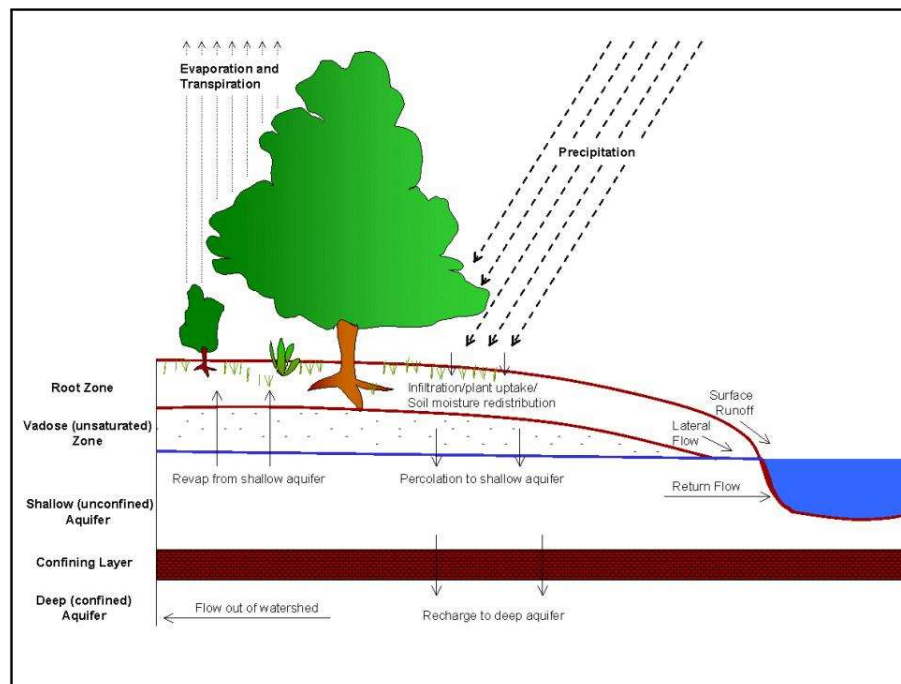
Figura 2 - Esquema da geração de HRU na bacia hidrográfica



Fonte: (Zettam, 2018)

Na fase terrestre, são representados os processos desde o momento da entrada da água na bacia por meio da precipitação, incluindo sua captura pela vegetação, seu retorno parcial à atmosfera por intermédio da evapotranspiração, infiltração que pode alcançar os aquíferos profundos, além dos escoamentos superficiais e subsuperficiais, até alcançar os leitos de corpos hídricos como rios, lagos ou reservatórios (Figura 3).

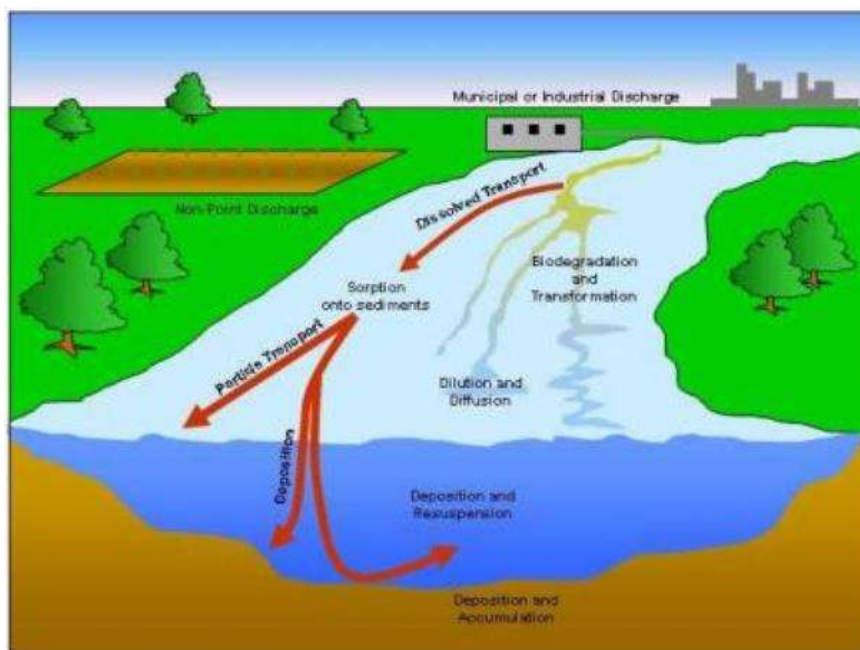
Figura 3 - Representação esquemática do ciclo hidrológico



Fonte: (Soil and Water Assessment Tool Theoretical DocumentaionArnold *et al.*, 2012)

A fase aquática refere-se ao movimento da água dentro dos leitos e suas trocas com o subsolo e a atmosfera. Pode incluir a captação ou o lançamento de efluentes. Representa a propagação da água, sedimentos, nutrientes e compostos orgânicos. O transporte de elementos químicos pode ocorrer de forma dissolvida ou por sorção em sedimentos, sofrendo ainda transformações, biodegradação ou sedimentação nos leitos. Além de acompanhar o fluxo de massa no canal, o SWAT modela a transformação de produtos químicos no riacho e no leito. A Figura 4 ilustra os diferentes processos de fluxo modelados pelo SWAT.

Figura 4 - Processos de fluxos modelados no SWAT



Fonte: (Soil and Water Assessment Tool Theoretical DocumentaionArnold *et al.*, 2012)

Apesar de gerar um conjunto consistente de informações resultantes dos processos físicos simulados pelo modelo, o SWAT não apresenta essas informações em um formato compreensível, em relação à estrutura dos dados, para todas as partes interessadas envolvidas na gestão de bacias hidrográficas (Rajib *et al.*, 2016); (McDonald *et al.*, 2019), restringindo seu uso quase exclusivamente ao meio acadêmico. O modelo SWAT é composto unicamente por um arquivo executável, sem promover interfaces de interação com o usuário. Uma vez executado, o modelo lê um conjunto de arquivos de entrada no formato texto, os processa e gera outro conjunto de arquivos de saída no mesmo formato.

Para usar o modelo em uma bacia hidrográfica específica, o usuário deve fornecer os arquivos de entrada. Devido à complexidade das entradas, a utilização de edição de texto não é

recomendável, especialmente porque existem programas criados especificamente para esse fim, como o ARCSWAT, um plugin para o ArcMap (ESRI), ou o QSWAT, uma interface para o QGIS.

Após uma configuração inicial dos arquivos de entrada, é possível executar o SWAT e gerar simulações. Como o modelo envolve um grande conjunto de variáveis inter-relacionadas, dificultando sua configuração adequada para uma bacia, ele deve ser calibrado. Esse procedimento pode ser feito utilizando um software especial chamado SWAT-CUP, que analisa os resultados gerados pelo SWAT em comparação com dados observados, ajustando os valores dos arquivos de entrada utilizando métodos heurísticos, minimizando os desvios dos resíduos.

Em bacias hidrográficas devidamente calibradas, o SWAT possibilita a criação de cenários para prever impactos futuros decorrentes de alterações na bacia, tais como mudanças nas condições climáticas, modificações no uso da terra ou a inclusão de novos tipos de usos múltiplos da água, como instalação de captações, lançamentos de efluentes ou construção de barragens. Dessa forma, possui potencial para subsidiar a tomada de decisão em sistemas complexos, cuja previsibilidade extrapola a capacidade do analista em recursos hídricos.

2.2. CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA

Transferência integrada de sedimentos por toda a bacia, de qualquer fonte possível para determinado ponto de controle em um sistema, onde o vetor de transporte é única e exclusivamente a água, com ligações ao longo da cascata de sedimentos (ZANANDREA; KOBIYAMA; MICHEL, 2017). A conectividade no âmbito ambiental pode ser aplicada à ecologia, onde se determina a conservação das espécies em função da mudança da paisagem, resultando na perda de fragmentação do habitat, consistindo num problema crítico para a recolonização e sobrevivência. Com isso, o sucesso de uma recolonização, entre outras, dependem da disponibilidade de indivíduos dispersos e do grau de conectividade da paisagem (Kindlmann; Burel, 2008).

Como parte dos estudos da sedimentologia, a conectividade vem ganhando espaço como relatado em uma revisão da literatura que abordou a dinâmica dos sedimentos (Najafi *et al.*, 2021). A conectividade de sedimentos trabalha com dois componentes, a saber: estrutural e funcional. A conectividade estrutural se relaciona com as características físicas (por exemplo

declividade, uso e ocupação da terra, entre outros) e a funcional com os processos de erosão do solo, precipitação, transporte e deposição de sedimentos no espaço e no tempo (Najafi *et al.*, 2021).

A produção de sedimentos, a conectividade dos sedimentos e a taxa de entrega de sedimentos, estão fortemente relacionados, porém existem diferenças importantes entre elas. A produção de sedimentos quantifica a massa por área de contribuição (Carvalho, 2008). A taxa de entrega de sedimentos determina a fração de todo sedimento erodido na bacia hidrográfica até o exutório (Minella; Merten; Clarke, 2009) e (Lu; Moran; Prosser, 2006). A conectividade de sedimentos só depende da morfologia para sua determinação. No entanto, outras variáveis podem ser utilizadas como parte dos processos para cálculo da conectividade. (Zanandrea *et al.*, 2020).

O índice de conectividade de fluxo de sedimentos (SCI) foi desenvolvido para representar o resultado de acúmulo de fluxo baseado no gradiente de mobilidade dos sedimentos, integrando aspectos funcionais dentro do componente estrutural. O índice é função da precipitação, propriedades geotécnicas do solo e uso da terra. Nesse índice, a rugosidade foi considerada apenas pela variabilidade topográfica através da diferença média de um pixel central com seus 8 vizinhos (Zingaro *et al.*, 2019).

Com base na topografia, fator de manejo da terra (C-RUSLE – equação universal de perda de solo), erosividade da chuva, erodibilidade do solo e permeabilidade do solo, foi criado um índice para modelar o fluxo estrutural e funcional da conectividade sedimentar. O índice representa a potencial conectividade de vazão e sedimentos, levando-se em consideração a variação temporal e espacial (López-Vicente; Ben-Salem, 2019).

O índice de conectividade relativo (RCI) foi proposto para quantificar a conectividade da paisagem integrando medidas estruturais e funcionais, as quais são derivadas da modelagem de escoamento e transporte de sedimentos (Turnbull; Wainwright, 2019). Com base na teoria dos grafos, por meio da combinação do índice de acessibilidade com o índice de fluxo originou-se o índice de fluxo residual, o qual representa o indicador de conectividade (Fressard; Cossart, 2019).

A conectividade foi calculada a partir do comprimento e da inclinação de cada célula do DEM (*Digital Elevation Model* – Modelo Digital de Elevação) com a aplicação do modelo SEED (*Sediment Delivery Distributed* – Entrega de Sedimentos Distribuída) (Di Stefano; Ferro, 2019). Com o método de Análise Multidimensional de Escorregamento Raso Probabilístico

(PRIMULA) esses mesmos autores combinaram com a análise geotécnica e uma perspectiva estocástica por meio da Simulação de Monte Carlo (MCS). Esse procedimento foi uma integração da suscetibilidade ao deslizamento e a distância total de deslocamento do sedimento (Cislaghi; Bischetti, 2019). Em um processo inverso, foi utilizada a probabilidade de conectividade de sedimentos para modelar a erosão de uma bacia hidrográfica. Os resultados do modelo validaram a capacidade de prever caminhos de erosão que causam a conectividade de sedimentos (Mahoney; Fox; Al Aamery, 2018).

Com base nos dados estimados de perda de solo e nas distâncias inversas das fontes de sedimentos no exutório da bacia, foi desenvolvido dois índices: SCI e SSP (*simplified connectivity index* – índice de conectividade simplificado e *specific sediment potential* – potencial sedimentar específico) respectivamente. O objetivo era expressar a capacidade de transferência de sedimentos e a quantidade de sedimentos potencialmente disponível por meio da rede fluvial. Os índices auxiliam o ajuste de modelos teóricos para a avaliação da produção de sedimentos das bacias hidrográficas não calibradas (Grauso; Pasanisi; Tebano, 2018).

Com aplicação do índice de conectividade (IC) (Borselli; Cassi; Torri, 2008), foi avaliado três cenários referentes a influência antrópica na conectividade sedimentar de deslizamentos de terra: (a) a evolução da densidade do sistema de drenagem; (b) a variação da malha rodoviária e (c) a mudança multitemporal do uso da terra. Os resultados mostraram como os padrões de conectividade em relação aos deslizamentos rasos (fonte sedimentar mais ativa na área de estudo) mudaram ao longo do tempo (Persichillo *et al.*, 2018).

Com a aplicação do modelo CAESAR de evolução da paisagem, foram investigadas a extensão e a natureza da conectividade na Bacia Hidrográfica do Rio Swale, situada no Norte da Inglaterra. Esses autores desenvolveram seis simulações, sendo duas como referência, onde essa bacia hidrográfica possui uma hipotética cobertura total de pastagens ou cobertura florestal total e, as demais simulações, onde metade da bacia hidrográfica está sujeita ao desmatamento ou ao reflorestamento durante a simulação. Os resultados mostraram que o desmatamento ou reflorestamento em uma metade da bacia pode ter influenciado a geomorfologia da outra metade, implicando em uma conectividade geomorfológica em toda a bacia (Coulthard; Van De Wiel, 2017).

Utilizando-se padrões espaciais de conectividade hidrológica e sedimentar por meio do índice de conectividade (IC) Cavalli *et al.*, (2013) desenvolveram a metodologia empregada na

avaliação das mudanças na qualidade do solo e na conectividade hidrológica causadas pelo abandono de terraços em uma bacia hidrográfica queimada no Mediterrâneo (Calsamiglia *et al.*, 2017).

Masselink *et al.* (2017) avaliaram a conectividade de sedimentos com método de aprendizagem de máquina via *Random Forest*, por meio de dois conjuntos de dados de pequeno e grandes eventos. O modelo para pequenos eventos teve um aumento no desempenho quando são incluídas variáveis relacionadas aos eventos anteriores de grande porte. Observou-se que as variáveis relacionadas a esses grandes eventos precedentes são mais importantes no modelo de previsão da exportação de sedimentos. Bywater-Reyes; Segura; Bladon (2017) utilizaram regressão de mínimos quadrados e análise de componentes principais para avaliar a relevância nos controles naturais na produção de sedimentos. Concluíram que a produção de sedimentos é controlada pela geomorfologia e com aumento após a extração de madeira. Por meio do modelo de erosão do solo e entrega de sedimentos (*WATEM/SEDEM*), foi avaliada a conectividade sedimentológica de uma bacia hidrográfica montanhosa. O modelo utiliza o algoritmo de roteamento de direção de fluxo único e o sedimento transportado é calculado quando a produção mais à entrada excede a capacidade de transporte (Liu; Fu, 2016).

O uso de variáveis morfométricas, tais como o gradiente de inclinação, a distância normalizada para o divisor de drenagem (DTM) e a inclinação do relevo associada à avaliação em campo possibilitou a identificação de conectividade de sedimentos no vale alpino de Val Müschauns, Parque Nacional Suíço. Porém, os autores destacam a indispensabilidade do mapeamento de campo geomórfico para uma compreensão holística dos sistemas em cascata de montanhas (Messenzehl; Hoffmann; Dikau, 2014).

Através de diversos modelos digitais de elevação, diversas séries históricas de precipitação e várias bacias analisadas com o modelo de evolução da paisagem LAPSUS, os autores identificaram que sequências de eventos de chuva indicam que o retorno entre erosão e deposição é mais importante para certas morfologias da paisagem em terraços do que para onduladas, demonstrando a complexidade morfológica da paisagem relacionada à conectividade dos sedimentos (Baartman *et al.*, 2013).

A teoria matemática dos grafos foi apresentada como uma opção importante para explorar a estrutura de rede de caminhos de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Os autores mostraram como o gráfico pode ser usado para explorar a conectividade funcional através da análise dos

nós, arestas e caminhos. Os gráficos fornecem uma ótima estrutura de dados para representar as paisagens conectadas por processos geomórficos por meio do transporte de sedimentos (Tobias; Wolfgang, 2013).

Através do uso do modelo LAPSUS, que aplica a teoria da onda cinemática foram realizadas a simulação da erosão e a deposição por fluxo superficial, com o emprego de seis modelos digitais de elevação com características diferentes para avaliar a relação das diferentes formas de relevo com a conectividade de sedimentos. Os resultados confirmaram que a relação não é linear e que os eventos de chuvas podem ter importâncias diferentes em função das características da paisagem (Baartman *et al.*, 2013).

Com o uso do índice de conectividade (IC) (Borselli; Cassi; Torri, 2008) combinado com a modelagem hidrossedimentológica com o modelo SWAT avaliaram a conectividade de sedimentos comparando com os dados observados, destacando a variabilidade espacial com a dinâmica estrutural dos sedimentos (Mishra *et al.*, 2019). Uma aplicação do índice de conectividade (IC) (Cavalli *et al.*, 2013) foi desenvolvida para avaliar os efeitos do uso da terra e mudanças topográficas na conectividade de sedimentos em bacias hidrográficas de montanha. Observou-se maior conectividade de sedimentos na mudança de uso da terra referente ao estabelecimento de novas culturas. As mudanças topográficas como o caso de criação de terraços afetaram a conectividade em maior grau do que as mudanças no uso da terra (Llena *et al.*, 2019).

Com uma adaptação do índice de conectividade (IC) combinado com o índice de rugosidade desenvolvido por Cavalli (2013) com o fator C da USLE, os autores desenvolveram o ICJ (Índice Conjunto de Conectividade) para analisar a mobilização de sedimentos piroclásticos (Ortiz-Rodríguez; Borselli; Sarocchi, 2017).

2.3. RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE E IMPEDÂNCIA

A rugosidade superficial pode ser entendida como textura da superfície terrestre que desempenha um importante papel na detecção de diferentes processos e fatores geomórficos (Trevisani; Cavalli, 2016). Entre vários elementos que influenciam o processo de conectividade de sedimentos, a resistência ao fluxo (impedância) é uma importante variável que pode ser definida por vários métodos (Zanandrea; Michel; Kobiyama, 2020). Com o objetivo de

quantificar, classificar e delimitar unidades de relevo, com base na distribuição espacial da declividade, Sampaio (2008), desenvolveu o índice de concentração da rugosidade (ICR) usando ferramentas geotecnológicas. A metodologia baseia-se na análise das curvaturas verticais e horizontais das vertentes para classificação morfométrica do relevo.

Vários métodos foram comparados para calcular a rugosidade de superfícies (raiz quadrada média aplicada às grades de elevação e inclinação, razões de autovalores, semivariância, transformada discreta de Fourier, transformada Wavelet contínua e esquema de levantamento Wavelet) com o objetivo de avaliar quais algoritmos são mais adequados para identificar deslizamentos de terra (Berti; Corsini; Daehne, 2013). A partir da análise da rugosidade superficial em campo, foi avaliada a influência da chuva em três formas diferentes de manejo do solo para agricultura. Foram aplicadas sete chuvas artificiais com variação de intensidade, volume e duração. Concluiu-se no geral que, a rugosidade foi aumentada com o manejo do solo, sendo o cultivo mínimo com maiores valores de rugosidade ao acaso; e nos tratamentos semeadura direta não houve decaimento do microrelevo com a ação da chuva (Panachuki *et al.*, 2010). Com o uso de um rugosímetro a laser, os autores avaliaram a rugosidade em dois tipos de uso da terra (pastagem e solo arado) antes e depois de aplicação de chuva com 0, 10, 55 e 85 mm. Com o uso do semivariograma, foi verificada alta dependência espacial para a rugosidade em todos os tratamentos. Porém, não observou-se dependência espacial com a variação da chuva (Bertolani *et al.*, 2000).

Alguns autores aplicaram o fator de impedância do solo para integrar o cálculo do índice de conectividade de sedimentos em função da densidade de drenagem (GAY *et al.*, 2016; KALANTARI *et al.*, 2017) ou do coeficiente de rugosidade de Manning do escoamento superficial (Persichillo *et al.*, 2018). Outra possibilidade de representar a rugosidade da superfície como elemento para calcular a impedância da superfície foi demonstrado com bons resultados através da rugosidade direcional a partir do modelo digital de terreno com resolução de 1 m. A rugosidade orientada ao fluxo se baseia no índice bivariado geoestatístico MAD (mediana das diferenças direcionais absolutas), que é calculado considerando a direção do fluxo (Trevisani; Cavalli, 2016). Apesar de ser uma alternativa interessante, é preciso chamar a atenção em uma limitação para região florestada, o qual o método responde bem para áreas com pouca ou nenhuma vegetação. A partir da análise de riscos à perda de solo para diferentes cenários na bacia hidrográfica do Rio Abiaí-Papocas, foi aplicado um coeficiente de rugosidade baseado na densidade de drenagem e da declividade da área. O estudo considerou as análises

de forma independente para geologia, solos, uso e ocupação da terra, morfologia e climatologia (Bezerra; Silva, 2014).

Com a aplicação do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) do relevo, foi caracterizado os níveis de exposição dos sistemas cársticos, com o objetivo de esclarecer a relação entre a intensidade dos processos erosivos e o nível de exposição/evolução dos referidos sistemas. A metodologia envolveu a análise de dados topográficos e morfológicos, além de trabalhos de campo para validar os resultados obtidos por meio de geoprocessamento e modelagens. Os autores concluíram que Carstes com maior grau de exposição ocorrem em sub-bacias com maiores índices de concentração da rugosidade do relevo (NASCIMENTO; REIS NETO; REBELO, 2010). A partir de diferentes sistemas de manejo do solo e da aplicação de chuva artificial, esses mesmos autores investigaram a influência na rugosidade da superfície do solo. O estudo foi realizado em uma área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, MS. Foram avaliados três sistemas de preparo do solo (semeadura direta, preparo convencional e cultivo mínimo) e três níveis de cobertura do solo com resíduo vegetal de soja (0, 2 e 4 Mg ha⁻¹). A análise de variância e o teste de Tukey foram utilizados para comparar os efeitos dos tratamentos na rugosidade do solo. De maneira geral, a rugosidade da superfície do solo ao acaso relacionou-se inversamente com o volume de chuvas simuladas, conforme o modelo de regressão exponencial. Isso indica que a rugosidade diminui à medida que o volume de chuvas aumenta (Panachuki *et al.*, 2010). Vale ressaltar que essa pesquisa avaliou em uma pequena área experimental de cultivo de soja com uso de chuva artificial, com o objetivo de compreender o comportamento da rugosidade da superfície em função do manejo da terra.

2.4. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)

A Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE) é uma ferramenta amplamente utilizada para estimar a perda de solo devido à erosão hídrica (Wischmeier; Smith, 1978). A USLE tem sido fundamental para a compreensão e gestão da erosão do solo em diversas escalas e contextos.

A USLE é uma ferramenta versátil e amplamente aplicável que tem contribuído significativamente para a gestão e conservação do solo em diversas escalas e contextos. No entanto, a USLE também possui algumas limitações. Por exemplo, a equação assume condições homogêneas de solo e clima, o que pode não ser representativo em áreas com grande variabilidade espacial e temporal. Além disso, não considera explicitamente os processos de erosão em ravinas e voçorocas, que podem ser importantes em algumas regiões. Ela é

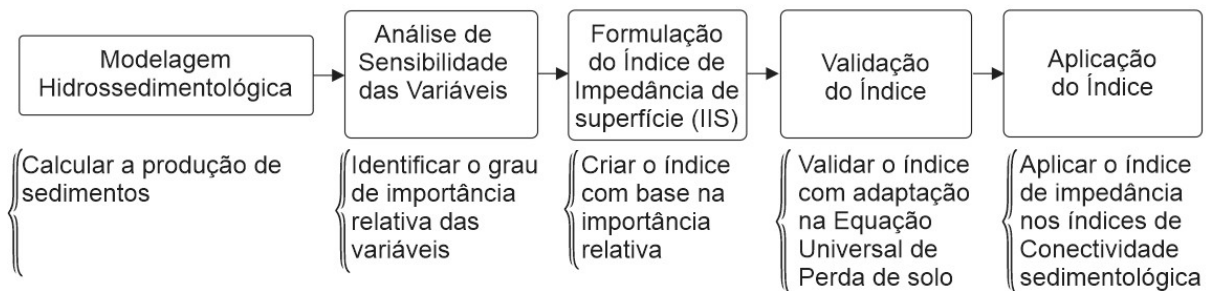
frequentemente utilizada para identificar áreas de risco de erosão e para planejar práticas de conservação do solo. Adicionalmente, foi aplicada em uma escala continental para mapear a erosão do solo na Europa. Os resultados ajudaram a identificar áreas prioritárias para a implementação de medidas de conservação, como terraceamento e plantio de cobertura vegetal (Panagos *et al.*, 2015). É uma ferramenta valiosa na avaliação de impacto ambiental (EIA) de projetos de desenvolvimento. Em projetos de construção, mineração e agricultura, a USLE pode ser usada para prever a quantidade de solo que será perdida devido às atividades propostas. Uma outra aplicação importante da USLE foi na avaliação do impacto de um projeto de mineração na Índia, ajudando a desenvolver estratégias para minimizar a erosão do solo e proteger os recursos hídricos locais (JAIN; KUMAR; VARGHESE, 2001). A USLE também é frequentemente integrada em modelos hidrológicos para simular a perda de solo em bacias hidrográficas. Por exemplo, o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool* – Ferramenta de avaliação de solo e água) incorpora a USLE para prever a erosão do solo e o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas. Um estudo demonstrou a aplicação do SWAT em uma bacia hidrográfica nos Estados Unidos, fornecendo informações valiosas para a gestão de recursos hídricos e a conservação do solo (Soil and Water Assessment Tool Theoretical DocumentaionArnold *et al.*, 2012). Foi utilizada para desenvolver planos de gestão de bacias hidrográficas, ajudando a identificar áreas críticas de erosão e a implementar práticas de manejo sustentável. Em um estudo realizado no Brasil, a USLE foi aplicada para mapear a erosão do solo em uma bacia hidrográfica agrícola. Os resultados foram utilizados para orientar a implementação de práticas de conservação, como o plantio direto e a construção de terraços (Oliveira; Wendland; Nearing, 2013), sendo investigada a relação entre a cobertura do solo e a erosão utilizando a USLE. Os resultados destacaram a importância da vegetação na redução da erosão do solo e forneceram *insights* para o desenvolvimento de práticas de manejo sustentável (Nearing *et al.*, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ESTRUTURA GERAL

A estrutura da metodologia foi organizada em 5 blocos sequenciais (Figura 5) para facilitar e melhor conduzir o desenvolvimento e o entendimento do trabalho. O primeiro bloco foi o desenvolvimento de toda modelagem hidrossedimentológica, obtendo-se o resultado da taxa de produção de sedimentos, o qual foi o principal dado para as análises e desenvolvimento do projeto. O segundo bloco foi a aplicação dos métodos que identificaram a importância relativa das variáveis espaciais utilizadas na modelagem hidrossedimentológica (uso e ocupação da terra, tipos de solo e declividade). O terceiro bloco formulou-se o novo índice de impedância com base na importância relativa das variáveis explicativas definidas no módulo anterior. O quarto bloco validou esse novo índice e o quinto bloco aplicou o índice nas regiões modeladas utilizando os índices de Cavalli (2013).

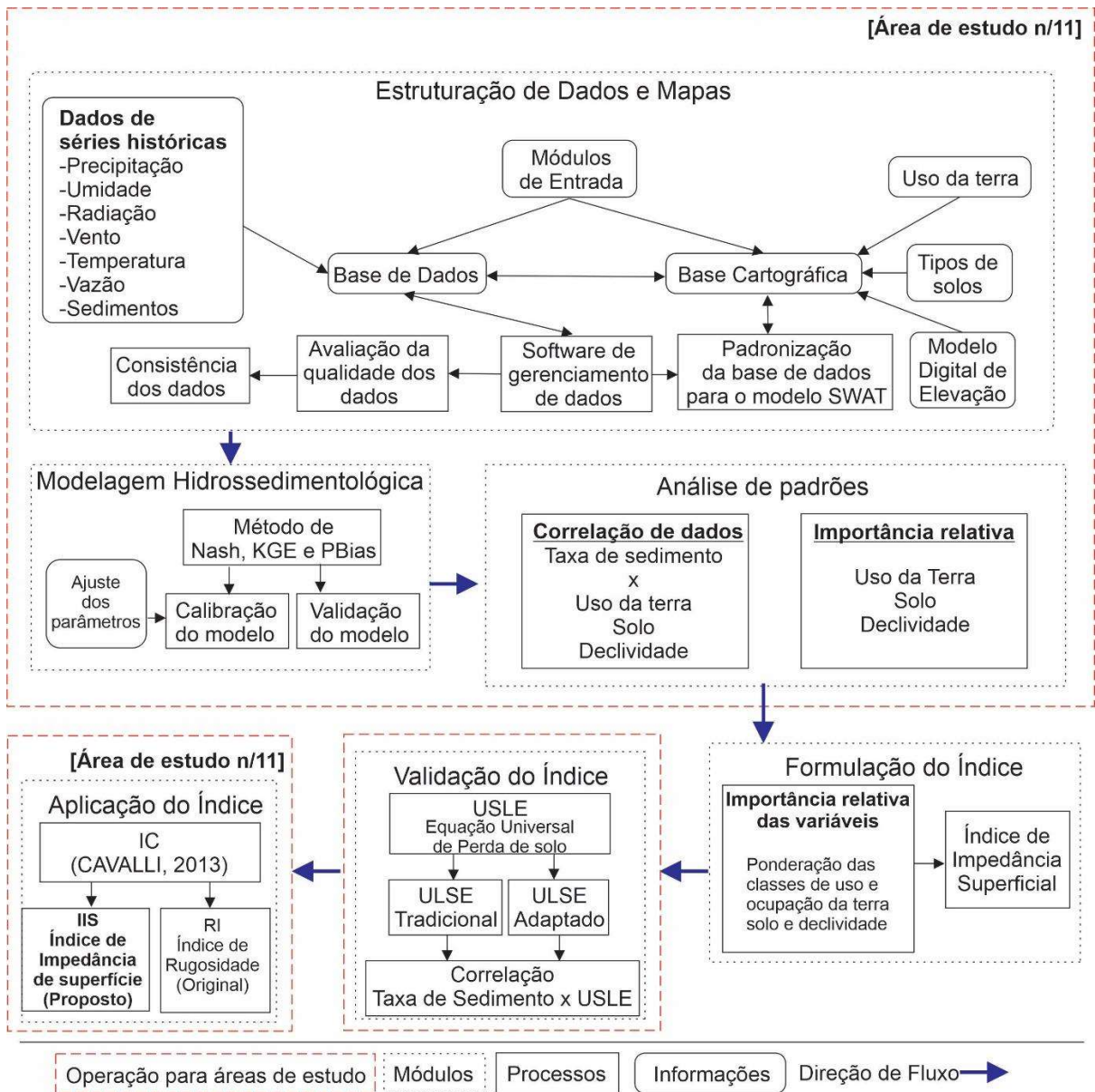
Figura 5 – Fluxograma Geral do projeto



Fonte: Autor (2024)

A Figura 6 discrimina os detalhes da metodologia referente ao fluxograma geral (Figura 5), sendo os dois primeiros módulos representando toda modelagem hidrossedimentológica, onde o primeiro foi a estruturação de todas as entradas de dados e a configuração do modelo, por meio dos mapas e tabelas e o segundo para a execução e validação do modelo. O terceiro módulo, referente à análise de padrões considerou as correlações dos dados e executou a identificação da importância relativa das variáveis na produção de sedimentos. O quarto bloco representou a formulação do novo índice de impedância. O quinto bloco validou o novo índice com adaptação da equação universal de perda de solo e o sexto módulo aplicou o novo índice de impedância junto ao índice de conectividade de sedimento desenvolvido pelo Cavalli (2013) para todas bacias modeladas.

Figura 6 – Fluxograma discriminado dos módulos do projeto



Fonte: Autor (2024)

Durante o desenvolvimento do projeto, foram utilizados alguns softwares (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) em função do objetivo de cada etapa. Todos os softwares utilizados são de acesso livre.

Quadro 1- Relação de softwares aplicados no projeto

Software	Descrição	Versão
Qgis (QGIS Geographic Information System, 2015)	Software de geoprocessamento. Responsável pelas construções dos mapas e preparação inicial da modelagem hidrossedimentológica.	3.16
SWAT Model (Soil and Water Assessment Tools - SWAT Model Arnold <i>et al.</i> , 2012)	Software responsável pela execução dos modelos hidrossedimentológicos com o objetivo central de calcular a taxa de produção de sedimentos.	2012 Release 2020
R (R, 2021)	Software para execução de processamentos estatísticos, rede neural artificial, métricas de paisagem e morfometria de bacias.	4.1.3
Rstudio (RStudio Team, 2020)	Software responsável pela interface operacional do software.	R2023.12.1
Software de Gestão	Software exclusivo, desenvolvido pelo autor para gerenciamento dos dados de entradas e saída. Uma das principais características é a capacidade de integrar com todos os software acima citados para que os dados processados sejam organizados e de fácil acesso para análises e operações dentro do projeto.	Beta

Fonte: Autor (2024)

O software de gestão foi desenvolvido pelo autor para gestão de dados da modelagem, como principal objetivo de organização dos dados para facilitar as análises e integração com os softwares SWAT (Soil and Water Assessment Tools - SWAT Model Arnold *et al.*, 2012), R (R, 2021) e Qgis (QGIS Geographic Information System, 2015). O software foi estruturado com os seguintes módulos:

Organização dos dados: foi baseado em recursos de importação de todas as informações tabulares independente de sua origem e gravadas em um banco de dados próprio do software de gestão.

Qualidade e consistência dos dados: é um módulo que ajustará os dados a depender da inconsistência.

Modelagem: Todos os processos de calibração, validação e simulação será organizado dentro do software e integrado com o SWAT para execução. Ou seja, a entrada de dados para calibração é feita pelo software de gestão e levada para o SWAT. Após a execução do modelo pelo SWAT, o software busca os dados de resposta e grava o seu banco de dados para futuras análises.

Cálculos: Dados necessários para a modelagem que depende de vários cálculos foram desenvolvidos em diversas etapas do software a depender do objetivo. Os procedimentos dos cálculos estão disponíveis no devido momento da metodologia a qual esteja relacionado.

Processamentos especiais: Todas as operações necessárias para análise dos resultados, seja pelas estatísticas ou pelas operações básicas foram desenvolvidas em cada módulo a qual esteja relacionado. Especialmente para as análises avançada de estatística, o software de gestão integra com o software R (R, 2021), de forma que as operações sejam executadas no R (R, 2021) e retornado com os resultados para o software de gestão para visualização e análises.

Observação: No Apêndice F foi apresentado mais detalhes do funcionamento desse software, bem como algumas telas operacionais. A próxima etapa desse software, será a melhoria na interface operacional para poder disponibilizá-lo para uso livre pela comunidade científica.

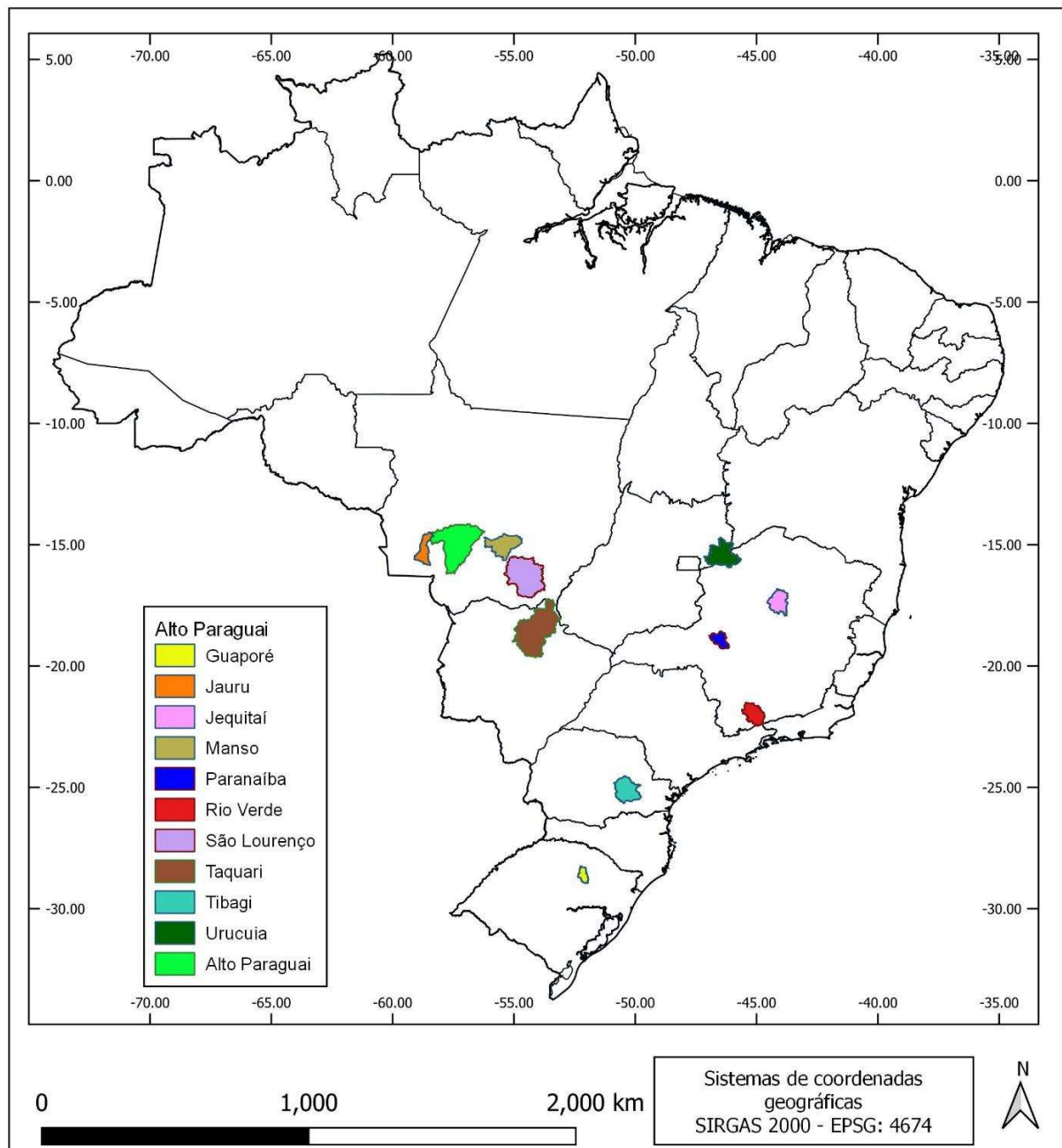
Devido a quantidade de áreas trabalhadas e com diversos processos repetidos para essas áreas, o projeto foi organizado, considerando apenas uma área apresentada no corpo da tese e as demais no apêndice. A bacia hidrográfica selecionada para manter-se no corpo da tese foi a do Alto Paraguai, a qual é localizada no estado do Mato Grosso. Essa organização ocorreu na metodologia e nos resultados, tais como: mapas de entrada nos modelos hidrossedimentológicos, curvas de calibração e validação, taxa de produção de sedimentos e aplicação do Índice de Impedância de Superfície (IIS).

3.2. ÁREAS DE ESTUDO

A definição das áreas de estudo foi em função da escolha de uma diversidade de bacias hidrográficas do Brasil de modo a abranger maiores variações de características hidrológicas e climatológicas, bem como o uso e ocupação da terra. As seleções das bacias foram em função

da existência de dados de monitoramento sedimentológico, por ser um dado essencial para a pesquisa. Sendo assim, foram selecionadas as seguintes bacias hidrográficas: Urucuia, Jequitaiá, Paranaíba e Rio Verde, as quais se localizam no Estado de Minas Gerais; Tibagi, localizada no Estado do Paraná; Guaporé, localizada no Estado do Rio Grande do Sul; Jauru, Alto Paraguai, Manso e São Lourenço, as quais se localizam no Estado do Mato Grosso; Taquari a qual se localiza no Estado do Mato Grosso do Sul Figura 7.

Figura 7 – Bacias aplicadas na modelagem hidrossedimentológica



Fonte: Autores (2024)

3.3. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

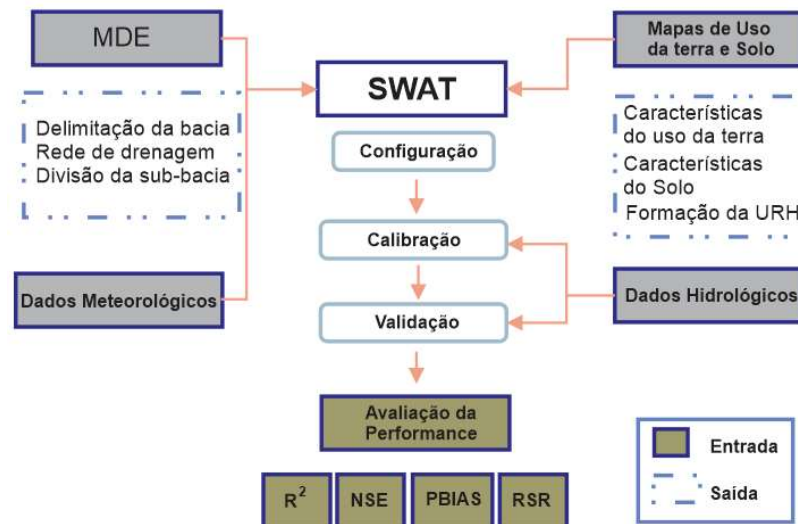
Foi empregado o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools) (ARNOLD et al., 2012c) para a realização das simulações hidrossedimentológicas, visando calcular a taxa de produção de sedimento.

O procedimento de calibração foi estabelecido com a determinação dos parâmetros que exercem influência nos processos hidrológicos modelados. Esses parâmetros são organizados de acordo com os tipos de arquivos executados pelo software SWAT, e os valores atribuídos a eles são processados por sub-bacia ou Unidade de Resposta Hidrológica (HRU). A HRU corresponde a uma combinação de uso e ocupação da terra, solo e declividade, por um processo de sobreposição de camadas, gerando uma delimitação com esses dados dentro de cada sub-bacia hidrográfica. Desse modo, preservam-se os parâmetros espacialmente distribuídos de toda a bacia hidrográfica, bem como as características homogêneas dentro dela (UESLEI; OLIVEIRA, 2020). A determinação das HRUs parte do processo de delimitação das sub-bacias hidrográfica, as quais são definidas a partir do modelo digital de elevação (MDE) e de um valor limiar para que o algoritmo gere estas sub-bacias. Especificamente, esse parâmetro define o número mínimo de células (ou uma área mínima) que uma área de captação precisa ter para ser considerada uma sub-bacia no modelo, controlando o nível de detalhamento na subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias hidrográficas menores. Isso influencia diretamente a resolução espacial do modelo. Nesse contexto, cada bacia hidrográfica teve um limiar diferente, a saber, onde estes são apresentados a seguir: Jauru = 10, Manso e Guaporé = 20, Alto Paraguai, Taquari e Jequitaiá = 30, São Lourenço = 40, Paranaíba = 70, Tibagi e Rio Verde = 100 e Urucuaia = 226.

Após delimitar as sub-bacias, foram incluídos os mapas de uso e ocupação da terra e tipos de solos para serem sobrepostos para construir as HRUs, vinculando-se algumas opções de configuração para a criação destas. Uma delas é também a definição de um limiar para definir a representatividade mínima de uma classe de uso e ocupação da terra, solo ou declividade dentro de uma sub-bacia. Para essas modelagens foram definidas em 100% para esses limiares e especificando a quantidade de HRUs em função da quantidade de sub-bacias. A escolha livre do número de HRUs foi para poder definir um maior número sem comprometer o processo computacional. Vale ressaltar que quanto maior for o número de HRUs, maior será o processamento e consumo de memória do computador, além da maior discretização da área.

A calibração dos modelos foi realizada em duas fases. Na primeira fase, foi utilizado um processo automatizado para definir aleatoriamente os valores dos parâmetros dentro dos seus limites padrões do SWAT. Essa automação foi implementada em um *software* de gestão desenvolvido pelo autor, que executa o modelo SWAT e avalia a eficiência. Esse processo foi executado dentro de um *loop*, alterando os valores dos parâmetros e interrompido ao atingir um coeficiente de eficiência mínimo de 0,60 ou um limite de 50 execuções. Na segunda fase, foi escolhido o melhor grau de eficiência e ajustado manualmente até alcançar um desempenho acima de 0,50, o qual foi considerado satisfatório. A avaliação do desempenho dos modelos foi feita utilizando os coeficientes de Eficiência de Kling-Gupta (KGE), correlação de Pearson e Percentual de Tendência (Pbias). A interpretação dos coeficientes foi realizada com base em estudos anteriores (ARNOLD et al., 2012c; GUPTA et al., 2009). A validação do modelo foi realizada mediante a aplicação dos parâmetros calibrados em outro período de dados com a utilização dos mesmos índices empregados na calibração, garantindo assim a verificação do ajuste dos dados. O SWAT possui uma estrutura que integra os dados de entrada, processamento e saída, conforme Figura 8.

Figura 8 – Estrutura da metodologia de modelagem do SWAT



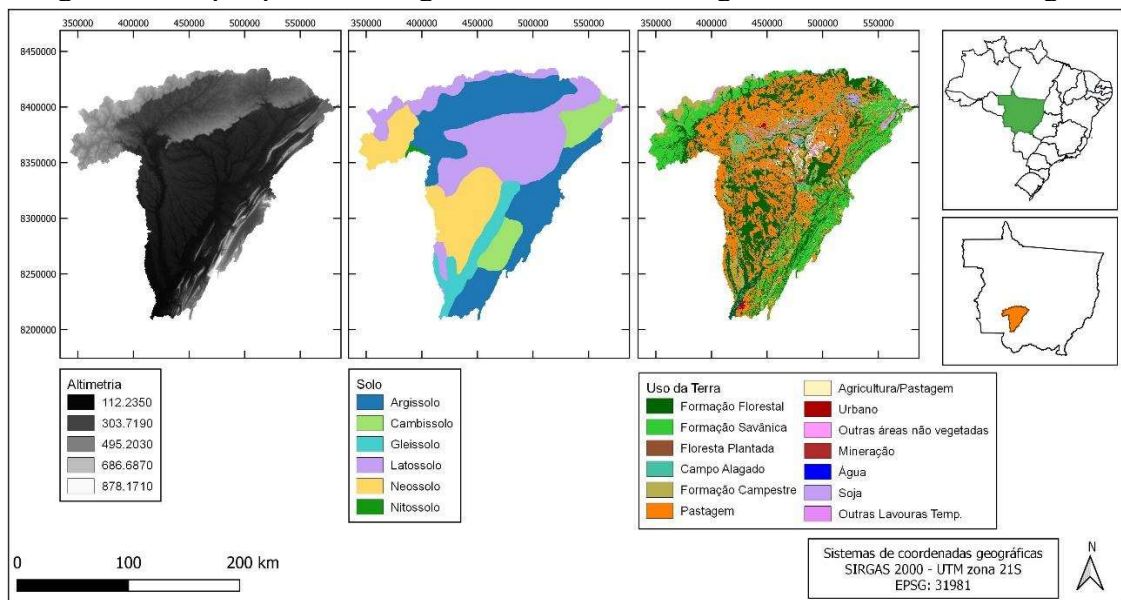
Fonte: Adaptado de (AQNOUY et al., 2019)

Ainda conforme ilustrado na Figura 8, os dados utilizados incluem o mapa do modelo digital de elevação (Valeriano; Rossetti; Santos, 2010), o mapa de uso e ocupação da terra de 2004 (MAPBIOMAS, 2020) e o mapa de solo (EMBRAPA, 2011). Após a entrada dos mapas, o SWAT criou as sub-bacias e suas HRUs. Com a criação dessa estrutura de sub-bacias e HRUs,

foram incluídos os dados climáticos e inicializada a configuração dos parâmetros para ajustes da calibração. A cada ajuste de parâmetros foi avaliada a performance do modelo com o uso dos índices de eficiência KGE, pBias e Pearson.

Os procedimentos acima citados, foram executados para cada bacia hidrográfica do projeto de maneira independente. A Figura 9 representa a bacia hidrográfica do Alto Paraguai como exemplo de apresentação dos mapas aplicado no modelo, sendo os mapas de modelo digital de elevação, tipos de solo e uso e ocupação da terra. As demais bacias hidrográficas estão no Apêndice A.

Figura 9 – Mapas para modelagem hidrossedimentológica – Bacia do Alto Paraguai



Fonte: (Autor 2024)

As etapas de preparação do modelo, consistem na inclusão do modelo digital de elevação, que foi responsável pela criação das sub-bacias. Nessa etapa de criação das sub-bacias, o SWAT gera o mapa de declividade que será fundamental para diversas operações. Após a criação das sub-bacias, foi incluído os mapas de uso e ocupação da terra e tipos de solo. Esses dois mapas junto com o mapa de declividade gerado anteriormente foram mesclados com o objetivo de criar as HRUs, como já apresentado. A etapa seguinte foi a inclusão dos dados climáticos por meio de tabela, considerando-se as seguintes variáveis: precipitação, radiação, umidade, temperatura e velocidade do vento. Após essas inclusões, iniciou-se o processo de calibração e validação do modelo.

3.3.1. Série histórica climática e hidrossedimentológica

As séries históricas de precipitação, vazão e sedimentos foram obtidas por meio do sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas e saneamento básico – ANA (ANA, 2022). Os dados climáticos das estações físicas da ANA localizadas nas respectivas áreas de estudos referentes às variáveis temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, não eram suficientes para os períodos de série histórica de interesse da pesquisa. Para evitar o processo de simulação automática desses valores pelo SWAT, optou-se por usar os dados de satélite organizados pelos Centros Nacionais de Predição Ambiental (NCEP) Reanálise do Sistema de Previsão do Clima (CFSR) nos Estados Unidos que possui uma série de 36 anos (1979 a 2014). O CFSR foi projetado e executado como um sistema global de melhor resolução acoplado atmosfera-oceano-superfície terrestre-sistema de gelo marinho para fornecer a melhor estimativa do estado desses domínios durante este período. A distância entre os pontos de coleta de dados entre as latitudes e longitudes estão em 0,3°. O site da CFSR disponibiliza os dados diários de (precipitação, vento, umidade relativa e solar) em formato de arquivo SWAT para um determinado local e o período de tempo. (CFSR, 2021). Os dados usados da base CFSR foram selecionados em função da proximidade das estações de precipitação para manter a mesma quantidade de registros para umidade, radiação, temperatura e velocidade do vento.

A Tabela 1 apresenta a relação completa das origens dos dados e períodos de cada região aplicadas nas modelagens para dados de vazão e sedimento e o Quadro 2 refere-se aos dados climáticos.

Tabela 1 – Estações hidrossedimentológicas aplicadas nas modelagens

Bacias	Vazão/Sedimento	Latitude	Longitude	Calibração	Validação
Jauru	66071400	-15,8500	-58,4600	1997-2006	2007-2013
Alto Paraguai	66070004	-16,0761	-57,7022	1994-2006	2007-2013
Manso	66122000	-14,8100	-55,2761	2007-2010	2011-2013
São Lourenço	66460000	-15,9980	-55,9217	2009-2009	2010-2012
Taquari	66850000	-18,7244	-54,5297	2004-2007	2008-2010
Jequitaí	42145498	-17,2097	-44,4603	2001-2006	2006-2008
Urucuia	43429998	-15,9178	-46,1192	1993-1995	1994-1996
Paranaíba	60011000	-18,6017	-46,5394	1985-1988	1988-1990
Rio Verde	61537000	-21,6108	-45,4889	2004-2008	2009-2012
Guaporé	86560000	-28,9122	-51,9531	2010-2012	2012-2013
Tibagi	64465000	-24,5094	-50,4097	2008-2011	2011-2013

Fonte: Autor (2022)

Quadro 2 – Estações climatológicas com dados de precipitação aplicadas nas

Bacia	Estações	Latitude	Longitud	Bacia	Estações	Latitude	Longitude
Jauru	1458001	-146,100	-584,200	Taquari	1754004	-178,310	-543,131
	1458002	-146,900	-586,400		1854001	-180,990	-545,472
	1458003	-149,000	-586,700		1854002	-189,100	-548,322
	1558005	-150,600	-586,500		1854003	-186,490	-543,572
	1558006	-152,400	-586,900		1854004	-185,040	-547,556
	1558007	-154,700	-587,700		1954004	-194,970	-539,967
	1558008	-154,400	-585,800		1954007	-194,130	-544,906
Alto Paraguai	1457001	-146,500	-574,100		1853002	-181,910	-542,578
	1457000	-148,500	-578,600	Jequitaiá	1644028	-167,040	-440,630
	1557001	-150,700	-571,800		1743002	-173,290	-434,380
	1557003	-156,400	-574,700		1744010	-176,410	-443,750
	1657003	-160,800	-576,900	Urucuaia	1546007	-156,100	-464,100
	1456001	-144,600	-568,500	Paranaíba	1846017	-185,780	-462,500
	1558000	-152,400	-581,300		1846018	-185,780	-465,630
1558001	-154,600	-578,900	1946022		-188,900	-462,500	
			1846004		-188,900	-468,750	
Manso	1454002	-149,260	-549,728		1946008	-192,020	-465,630
	1454003	-147,540	-549,781		1946005	-192,020	-468,750
	1455011	-146,660	-554,603	Rio Verde	2244095	-223,833	-449,667
	1555012	-150,530	-550,733		2244071	-221,992	-449,733
	1456004	-146,530	-561,239		2145039	-219,667	-453,667
	1556010	-152,740	-561,283		2145009	-219,192	-454,789
1554006	-159,890	-549,683	2144036		-219,833	-449,500	
1556007	-156,990	-551,356	Guaporé		A837	-288,592	-525,424
1654000	-164,710	-546,561		A839	-282,268	-524,036	
1654001	-166,740	-542,661		A840	-291,646	-515,342	
1654004	-168,430	-544,081		A844	-282,224	-515,128	
1654005	-163,910	-541,494	Tibagi	A818	-250,108	-508,539	
1655001	-166,080	-552,064		A819	-247,869	-499,992	
				A823	-255,679	-510,779	

Fonte: Autor (2024)

A série histórica de dados de vazão apresenta frequência diária, diferentemente dos dados de sedimento, com dados coletados em média 3 vezes ao ano. Nesse caso, foi necessário o preenchimento dos demais dias por meio da interpolação da correlação entre vazão e sedimento observados. Para a interpolação dos dados e preenchimento dos dias inexistentes para sedimento foi aplicado o método de regressão exponencial ou linear dependendo do melhor

resultado de R^2 . A formulação da regressão exponencial é apresentada na Equação 1 e a regressão linear na equação 2.

Equação exponencial

$$y = B \cdot e^{a \cdot x} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

x são os valores da variável independente (vazão)

y são os valores da variável dependente (sedimentos)

n é o número total de observações

$$a = \frac{\sum(x \cdot \log y) - \frac{1}{n}(\sum x)(\sum \log y)}{\sum x^2 - \frac{1}{n}(\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum \log y}{n} - a \cdot \frac{\sum x}{n}$$

$$B = e^b$$

Onde:

a é o coeficiente que determina a taxa de crescimento exponencial.

B é o coeficiente que ajusta a escala da função exponencial

Equação linear

$$y = a + bx \quad \text{(Equação 2)}$$

y é a variável dependente (sedimento).

X é a variável independente (vazão)

a é o intercepto (valor de y quando $x=0$)

b é o coeficiente de inclinação

$$b = \frac{\sum(xy) - \frac{1}{n}(\sum x \sum y)}{\sum x^2 - \frac{1}{n}(\sum x)^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Onde:

\bar{x} é a média dos valores de x

\bar{y} é a média dos valores de y

n é o número de observações

Os dados de precipitação das bacias hidrográficas de Guaporé e Tibagi foram obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) enquanto as demais pela ANA.

As variáveis climatológicas associadas às estações (Tabela 2) necessárias para serem inseridas no modelo foram calculadas dentro do software de gestão, conforme (SWAT: Model use, calibration, and validation Arnold *et al.*, 2012).

Tabela 2 – Variáveis climatológicas das estações de monitoramento

Variáveis	Descrição	Unidade
PCPMM	Precipitação média	mm
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação diária	
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para precipitação	
PR_W1	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia seco	
PR_W2	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia úmido	
PCPD	Número médio de dias com chuva no mês	Nº de dias
RAINHHMX	Precipitação máxima de meia hora	mm
RAIN_YRS	Período de retorno	Nº de anos
TMPMX	Média da temperatura máxima do ar	C°
TMPMN	Média da temperatura mínima do ar	C°
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima do ar	
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima do ar	
SOLARAV	Radiação solar	MJ/m ²
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho	C°
WNDVAV	Velocidade média do vento	m/s

Fonte: Autor (2024)

3.3.2. Calibração e validação dos modelos hidrossedimentológicos

O procedimento de calibração foi estabelecido com a determinação de parâmetros que influenciam os processos hidrológicos na modelagem. Os parâmetros são organizados de acordo com os tipos de arquivos que o software SWAT processa e os valores atribuídos aos parâmetros são condicionados a serem processados por sub-bacia ou HRU.

O ajuste dos modelos foi a comparação dos dados simulados pelo software SWAT com os dados observados das estações, por meio dos coeficientes: Kling-Gupta Efficiency (KGE), Pearson e Percentual de tendência (pBias). A interpretação dos coeficientes foi com base no Quadro 3 para o KGE, Quadro 4 para o pBias e Quadro 5 para o Pearson.

O Coeficiente de Eficiência KGE (Equação 3) é uma métrica de desempenho utilizada para avaliar a precisão de modelos. O KGE foi introduzido por Gupta et al. (2009) para resolver

algumas limitações associadas ao Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). O KGE é baseado em três componentes principais: correlação, viés relativo e variabilidade relativa.

- Correlação \mathbb{R} : Mede a correlação linear entre os valores simulados e observados;
- Viés Relativo (β): Representa a razão entre as médias dos valores simulados e observados.
- Variabilidade Relativa (γ): É a razão entre os desvios padrão dos valores simulados e observados.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

r é a correlação linear entre os valores observados e simulados.

β é o viés relativo, calculado como $\frac{\mu_s}{\mu_o}$ onde μ_s é a média dos valores simulados e μ_o é a média dos valores observados.

γ é a variabilidade relativa, calculada como $\frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$ onde σ_s é o desvio padrão dos valores simulados e σ_o é o desvio padrão dos valores observados.

Quadro 3 – Interpretação para coeficiente KGE

Valores para KGE	Interpretação
KGE = 1,00	Ajuste perfeito
$0,75 \leq KGE < 1,00$	Ajuste muito bom
$0,50 \leq KGE < 0,75$	Ajuste bom
$0,50 \leq KGE < 0,00$	Ajuste razoável
$KGE \leq 0,00$	Ajuste ruim

Fonte: (Gupta *et al.*, 2009)

O pBias (Equação 4) é uma métrica útil porque fornece uma indicação clara de se o modelo tende a superestimar ou subestimar os valores observados. No entanto, ele deve ser usado em conjunto com outras métricas de desempenho, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente Kling-Gupta (KGE), para obter uma avaliação mais completa do desempenho do modelo.

Ao utilizar o PBIAS, é essencial considerar o contexto específico do estudo e os objetivos da modelagem para interpretar os resultados de maneira adequada. Diferentes disciplinas ou subcampos podem ter padrões ligeiramente diferentes para o que constitui um desempenho “bom” ou “satisfatório”.

$$pBias = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

O_i são os valores observados.

S_i são os valores simulados.

N é o número total de observações.

Quadro 4 – Interpretação para coeficiente pBias

Valores para pBias	Interpretação
pBias < 10%	Muito Bom
10% ≤ pBias < 15%	Bom
15% ≤ pBias < 25%	Satisfatório
pBias > 25%	Insatisfatório

Fonte: (Liew; Arnold; Garbrecht, 2003)

A correlação de Pearson (Equação 5), também conhecida como coeficiente de correlação de Pearson, é uma medida estatística que quantifica a força e a direção de uma relação linear entre duas variáveis contínuas. O valor resultado pode estar entre -1 e 1. Sendo o valor 1 como uma correlação perfeita positiva, -1 como uma correlação perfeita negativa e 0 indica que não há correlação. A variação do resultado nesse intervalo indica o grau de correlação entre as duas variáveis avaliadas e a ser interpretado como apresentado no Quadro 5.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

n é o número de pares de dados

x e y são as variáveis que estão sendo comparadas

$\sum xy$ é a soma do produto dos pares

$\sum x$ e $\sum y$ são as somas dos valores de x e y , respectivamente

$\sum x^2$ e $\sum y^2$ são as somas dos quadrados dos valores de x e y , respectivamente

Quadro 5 – Interpretação para coeficiente de Pearson

Valores para Pearson	Interpretação
$0,8 \leq \text{Pearson} \leq 1,0$	Correlação forte
$0,5 \leq \text{Pearson} < 0,8$	Correlação moderada
$0,3 \leq \text{Pearson} < 0,5$	Correlação fraca
$0,0 \leq \text{Pearson} < 0,3$	Correlação desprezível

Fonte: (Moore; McCabe; Craig, 2014)

3.4. DINÂMICA DE SEDIMENTOS

Com a execução dos modelos hidrossedimentológicos, o SWAT gerou diversos resultados, onde o arquivo OUTPUT.HRU apresenta a taxa de produção de sedimento para cada HRU. Para possibilitar as análises, foi necessário realizar um tratamento nos dados desse arquivo. Esse procedimento inclui a importação do arquivo para o ambiente do software R e a seleção das colunas de interesse do projeto.

Os mapas de uso e ocupação da terra usados na entrada dos modelos de cada bacia obtidos no MAPBIOMAS (MapBiomas, 2020), foram mantidos com suas classificações originais apenas no processo de modelagem. Porém, para atender os objetivos do projeto, bem como facilitar as análises dos dados, foi necessário reclassificar esses usos (Tabela 3). Todas as análises com base na taxa de produção de sedimentos que esteja relacionado com o uso e ocupação do solo foi considerado com essa reclassificação. Essa reclassificação fez parte do tratamento dos dados no momento da importação dos resultados obtidos no SWAT.

Tabela 3 - Reclassificação de uso e ocupação da terra para o projeto

MapBioma	Descrição MapBiomas	Código Proj.	Descrição Projeto
2	Formação natural	1	Veg_Natural
3	Formação florestal	1	Veg_Natural
4	Formação savânica	1	Veg_Natural
12	Formação campestre	1	Veg_Natural
18	Agricultura	2	Agricultura
20	Cana de açúcar	2	Agricultura
15	Pastagem	3	Pastagem
24	Urbano	4	Area_Nao_Vegetada
25	Outras áreas não vegetadas	4	Area_Nao_Vegetada

29	Afloramento rochoso	4	Area_Nao_Vegetada
30	Mineração	4	Area_Nao_Vegetada
33	Rios, lagos e oceano	0	Água

Fonte: Autor (2024)

3.4.1. Análise de distribuição da taxa de sedimento

A análise da distribuição dos dados referente à taxa de produção de sedimento teve como início de processo, a importação do arquivo de resultados do modelo SWAT (OUTPUT.HRU) e selecionando as colunas/atributos de interesse, a saber: HRU, Subbacia, Dia, Uso da terra, Solo, Declividade e Taxa de sedimento. Após a seleção das colunas, foi calculada a média mensal de todo período de modelagem. Esse processo gerou uma base de dados para cada bacia modelada, para análises independentes. Para essa análise de distribuição, foi aplicado o gráfico de violino que representa o mesmo padrão do *boxplot* tradicional, porém com uma característica visual diferente que destaca a densidade dos dados. A distribuição das taxas de sedimento foi agrupada pelas classes de cada variável espacial (uso e ocupação da terra, solo e declividade), com o objetivo de compreender possíveis influências das classes na produção de sedimento.

3.4.2. Relações entre variáveis espaciais e taxa de sedimento

As análises das relações entre as variáveis espaciais foram realizadas com o objetivo de compreender como a taxa de produção de sedimento se comporta entre duas variáveis. Sendo assim, foram executadas as combinações de: Uso e ocupação da terra com declividade, uso e ocupação da terra com solo e declividade com solo. Para cada variável em análise, foi calculada a média da taxa de produção de sedimento. Com isso, gerou-se 3 gráficos para cada bacia para melhor observação desse comportamento.

3.4.3. Importância relativa das variáveis espaciais na taxa de sedimento

A determinação da importância relativa das classes foi determinada com o uso das Redes Neurais Artificiais (RNA) com base nas taxas de produção de sedimento obtidas a partir da modelagem hidrossedimentológica. Foram extraídos os resultados da taxa de produção de sedimento, os quais são representados por uma tabela contendo cada HRU e o valor em ton.ha⁻¹

¹.ano⁻¹. Como já apresentado, a HRU é uma combinação de uso e ocupação da terra, solo e declividade, dispostas em colunas independentes. Considerando que os dados de uso e ocupação da terra, solo e declividade são categóricos, foi necessário a transformação desses dados no formato *dummy* (presença/ausência) para que o algoritmo da RNA conseguisse calcular a importância relativa em função da taxa de produção de sedimento. *Dummy* é um tipo de formato de dados que transforma um dado alfanumérico em numérico, sendo 0 o dado que não existe ou 1, o dado que existe. A

Tabela 4 representa uma estrutura dos dados em formato *dummy*. Com essa transformação, o modelo da RNA considerou as colunas de uso e ocupação da terra, solo e declividade como variáveis explicativas e a taxa de produção de sedimento como variável resposta.

Tabela 4 - Estrutura de tabela no formato dummy para uso na RNA

HRU	Veg. Natural	Pastagem	Agricultura	Área não vegetada	Taxa
1	1	0	0	0	Valor 1
2	0	1	0	0	Valor 2
3	0	0	1	0	Valor 2
4	0	0	0	1	Valor 4
...

Fonte: Autor (2024)

Para a aplicação do método da RNA, foi utilizado o software R com o uso da biblioteca H2O, com a função *h2o.deeplearning* variando as camadas de neurônios e o número de épocas (Tabela 5). A primeira camada de neurônios representa a entrada das variáveis explicativas para a RNA iniciar o processamento do algoritmo. O número de épocas refere-se à quantidade de ciclos que a RNA executa internamente fazendo os ajustes para validar com a variável resposta que é a taxa de produção de sedimento. Para exibir a performance do modelo e identificar a importância relativa das variáveis, foi utilizada a função *h2o.performance*. A cada execução do modelo, o software gera uma resposta contendo as importâncias relativas das classes e o erro quadrático médio, que identifica o desempenho do modelo, a depender do valor de referência. Normalmente utiliza-se 5% como referência, e que foi também aplicado nessa pesquisa. Sendo assim, é necessário executar o modelo várias vezes até encontrar o melhor desempenho, ou seja, modelos com menores erros. Para facilitar o processo da programação em R, foi criada uma rotina para repetir a execução do modelo por 50 vezes e após a conclusão fez a seleção dos três melhores modelos, seguido de um cálculo de média entre os três. Essa repetição de 50 ciclos

foi definida como uma quantidade suficiente para obter vários modelos com boa resposta. Mas que pode ser alterado a depender das bases de dados processadas.

Tabela 5 - Configurações das RNAs para identificação das importâncias relativas das classes

Configuração do modelo	Uso da Terra	Solo	Declividade
Camadas de neurônios	3	2	3
Nº de neurônios por camada	5, 10 e 15	6 e 12	5, 10 e 12
Nº de ciclos para cada modelo	30.000	30.000	30.000

Fonte: Autor (2024)

3.5. PROPOSTA DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS

A importância relativa definida anteriormente para as variáveis espaciais referente às suas classes, será inserida na formulação do índice de impedância, com o objetivo de ponderar o valor do índice em função das influências dessas variáveis no ambiente. A proposição dessa ponderação é similar à ponderação que é processada no cálculo do índice de qualidade das águas (IQA - NSF) (Sperling, 2007).

A proposição do IIS (Equação 6) é aplicar a importância relativa da classe da variável espacial como peso de ponderação P_u, P_s, P_d , sendo uso e ocupação da terra, solo e declividade respectivamente, em relação a uma nota. Essa nota foi a importância relativa entre todos os pesos juntos (IR_u), (IR_s) e (IR_d) respectivamente para uso e ocupação da terra, solo e declividade. O resultado dessa ponderação é considerado como o valor de influência das variáveis espaciais para o IIS. A Tabela 6 esquematiza como ficará os pesos das classes separadas para cada variável espacial. A Tabela 7 representa o esquema da importância relativa de todas as classes juntas.

Tabela 6 – Pesos das variáveis hidrossedimentológicas por grupo

Uso da Terra	Peso (P_u)	Declividade	Peso (P_d)	Solo	Peso (P_s)
Vegetação	Peso 1	0-3	Peso 1	Argissolo	Peso 1
Pastagem	Peso 2	3-8	Peso 2	Cambissolo	...
Agricultura	Peso 3	8-20	Peso 3	Latossolo	
Área não	Peso 4	20-45	Peso 4	...	
		45-75	Peso 5		
		75-99	Peso 6		
		Total Peso	1	Total Peso	1

Fonte: Autor (2022)

Tabela 7 – Importância relativa das variáveis hidrossedimentológicas geral

Variáveis	IR
Vegetação Nativa	>0
Pastagem	...
Agricultura	
Área não vegetada	
0-3	
3-8	
8-20	
20-45	
45-75	
75-99	
Argissolo	
Cambissolo	
Latossolo	
...	n
Total IR	1

Fonte: Autor (2022)

Com os elementos das ponderações definidos, o IIS será o produto das três ponderações, os quais representam a influência de cada variável espacial no processo (Equação 1). O valor do IIS é adimensional e resultará no intervalo de 0 a 1. Quanto maior valor do IIS maior será a contribuição na resistência do processo sedimentológico.

$$IIS = IR_u^{p_u} * IR_s^{p_s} * IR_d^{p_d} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

IIS: Índice de Impedância de Superfície

IR: Importância relativa geral da classe (*u*: uso da terra, *s*: solo, *d*: declividade)

p: Peso correspondente a classe de cada variável (uso da terra, solo e declividade)

3.5.1. Validação do Índice de Impedância de Superfície (IIS)

Devido a impossibilidade de validar o índice por meio de dados observados diretamente na área, buscou-se aplicar o índice na equação universal de perda de solo (USLE) a qual já está consolidada. A escolha da USLE foi por utilizar os mesmos parâmetros que foram aplicados no

IIS, além da erosividade da chuva. Sendo assim, manteve-se o parâmetro da erosividade e trocou os demais substituindo pelo IIS.

A USLE foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Equação 7).

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

- **A** é a perda média anual de solo ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$).
- **R** é o fator de erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).
- **K** é o fator de erodibilidade do solo (toneladas por hectare por unidade de índice de erosividade).
- **LS** é o fator de comprimento e inclinação da encosta (adimensional).
- **C** é o fator de cobertura e manejo do solo (adimensional).
- **P** é o fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Fator R (Erosividade da Chuva):

Representa a capacidade da chuva de causar erosão. É calculado com base na intensidade e quantidade de precipitação. Estudos como o de Renard et al. (1997) forneceram métodos para determinar o fator R em diferentes regiões.

Fator K (Erodibilidade do Solo):

Reflete a suscetibilidade do solo à erosão. Depende das propriedades físicas e químicas do solo, como textura, estrutura, permeabilidade e conteúdo de matéria orgânica. Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram tabelas para determinar o fator K com base em análises laboratoriais.

Fator LS (Comprimento e Inclinação da Encosta):

Combina o efeito do comprimento da encosta e sua inclinação. Quanto maior e mais íngreme a encosta, maior será a perda de solo. McCool et al. (1987) aprimoraram as fórmulas para calcular o fator LS em diferentes condições topográficas.

Fator C (Cobertura e Manejo do Solo):

Representa o efeito da cobertura vegetal e práticas de manejo do solo na redução da erosão. Valores de C variam de 0 (cobertura completa e proteção máxima) a 1 (solo exposto). Estudos como o de Foster et al. (1981) forneceram dados para diferentes tipos de cobertura e manejo.

Fator P (Práticas Conservacionistas):

Reflete a eficácia das práticas de conservação do solo, como terraceamento, contorno e cultivo em faixas. Práticas que reduzem a velocidade da água de escoamento e aumentam a infiltração do solo têm valores de P menores. Wischmeier e Smith (1978) forneceram diretrizes para determinar o fator P.

Como observa-se na descrição dos parâmetros da equação da USLE, são utilizados parâmetros relacionados ao uso e ocupação da terra, solo e declividade. Os cálculos da USLE foram executados dentro da modelagem com o SWAT e os resultados extraídos a partir do arquivo OUTPUT.HRU.

Após a extração dos dados, foram gerados os mapas de perda de solo para cada bacia. Para o uso da USLE como validação do IIS, manteve-se a erosividade da chuva e substituiu-se os parâmetros K, L, S, C e P pelo IIS (Equação 8).

$$ULSE_{Adap} = R * (1 - IIS) \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

$ULSE_{Adap}$ – Adaptação da USLE tradicional

R – Erosividade

IIS – Índice de impedância do solo

Como não existe o parâmetro de erosividade da chuva na proposta do IIS, foi necessário calcular separadamente e incluí-la na USLE adaptada (Equação 8). Como já exposto na definição do IIS, o qual representa a resistência ao fluxo de sedimento, foi necessária uma adequação para ser aplicado na equação da USLE, uma vez que seus parâmetros referentes à superfície estão relacionados a contribuição para a perda de solo. Sendo esses o inverso da impedância.

A erosividade é calculada em função da distribuição da chuva na bacia através da interpolação de dados das estações pluviométricas. Com a interpolação produzida, calculou-se a erosividade a partir da equação 9 (Renard; Freimund, 1994).

$$R = \frac{(0,7397 * (Precip^{1,847}))}{1000} \quad \text{(Equação 9)}$$

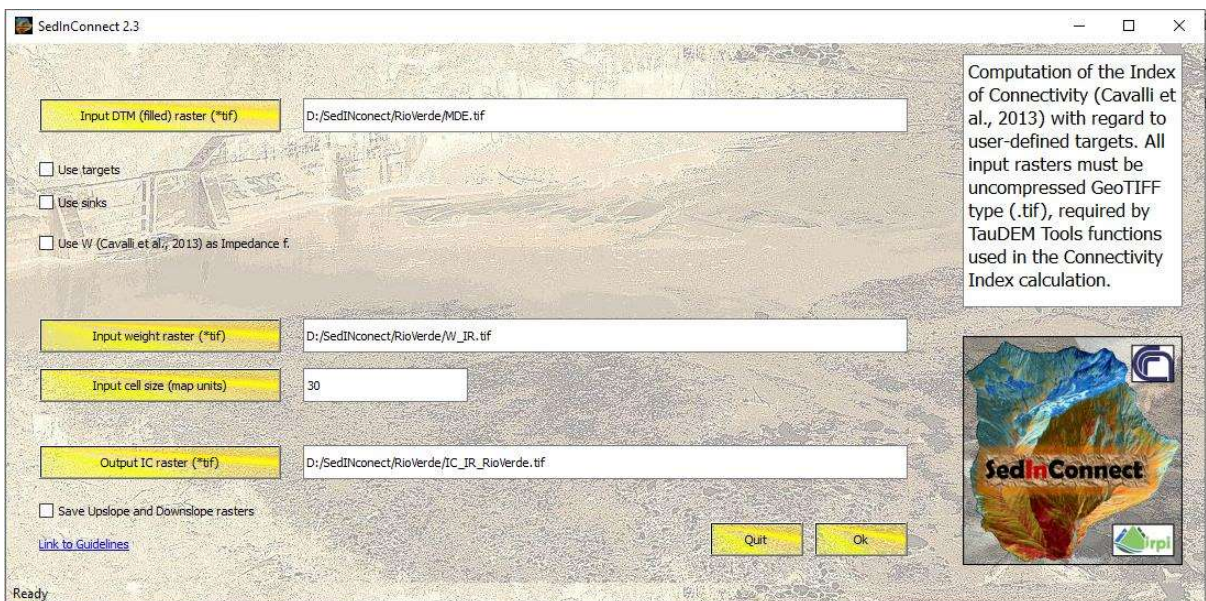
Com os resultados da USLE adaptada com IIS concluídos e a ULSE tradicional extraída da modelagem, foi executada a correlação de cada uma com a taxa de sedimento para a validação.

O pressuposto para a aplicação da validação com o uso da USLE está na coerência dos parâmetros da equação estarem relacionados diretamente com os processos hidrossedimentológicos aplicados dentro do modelo SWAT.

3.5.2. Aplicação do IIS na conectividade sedimentológica

A aplicação do IIS foi por meio do índice de conectividade de sedimentos desenvolvido por Cavalli (2013) sobre uma das áreas simuladas no modelo hidrossedimentológico. Foi utilizado o software SedInConnect (Figura 10) para calcular os índices de conectividade, com a execução de dois modelos: um com o parâmetro de impedância original e outro aplicando o IIS.

Figura 10 - Tela do software SedInConnect



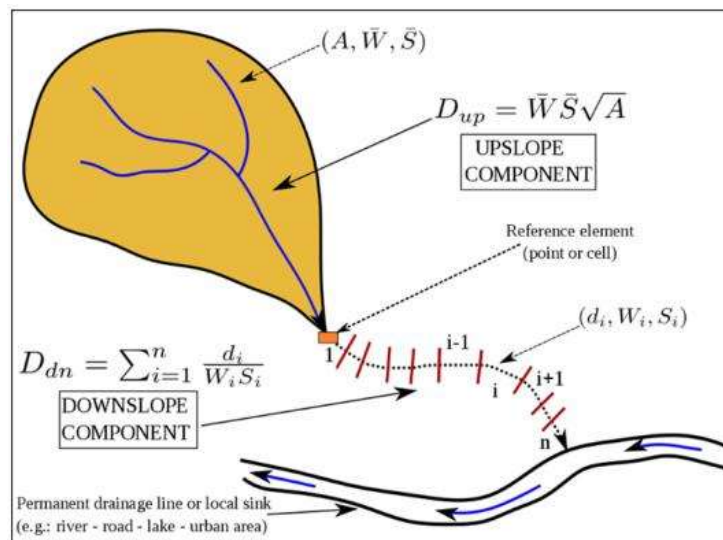
Fonte: (Crema; Cavalli, 2018)

A configuração do software para geração do índice de conectividade de sedimento, utiliza-se dois arquivos com formato *raster*, sendo um referente ao modelo digital de elevação (MDE) da área de interesse e outro referente ao peso que será aplicado como impedância de superfície. Além desses arquivos de entrada, define-se também o tamanho do pixel do mapa de resultado, bem como o nome do arquivo que resultará no mapa de conectividade de sedimentos.

O índice de conectividade de sedimento se baseia em dois componentes, a saber (Figura 11):

- Componente descendente D_{dn} : é o potencial de afundamento devido ao comprimento do caminho d , fator de impedância W e inclinação S ao longo do caminho descendente.
- Componente ascendente D_{up} : é o potencial para roteamento descendente devido à área de captação ascendente A , inclinação média S e um fator de impedância W .

Figura 11 - Componentes da paisagem para o índice de conectividade de sedimentos



Fonte: (Borselli; Cassi; Torri, 2008)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos resultados das modelagens hidrossedimentológicas das bacias, foram analisados a eficiência dos modelos, a distribuição das taxas de produção de sedimento, o comportamento das variáveis espaciais em função dos sedimentos e a importância relativa das classes das variáveis, também em função dos sedimentos. A importância relativa das classes é a base da formulação do índice de impedância de superfície, o qual é o objetivo central do trabalho.

4.1. MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

4.1.1. Estrutura das bacias e HRUs

A Tabela 8 representa os resultados das modelagens que gerou os números específicos referentes à quantidade de subbacias e HRUs em cada bacia e suas respectivas áreas.

Tabela 8 - Quantidade de sub-bacias e HRUs das áreas modeladas

Bacia	Nº de Subbacias	Nº de HRUs	Área (km ²)	Area média das subbacias (km ²)	Area média das HRUs (km ²)
Jauru	259	1.500	5.566,39	21,49	3,71
Alto Paraguai	467	1.823	26.940,18	57,69	14,78
Manso	285	2.278	10.329,37	36,24	4,53
São Lourenço	319	2.936	22.958,36	71,97	7,82
Taquari	489	2.898	27.579,19	56,40	9,52
Jequitaiá	127	516	6.870,85	54,10	13,32
Urucuia	37	741	11.609,40	313,77	15,67
Paranaíba	35	1.020	3.777,39	107,92	3,70
Rio Verde	35	1.360	6.266,33	179,04	4,61
Guaporé	57	2.370	2.019,21	35,42	0,85
Tibagi	55	2.271	87.77,50	159,59	3,87

Fonte: Autor (2024)

Os Quadro 6 e 7 apresentam os detalhes das áreas para cada bacia, fornecendo informações da distribuição espacial das variáveis (uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade) que serão importantes para a análise subsequente da modelagem.

Quadro 6 - Configuração das áreas das classes após a modelagem

Uso e ocupação da terra	Jauru		Alto Paraguai		Manso		São Lourenço		Taquari		
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	
Uso e ocupação da terra	Veg.	222.606	40,00	1.284.356	47,68	585.234	56,66	854.824	37,23	925.870	33,57
	Pastagem	325.459	58,47	1.249.021	46,36	341.286	33,04	1.051.005	45,78	1.583.143	57,40
	Agricultura	5.833	1,05	64.648	2,40	70.563	6,83	378.967	16,51	227.742	8,26
	Água	2.335	0,42	92.459	3,43	35.392	3,43	3.280	0,14	20.280	0,73
	Área não	405	0,06	3.544	0,13	463	0,04	7.765	0,34	1.113	0,04
Declividade	0-3.0	141.172	25,36	1.373.851	51,00	267.511	25,90	560.369	24,41	623.297	22,60
	3.0-8.0	309.366	55,58	1.078.502	40,03	453.795	43,93	963.239	41,96	1.512.046	54,83
	8.0-20.0	98.991	17,78	152.998	5,68	250.164	24,22	601.005	26,18	542.531	19,67
	20.0-45.0	7.110	1,28	86.670	3,22	58.859	5,70	170.102	7,41	76.237	2,76
	45.0-75.0			2.007	0,07	2.608	0,25	1.126	0,05	4.038	0,14
Tipo de Solo	75.0-9999										
	Latossolo	22.700	4,08	962.251	35,72	307.129	29,73	182.933	7,97	225.316	8,17
	Neossolo	246.420	44,27	491.619	18,25	471.193	45,62	960.398	41,83	2.078.231	75,36
	Argissolo	258.119	46,37	828.183	30,74	107.103	10,37			186.206	6,75
	Cambissolo			216.005	8,02						
	Luvisso							1.015.036	44,21	268.395	9,72
	Gleissolo			186.691	6,93						
	Nitossolo			9.278	0,34						
	Chernossolo	29.400	5,28								
	Esposossolo							137.474	5,99		
PIntossolo					147.512	14,28					

Fonte: Autor (2024)

Quadro 7 - Configuração das áreas das classes após a modelagem (cont.)

	Jequitaiá		Urucuiá		Paranaíba		Rio Verde		Guaporé		Tibagi		
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	
Uso e ocupação da terra	Veg. Natural	414.853	60,38	747.183	64,36	64.532	17,08	139.721	22,30	77.162	38,22	314.457	35,83
	Pastagem	244.705	35,62	189.645	16,34	251.917	66,69	359.802	57,42	3.685	1,82	45.169	5,15
	Agricultura	27.007	3,93	212.371	18,29	56.584	14,98	114.213	18,23	118.420	58,65	475.892	54,22
	Água	61	0,01	10.147	0,87	2.271	0,60	1.995	0,32	937	0,46	19.789	2,25
	Área não veg.	457	0,07	1.592	0,05	2.430	0,64	10.902	1,74	1.715	0,85	22.443	2,56
	0-3.0	168.986	24,59	353.630	30,46	71.543	18,94			20.483	10,14	147.675	16,82
	3.0-8.0	241.389	35,13	434.693	37,44	117.706	31,16			38.852	19,24	280.904	32,00
	8.0-20.0	236.174	34,37	277.493	23,90	145.875	38,62			77.994	38,63	393.485	44,83
	20.0-45.0	40.534	5,90	87.629	7,55	41.952	11,11			52.756	26,13	54.971	6,26
	45.0-75.0			7.455	0,64	650	0,17			11.145	5,52	702	0,08
75.0-9999										688	0,34		
Declividade	Latossolo	412.523	60,04	1.063.377	91,59	300.836	79,64	487.804	77,84	24.327	12,05	549.577	62,61
	Neossolo	402.523	58,14	33.686	2,90					27.078	13,41		
	Argissolo	125.950	18,33							16.573	8,21	19.047	2,17
	Cambissolo			63.877	5,50	76.901	20,36	138.829	22,15			309.125	35,22
	Luvissolo												
	Gleissolo												
	Nitossolo											54.253	26,87
	Chernossolo											79.688	39,47
	Espodossolo												
	Plintossolo												

Fonte: Autor (2024)

4.1.2. Calibração dos modelos

A etapa de calibração e validação dos modelos hidrossedimentológicos é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade das simulações realizadas. Os parâmetros físicos representam características mensuráveis da bacia, como áreas, frações impermeáveis e inclinação do terreno. Em contraste, os parâmetros de processo são propriedades da bacia que não podem ser medidas diretamente, como a profundidade média ou efetiva de armazenamento de umidade do solo, a taxa efetiva de influxo lateral e o coeficiente de não-linearidade que influencia a percolação para o nível freático. (MENGISTU; SORTEBERG, 2012).

Durante o procedimento de calibração e validação dos modelos, foram realizados ajustes em diversos parâmetros para encontrar uma aproximação entre os hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados. A complexidade das interações hidrossedimentológicas demanda uma abordagem criteriosa na definição desses parâmetros, levando em conta as características específicas de cada bacia e os processos que influenciam seu comportamento hidrológico.

Cada ajuste foi acompanhado de uma análise dos resultados obtidos, comparando-se as simulações com dados observados de vazão e sedimentos com os dados simulados. Foram executadas diversas configurações até chegar aos valores que se adequaram melhor às condições específicas de cada bacia hidrográfica (Tabela 9), garantindo uma representação mais precisa dos processos hidrossedimentológicos. Na mesma tabela, a coluna “Arq. SWAT” representa o tipo de arquivo que organiza os parâmetros no modelo, o que facilita uma compreensão inicial das atuações desses parâmetros.

Tabela 9 - Parâmetros calibrados para as bacias

Arq. SWAT	Parâmetro	Jauru	Alto Paraguai	Manso	São Lourenço	Taquari	Jequiitá	Urucuaia	Paranaíba	Rio Verde	Guaporé	Tibagi
GW	ALPHA_BF	0,80	0,7	0,10	0,75	0,40	0,20	0,90	0,20	0,90	0,10	0,90
GW	ALPHA_BF_D	0,58	0,5	0,95	0,10	0,40	0,01	0,80	1	0,80	0,80	0,80
RTE	ALPHA_BNK	0,00	0	0,00	0,00	0	0,90	0,50	0	0,50	0,10	0,50
SOL	ANION_EXCL	0,50	0,6	0,05	0,50	0,10	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
HRU	CANMX	95	85	81	90	80	10	95	90	22	90	33
RTE	CH_ERODMO	0,00	0	0	0	0	0,40	0,90	0,50	0,90	0,60	0,1
RTE	CH_K2	50	30	287	40	250	0,85	0,50	50	0,10	0,90	0,01
RTE	CH_N2	0,01	0,02	0,01	0,001	0,008	0,001	-0,01	0,014	0,001	0,001	0,03
MGT	CN2	55	35	88	30	77	30	0,80	40	70	35	40
HRU	DIS_STREAM	5000	30000	6272	1000	500	500	2000	5000	2000	2000	2000
HRU	EPCO	0,50	0,6	0,50	0,90	0,90	0,90	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90
HRU	ESCO	0,95	0,02	0,80	0,05	0,40	0,10	0,60	0,70	0,60	0,60	0,60
HRU	EVPO	0,273	0,8	0,10	0,95	0,80	0,10	0,70	1	0,10	0,10	0,10
GW	GW_DELAY	400	500	382	300	600	500	500	250	300	300	300
GW	GW_REVAP	0,096	0,2	0,5	0,80	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
GW	GWQMN	400	1000	3824	270	3	5000	6000	5000	6000	5000	5000
SOL	Ksat	0,99	0,1	0,25	0,50	0,60	0,85	0,95	0,50	0,40	0,60	0,04
HRU	LAT_SED	55	100	498	6000	3000	18	500	80	3000	350	3000
HRU	LAT_TTIME	95	55	110	150	180	5	10	180	2	5	1
HRU	OV_N	22	50	0,01	0,01	0,01	6	50	10	5	1	3
GW	RCHRG_DP	0,378	1	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
GW	REVAPMN	600	100	210	300	500	10	30	800	30	30	30
HRU	SED_CON	88	300	3782	6000	3500	200	1000	70	4000	350	4500
HRU	SLSOIL	67	100	0,00	50	0	50	80	40	0	15	100
SOL	SOL_AWC	0	0	0,70	0	0,70	5	25	0	4	4	4
SOL	SOL_BDI	0,20	0,15	1	0,02	0,02	0	0	0	0	0	0
SOL	SOL_CRK	0,50	0,7	0,8	0,50	0,03	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
SOL	SOL_K1	0,14	0,12	0,11	0,12	0,11	0	0	0	0	0	0
HRU	SURLAG	3,00	2,00	2,7	0,50	0,60	0,60	0,80	0,060	0,20	0,50	0,50
SOL	USLE_K	0,70	0,70	0,10	0,50	0,50	0,90	0,10	0,50	0,60	0,80	0,10

Fonte: Autor (2024)

Ao longo do processo de calibração, foram testadas diversas configurações dos parâmetros dos modelos das bacias. Nesse contexto, na discussão a seguir, o termo "configuração" refere-se aos ajustes dos parâmetros para a execução do modelo. Para uma melhor compreensão das influências dos parâmetros, a discussão será organizada com base nas características que o próprio SWAT separa em tipos de arquivos para a gravação dos valores aplicados (Tabela 10). Com destaque especialmente nos parâmetros mais sensíveis.

Tabela 10 - Características dos arquivos de entrada de parâmetros do SWAT

Tipo de Arquivo	Descrição das características dos parâmetros
RTE	Processos físicos que afetam o fluxo de água e o transporte de sedimentos na rede de canais da bacia hidrográfica
MGT	Discriminação das práticas de gestão da terra
GW	Controle nos processos de escoamento subterrâneo
SOL	Dados referentes às características e processos no solo
HRU	Representa as características das HRUs de maneira diversificada

Fonte: Autor (2024)

4.1.3. Resultados das simulações

Devido a grande quantidade de bacias simuladas, a representação dos hidrogramas estão no Apêndice B e os sedimentogramas no Apêndice C. Porém, os resultados dos coeficientes de eficiência estão descritos na Tabela 11 para vazão e na Tabela 12 para sedimentos.

Tabela 11 - Resultados das simulações para vazão

Bacias	Calibração				Validação			
	Período	KGE	pBias	Pearson	Período	KGE	pBias	Pearson
Jauru	1997-2006	0,66	0,03	0,69	2007-2013	0,55	0,13	0,63
Alto Paraguai	1994-2006	0,69	0,08	0,71	2007-2013	0,62	0,12	0,68
Manso	2007-2010	0,65	0,02	0,70	2011-2013	0,61	0,11	0,70
São Lourenço	2006-2009	0,57	0,14	0,75	2010-2012	0,52	0,16	0,69
Taquari	2004-2007	0,55	0,19	0,59	2008-2010	0,51	0,17	0,57
Jequitaí	2001-2006	0,64	-0,01	0,69	2006-2008	0,62	-0,05	0,67
Urucuia	1993-1995	0,58	0,09	0,64	1994-1996	0,55	0,11	0,54
Paranaíba	1985-1988	0,70	-0,01	0,81	1988-1990	0,65	-0,04	0,77
Rio Verde	2004-2008	0,68	-0,08	0,71	2009-2012	0,58	0,06	0,68
Guaporé	2010-2012	0,53	-0,11	0,66	2012-2013	0,51	-0,11	0,65
Tibagi	2008-2011	0,63	0,12	0,72	2011-2013	0,59	0,07	0,67

Fonte: Autor (2024)

Os resultados apresentados na Tabela 11 identifica o grau de eficiência das simulações dos modelos variando de 0,53 a 0,70 para calibração e 0,51 a 0,65 para o índice KGE o que representa bons valores, segundo GUPTA et al., 2009.

A modelagem hidrossedimentológica foi a base para produção de dados, os quais serão analisados para contribuição com os objetivos centrais da pesquisa. O processo de modelagem iniciou com a calibração do modelo hidrológico e após um bom ajuste foi executada a calibração para sedimentos. Sendo assim, o Apêndice B apresenta os hidrogramas de todas as bacias hidrográficas simuladas para uma primeira análise do comportamento das curvas. Vale ressaltar que essas calibrações não foram com objetivos de aprofundar nos detalhes das características de solo como composições químicas, profundidades, tipos de horizontes, texturas entre outras. Como também não buscou os tipos de culturas, bem como os processos de manejo da terra, transformação dos usos ao longo do tempo, entre outras diversas maneiras de calibrar o uso e ocupação do solo. Os parâmetros foram ajustados para cada bacia hidrográfica como visto na Tabela 9. A calibração dos modelos teve como objetivo, apenas para simular a produção de sedimento que é um dos principais dados para o desenvolvimento da pesquisa.

As análises dos hidrogramas foram com intuito de uma percepção geral da dinâmica hidrológica, especificamente da vazão, uma vez que as bacias são diferentes em termos de escala, localização e obviamente pelas características. Sendo assim, de maneira geral, as curvas de simulação acompanharam as curvas de dados observados, referente a dinâmica dos períodos úmidos e secos. Algumas bacias simularam mais as recessões da vazão, que são características do comportamento do solo, como é o caso das bacias hidrográficas do Rio Verde, Rio Tibagi, Rio São Lourenço e parte do período do Rio Urucuia. Os picos de vazão foram observados com valores mais elevados em algumas bacias hidrográficas, tais como na dos rios São Loureço, Manso e Urucuia. Esses picos, podem ser considerados valores isolados e não comprometem a resposta do modelo no contexto geral das análises. De acordo com Gupta et al. (2009) e apresentado no Quadro 3, todas simulações tiveram um bom ajuste dos modelos. Em relação à correlação de Pearson a Bacia do Rio Paranaíba obteve uma correlação forte, enquanto as demais, se inserem na classe de correlação moderada. A influência dos modelos simulados em superestimar ou subestimar as vazões tiveram um desempenho bom e muito bom com base no coeficiente pBias, como pode ser observado na Tabela 11. As bacias (Manso, Urucuia e Jequitaiá)

se destacam no comportamento do hidrograma, referente aos períodos de seca, onde as vazões são extremamente reduzidas, influenciando de modo significativo na produção de sedimentos.

Tabela 12 - Resultados das simulações para sedimentos

Bacias	Calibração				Validação			
	Período	KGE	pBias	Pearson	Período	KGE	pBias	Pearson
Jauru	1997-2006	0,66	0,03	0,69	2007-2013	0,55	0,13	0,63
Alto Paraguai	1994-2006	0,69	0,08	0,71	2007-2013	0,62	0,12	0,68
Manso	2007-2010	0,65	0,02	0,70	2011-2013	0,61	0,11	0,70
São Lourenço	2006-2009	0,57	0,14	0,75	2010-2012	0,52	0,16	0,69
Taquari	2004-2007	0,55	0,19	0,59	2008-2010	0,51	0,17	0,57
Jequitaiá	2001-2006	0,64	-0,01	0,69	2006-2008	0,62	-0,05	0,67
Urucuia	1993-1995	0,58	0,09	0,64	1994-1996	0,55	0,11	0,54
Paranaíba	1985-1988	0,69	-0,01	0,81	1988-1990	0,65	-0,04	0,77
Rio Verde	2004-2008	0,68	-0,08	0,71	2009-2012	0,58	0,06	0,68
Guaporé	2010-2012	0,52	-0,11	0,66	2012-2013	0,50	-0,11	0,65
Tibagi	2008-2011	0,63	0,12	0,72	2011-2013	0,59	0,07	0,67

Fonte: Autor (2024)

Os resultados apresentados na Tabela 11 identifica o grau de eficiência das simulações dos modelos variando de 0,52 a 0,69 para calibração e 0,50 a 0,65 para o índice KGE o que representa bons valores, segundo GUPTA et al., 2009.

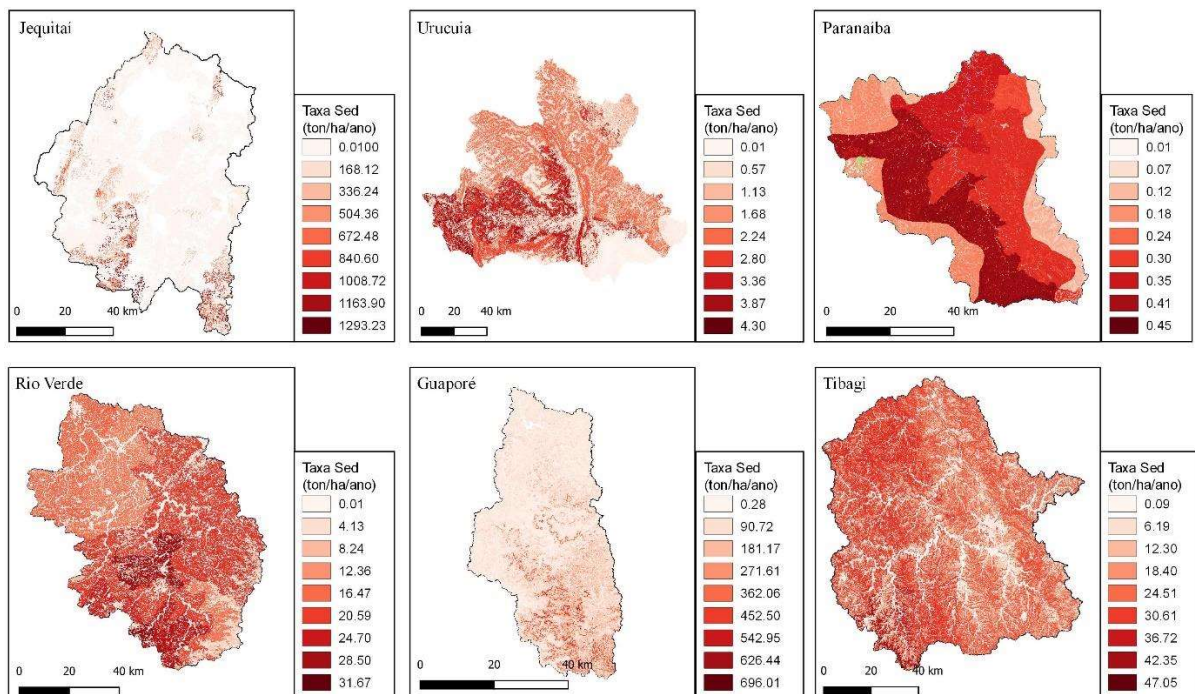
Para as simulações de sedimentos que foi calibrado simultaneamente com a vazão, os resultados dos coeficientes de eficiência mostraram um pouco abaixo em relação a vazão. Não foi uma redução significativa, mas já esperada, uma vez que os dados monitorados para sedimentos não são diários como os dados da vazão, como informado na metodologia. Ainda que valores dos coeficientes mais baixos, todos os resultados mostraram um bom ajuste, segundo Gupta et al. (2009). Vale ressaltar que valores negativos para pBias indicam que a simulação está subestimando os valores observados e positivos estão superestimando. Sendo assim, bem como para os propósitos da pesquisa, os resultados das simulações se apresentaram satisfatórios de uma maneira geral para vazão e para sedimento.

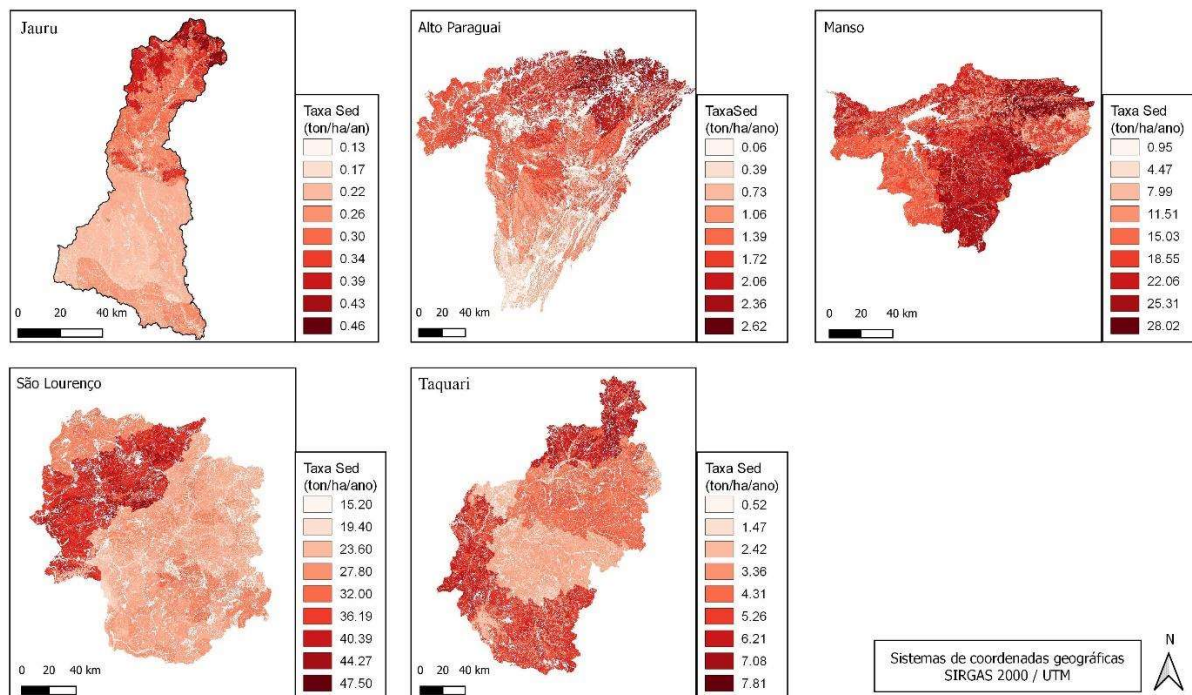
4.2. DINÂMICA DOS SEDIMENTOS

4.2.1. Produção de sedimento nas áreas de estudo

Os resultados das simulações geraram as taxas de produção de sedimento, as quais tiveram grandes variações nas escalas de valores. Sendo assim, é preciso ficar atento para não comparar as bacias pela escala de cores, pois os intervalos de valores são distintos (Figura 12). Vale ressaltar também que esse capítulo trata exclusivamente da taxa de produção de sedimento, não envolvendo nenhuma relação com a conectividade de sedimentos.

Figura 12 - Taxas de produção de sedimento para bacias simuladas

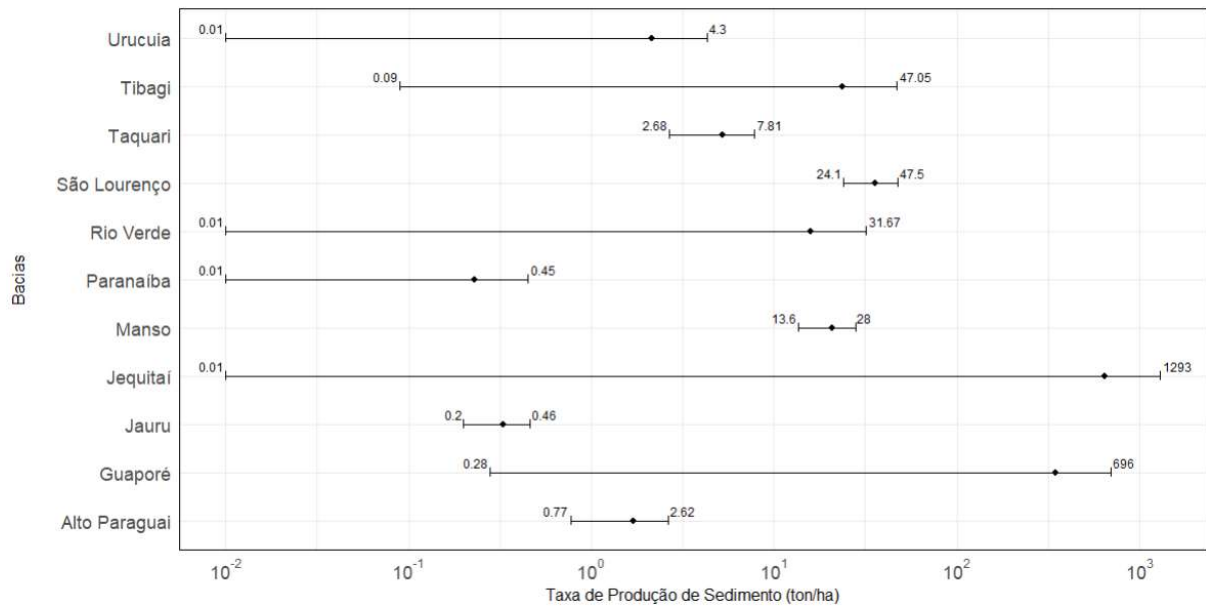




A variação geral na taxa de produção de sedimento deixa evidente que as características da bacia hidrográfica têm uma importância significativa no processo de transporte de sedimentos. As bacias hidrográficas do Rio Guaporé e do Rio Jequitáí se destacam pelas altas taxas de produção de sedimentos com valor máximo acima de $600 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Desconsiderando essas duas bacias hidrográficas, a variação máxima na taxa é de 0,45 a $47 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. A bacia hidrográfica do Rio Paranaíba e do Rio Jauru se destacam pela baixa amplitude das taxas, sendo 0,01 a 0,45 e 0,13 a $0,48 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Chama a atenção também para essas duas bacias, que as taxas ficam destacadas nos limites dos tipos de solo. Na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba os latossolos têm maiores taxas, enquanto na Bacia Hidrográfica do Rio Jauru os Argissolos têm registros com maiores taxas.

A Figura 13 apresenta um gráfico em escala logarítmica para melhor visualizar a relação das taxas de produção de sedimento entre as bacias. Pois as bacias hidrográficas do Rio Jequitáí e do Rio Guaporé possuem dados muito fora da abrangência das demais bacias. Porém, manteve os valores reais das taxas no corpo do gráfico.

Figura 13 - Intervalo de taxas de produção de sedimento – Bacias selecionadas

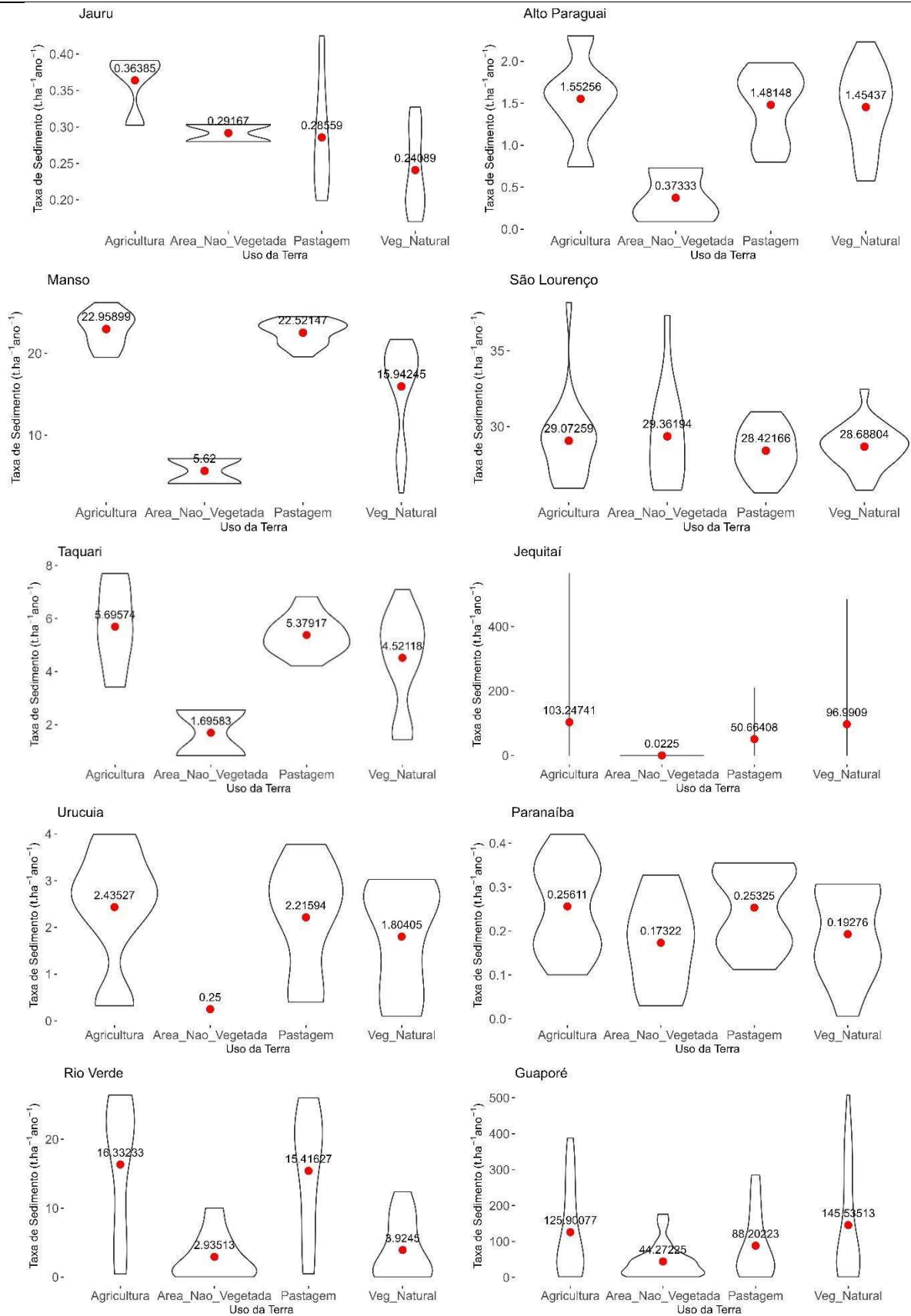


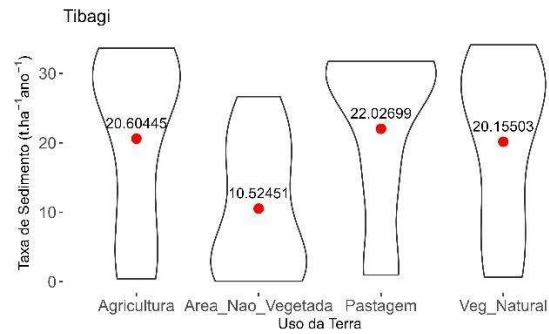
4.2.2. Distribuição das taxas de produção de sedimento

Para uma compreensão geral da distribuição das taxas de produção de sedimento, foi construído um gráfico com a unificação de todas as bacias hidrográficas no estilo *boxplot* violino. Onde a

Figura 14 representa o uso e ocupação do solo, a Figura 15 para tipos de solo e a Figura 16 para declividade.

Figura 14 - Distribuição da taxa de produção de sedimento por uso e ocupação do solo

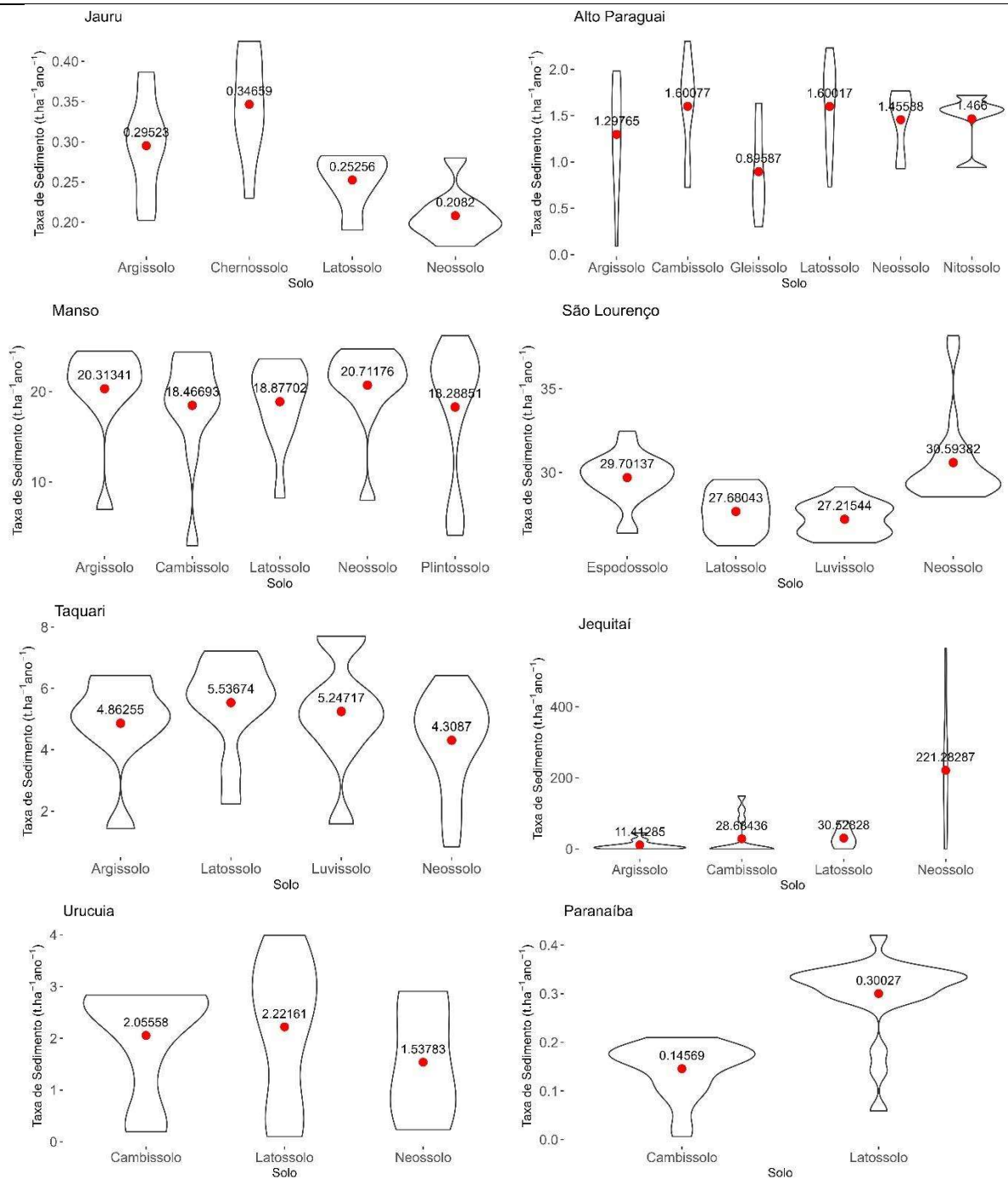


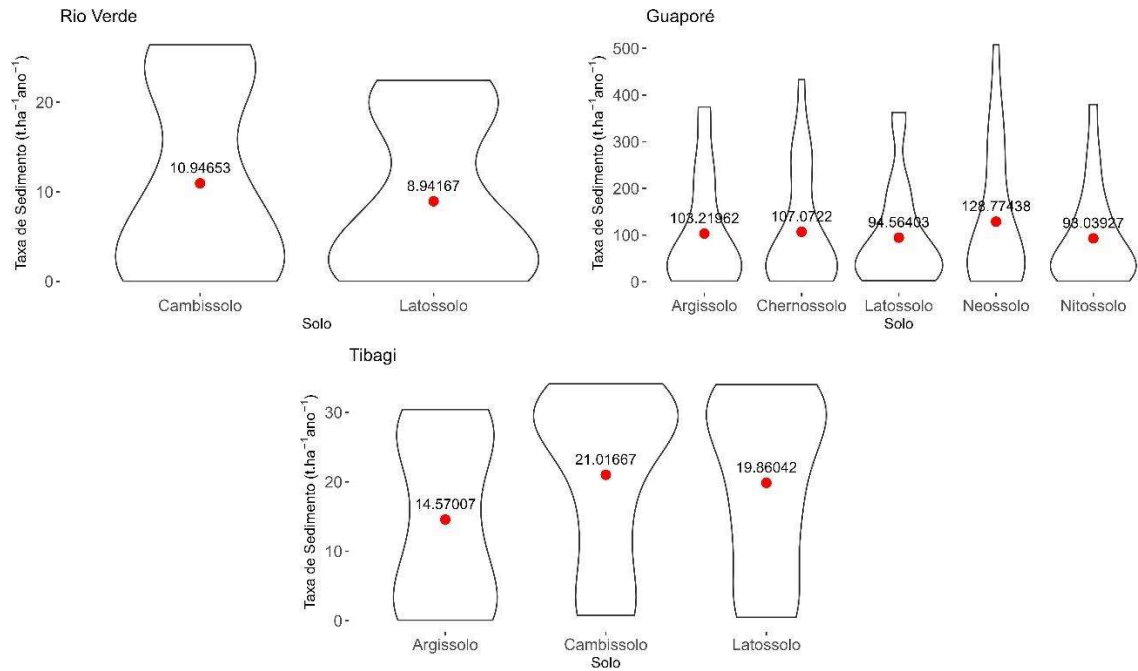


Fonte: Autor (2024)

Por esses gráficos é possível identificar que a agricultura possui maiores taxas produção/perda/geração de sedimentos, especialmente na faixa de maior densidade em todas as bacias hidrográficas. Para as áreas não vegetadas, apenas os dados da bacia hidrográfica do Rio São Lourenço registraram possíveis *outliers* e demais bacias com dados semelhantes. As bacias hidrográficas do Alto Paraguai, São Lourenço e Tibagi apresentaram uma distribuição regular para agricultura, pastagem e vegetação nativa, apesar de uma leve diferença decrescente, respectivamente. As bacias do Guaporé e Jequitaiá possuem a taxa média de sedimento maior para vegetação natural em relação à pastagem. Esse comportamento pode ser explicado pela amplitude dos dados e valores de outliers bem expressivos. Como já discutido na observação espacial para a bacia hidrográfica do Rio São Lourenço, aqui reforça que os usos do solo não explicam possíveis influências na taxa de produção de sedimento, pois as médias estão semelhantes, bem como o padrão de densidade em torno dessa média. Considerando-se a agricultura como referência de altas taxas de produção de sedimento, as bacias hidrográficas do Rio Verde, Juruá, Manso, Urucuaia, Paranaíba e Taquari tiveram as maiores diferenças, sendo: 76, 33, 31, 26, 24 e 21%, respectivamente. As bacias hidrográficas do Alto Paraguai, Jequitaiá, Tibagi e São Lourenço tiveram as menores diferenças com: 6, 6, 2 e 1%, respectivamente. Diferentemente das demais, a bacia do Guaporé apresentou a vegetação natural com média maior que a agricultura. Observando essas diferenças entre agricultura e pastagem, apenas as bacias do Juruá, Jequitaiá e Guaporé foram identificadas com valores mais altos, sendo, 22, 51 e 30%, respectivamente. Demais bacias variaram entre 0 e 6%. Para todos os gráficos, a agricultura e a pastagem estão com taxas mais elevadas e concentrações mais altas em uma pequena faixa de valores. Um comportamento atípico observado na bacia hidrográfica do Rio Jequitaiá é explicado com a média muito baixa para a classe de área não vegetada e ao mesmo tempo uma amplitude muito alta para agricultura. Com isso, faz com que a escala do gráfico seja desproporcional, conforme apresentado na figura 16.

Figura 15 - Distribuição da taxa de produção de sedimento por tipo de solo

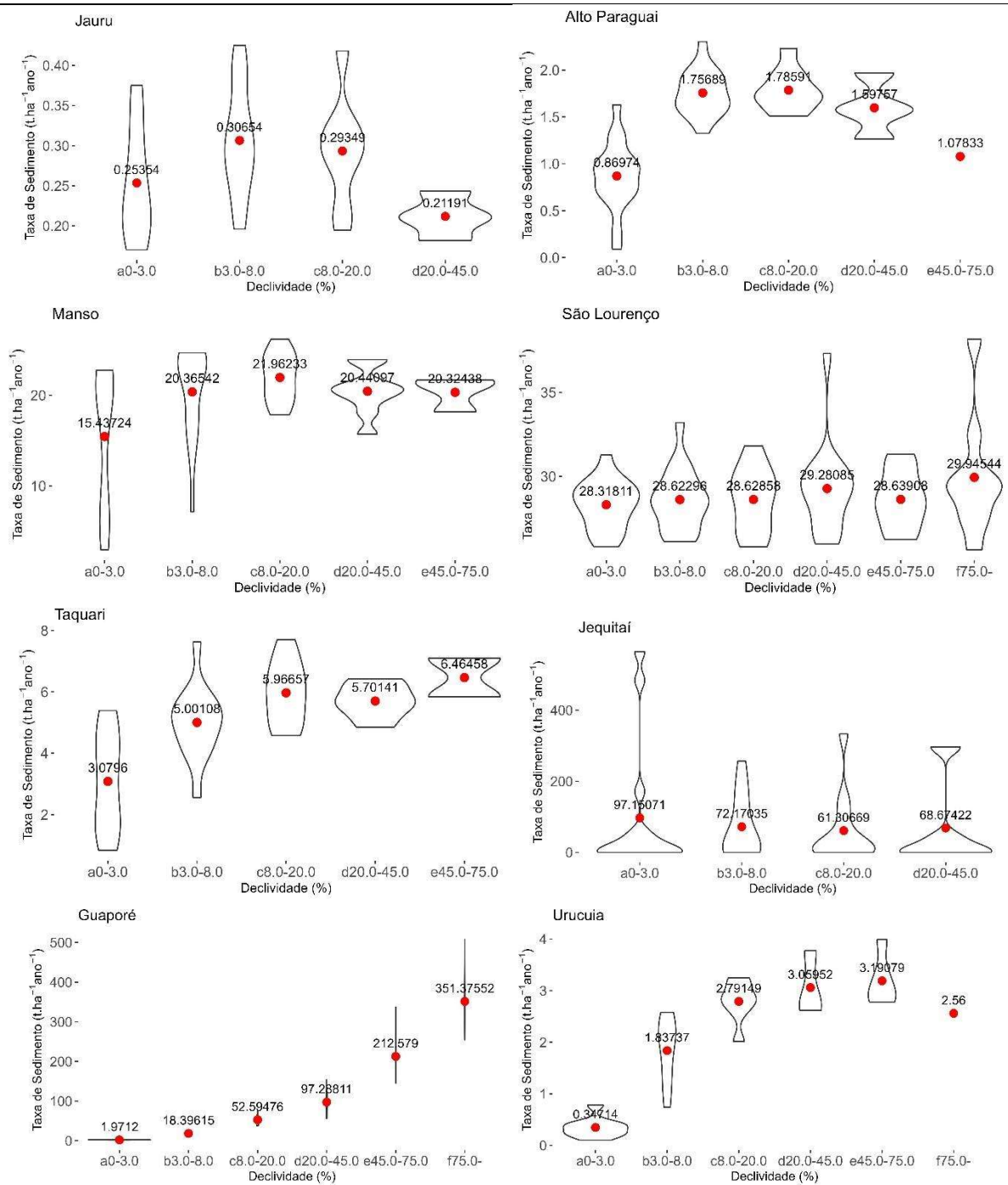


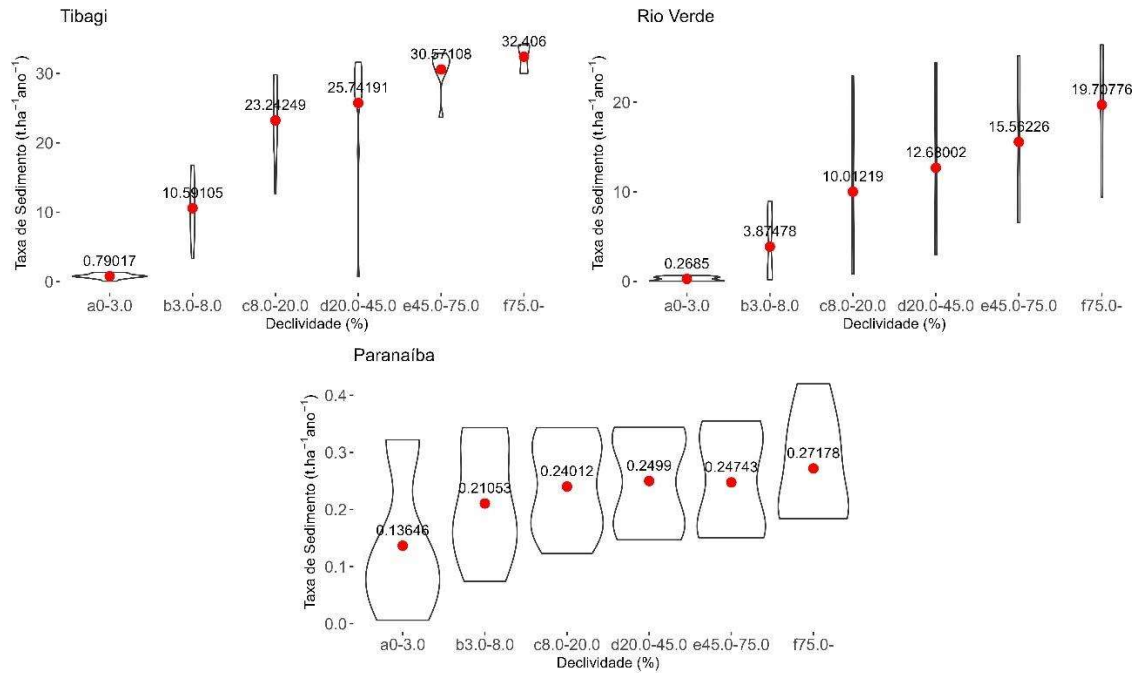


Fonte: Autor (2024)

Para as distribuições das taxas de produção de sedimento apresentadas na Figura 15 (conferir o número!) referentes aos tipos de solos, possui uma amplitude extrema entre as bacias hidrográficas, não sendo viável a análise por tipo de solo. Como observado no Latossolo, Argissolo e Neossolo, onde as médias variaram de 0,25 a 94,58 t.ha⁻¹.ano⁻¹, 0,29 a 103,21 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,2 a 221,28 t.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente. Porém, quando observado as taxas entre os tipos de solo, verificou-se uma média regular nas bacias hidrográficas dos rios Guaporé, Verde, Urucua, Taquari e Manso. Alguns destaques isolados podem ser observados. Como a bacia do Alto Paraguai que possui uma elevada amplitude na média e presença de *outliers*. As bacias hidrográficas dos rios Guaporé e Verde com densidades concentradas nas taxas mais baixas e semelhantes entre os tipos de solo. A Bacia Hidrográfica do Rio Manso também apresenta uma particularidade, onde a densidade se concentra nas taxas mais elevadas e a presença de outliers em todos os tipos de solo, sendo esses nas taxas inferiores.

Figura 16: Distribuição da taxa de produção de sedimento por declividade





Fonte: Autor (2024)

Quando a declividade é analisada isoladamente, é intuitivo pensar que a taxa de produção de sedimentos aumenta com o aumento da declividade. Esse pensamento foi confirmado por um experimento que demonstrou que a declividade influenciou direta e positivamente na produção de sedimentos (Wang *et al.*, 2023). Da mesma forma, espera-se uma maior influência da agricultura na taxa de produção de sedimentos, uma vez que o manejo do solo e sua exposição deixam o ambiente mais vulnerável ao transporte de sedimentos (Yan *et al.*, 2013); (Didoné *et al.*, 2000); Oliveira; Pinheiro (2023). Porém, vale ressaltar que a complexidade do ambiente faz com que outras variáveis possam contribuir para reforçar ou não essa teoria.

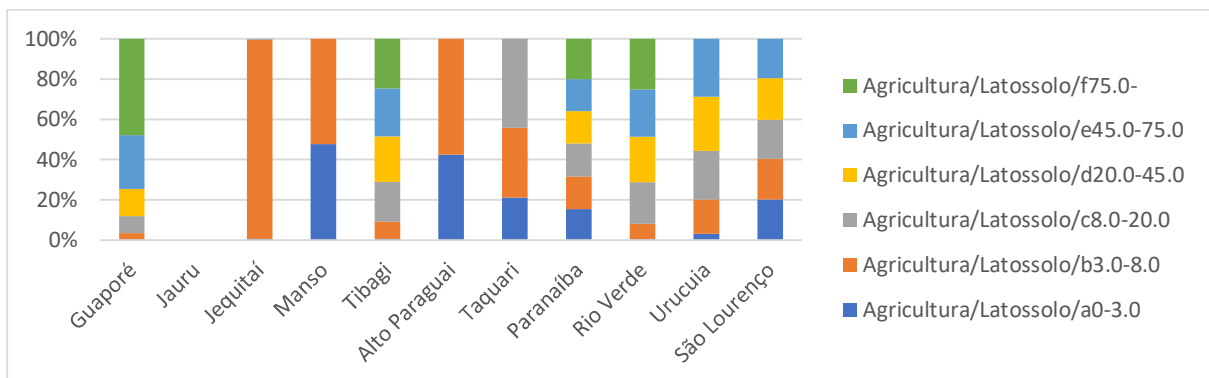
De uma maneira geral existe um aumento da taxa de produção de sedimento em função com aumento da declividade, mas com algumas ressalvas. Na Bacia Hidrográfica do Rio Juru constata-se um leve aumento da taxa de produção de sedimentos com o aumento da declividade, mas com um destaque negativo para a faixa de 8 a 45 graus. Igualmente ocorre com as bacias hidrográficas dos rios Alto Paraguai e Manso, onde a última faixa de declividade tem um comportamento atípico acima de 20 graus. Com uma regularidade nos dados, as bacias hidrográficas dos rios São Lourenço e Jequitai não acompanham a teoria do aumento da declividade com o aumento da taxa de produção de sedimentos. As bacias hidrográficas dos rios Taquari, Guaporé, Tibagi, Paranaíba, Rio Verde, possuem um aumento na taxa de produção de sedimentos com o aumento da declividade. A Bacia Hidrográfica do Rio Urucua não acompanha essa tendência, exceção apenas para declividade acima de 75%.

As análises acima discutidas precisam ser interpretadas com cautela, pois como já comentado de maneira enfática, apenas com essas três variáveis espaciais (Uso e ocupação da terra, solo e declividade), existem diversas combinações e naturalmente, diversas interações. Sendo assim, qualquer inferência para alguma afirmação incisiva, precisa levar essas combinações em consideração. De qualquer forma, a compreensão da distribuição contribuirá para outras análises.

4.2.3. Taxa de sedimento sob influência das variáveis espaciais combinadas

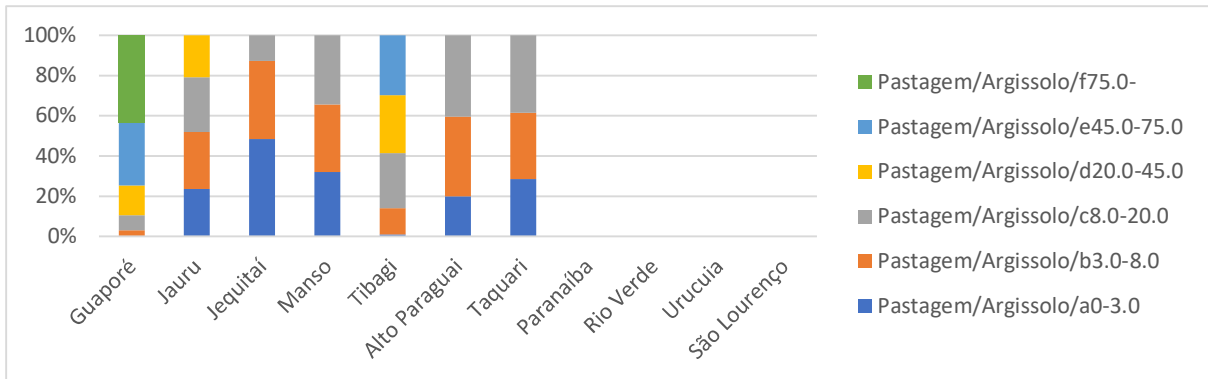
Nesta seção, foi analisado o comportamento da taxa de produção de sedimentos em relação às variáveis espaciais agrupadas. Essa abordagem permite uma compreensão detalhada das HRUs para identificar padrões de produção de sedimentos com base na integração de uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade. Ao agrupar essas variáveis, buscou-se identificar tendências e relações entre os diversos fatores que influenciam a erosão e o transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas. Essa análise detalhada permite extrair informações importantes sobre como as características das HRUs afetam a dinâmica dos sedimentos (Figura 17 a 22). A tabela completa dos resultados do agrupamento das HRUs para todas as bacias está no Apêndice D.

Figura 17 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Agricultura/Latossolo



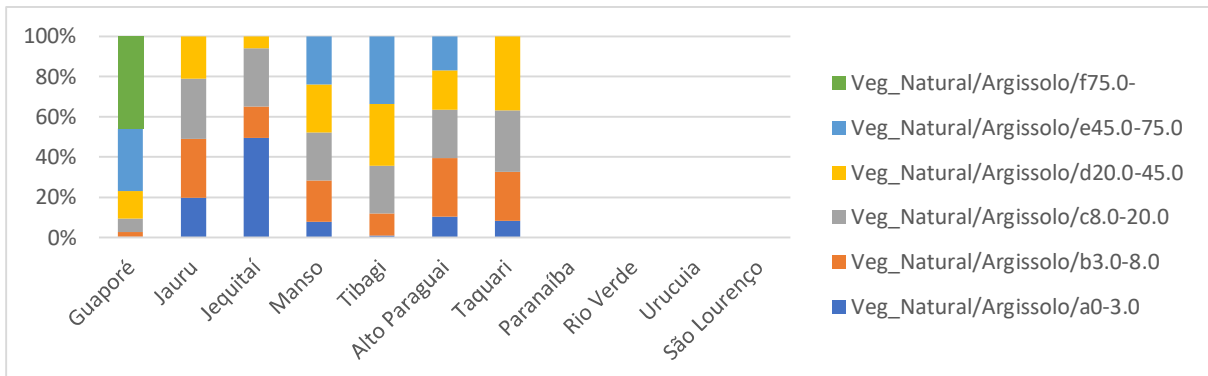
Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Pastagem/Argissolo



Fonte: Autor (2024)

Figura 19 – Taxa de produção de sedimento por HRU – Vegetação Natural/Argissolo



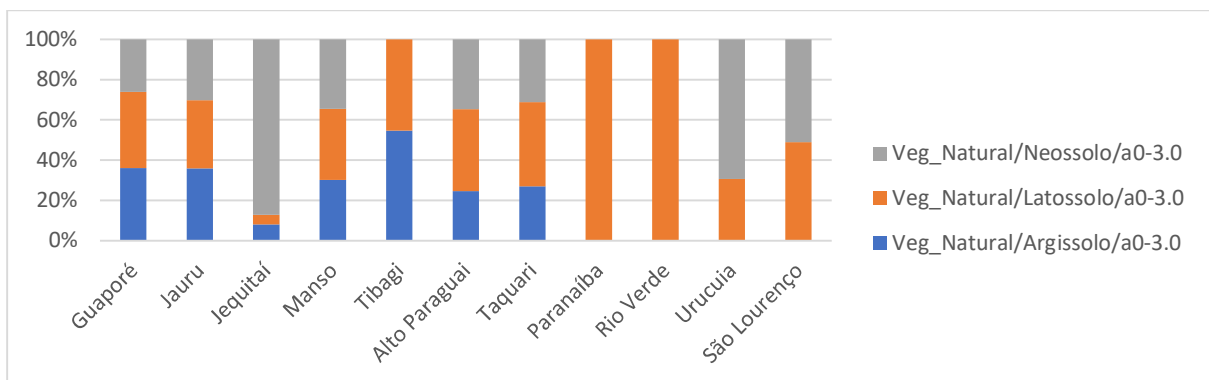
Fonte: Autor (2024)

A Figura 17 traz um filtro apenas para as classes agricultura e latossolo, observando-se o comportamento mediante à declividade. Com exceção da Bacia Hidrográfica do Rio São Lourenço, todas as outras bacias hidrográficas possuem um comportamento linear entre a taxa de produção de sedimento com o aumento da declividade. Algumas mais acentuadas como o caso da Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé e outras com menor intensidade entre as declividades como a Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. O mesmo ocorre com a pastagem sob o solo Argissolo (Figura 18), porém com uma exceção para a Bacia Hidrográfica do Rio Jequitaiá que possui uma taxa de sedimento menor na faixa de declividade de 8 a 20% do que as faixas mais suaves, como 0 a 3% e 3 a 8%. A exceção do comportamento referente a maior taxa de sedimento com o aumento da declividade, ocorre nas bacias hidrográficas dos rios Jauru, Jequitaiá, Manso e Alto Paraguai. É possível que esse comportamento atípico em mais bacias hidrográficas pode estar relacionado com as características da vegetação. Além disso, vale

ressaltar que a vegetação natural foi uma reclassificação de todas as classes de vegetação, como já apresentado na metodologia.

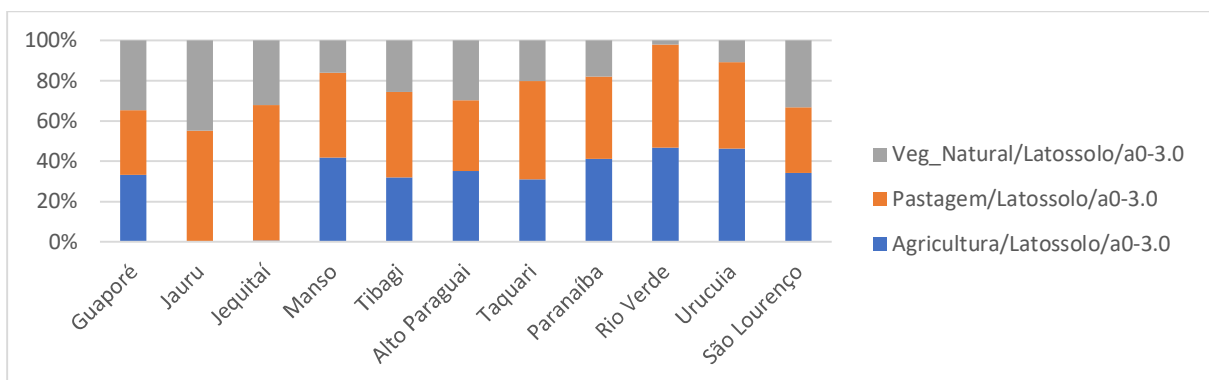
Os gráficos abaixo foram construídos considerando outros filtros para seleção, sendo: variação do solo com uso da terra e declividade constantes (Figura 20) e variação de uso da terra com solo e declividade constantes (Figura 21).

Figura 20 - Taxa de produção de sedimento por HRU – Vegetação Natural/Declividade:0 a 3%



Fonte: Autor (2024)

Figura 21 - Taxa de produção de sedimento por HRU – Latossolo/Declividade: 0 a 3%



Fonte: Autor (2024)

Os solos Neossolo por serem mais susceptíveis a erosão em comparação às categorias Latossolo e Argissolo implicam em maiores taxas de produção de sedimento nas bacias hidrográficas dos rios Jequitai, Urucua e São Lourenço. O Argissolo se destaca com a maior taxa nas bacias hidrográficas dos rios Jauru e Tibagi (Figura 20). Na comparação entre os usos e ocupação do solo, a vegetação natural está com menores taxas em todas as bacias hidrográficas, considerando-se apenas no caso da classe latossolo e com declividade de 0 a 3%. A pastagem e

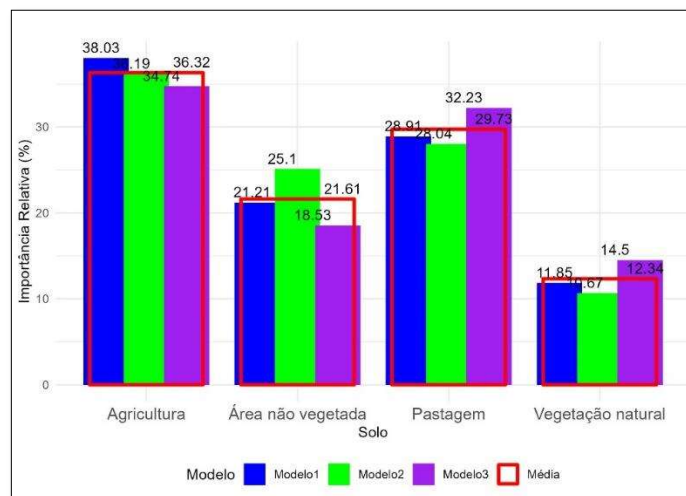
a agricultura se equilibram nas taxas de sedimentos em todas as bacias hidrográficas (Figura 21).

Essas observações são importantes, devido à interação direta que existe entre uso e ocupação da terra, solo e declividade em função da formação das HRUs, como já mencionado.

4.2.4. Importância relativa do uso e ocupação da terra, solo e declividade na taxa de sedimento

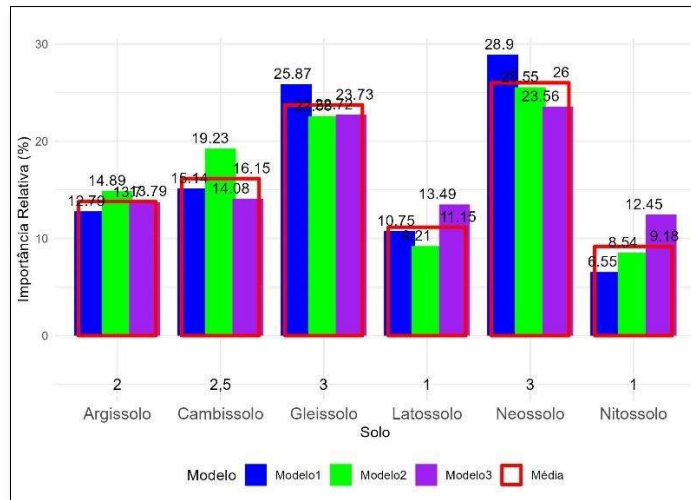
A importância relativa representa o percentual que cada classe tem em termos de influência sobre a taxa de produção de sedimento, ou o peso que ela exerce sobre a taxa. Com a execução dos modelos de RNA, foram selecionados os três melhores desempenhos para cada variável, como definido na metodologia. Assim, considerou-se o uso e ocupação da terra (Figura 22), tipos de solo (Figura 23 *Erro! Fonte de referência não encontrada.*) e declividade (Figura 24).

Figura 22 - Importância relativa das classes de uso e ocupação do solo



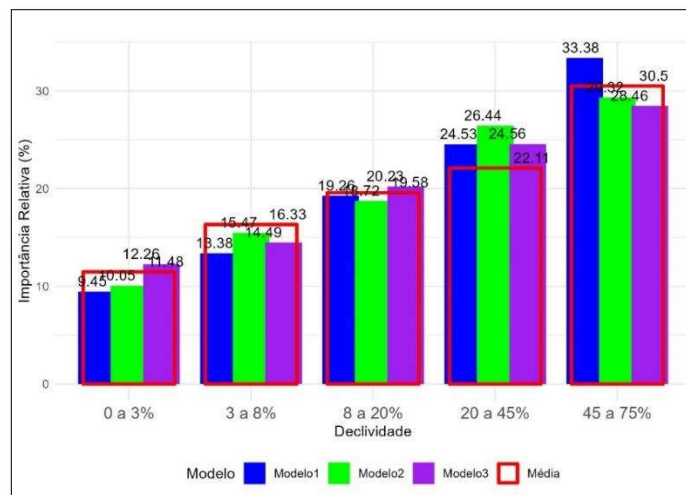
Fonte: Autor (2024)

Figura 23 - Importância relativa para classes de solo



Fonte: Autor (2024)

Figura 24 - Importância relativa para classe de declividade



Fonte: Autor (2024)

A agricultura apresentou maior peso na influência da taxa de produção de sedimento, seguido da pastagem, área não vegetada e vegetação natural (Figura 22). Este maior peso relatado por Kenea et al. (2021), onde terras agrícolas estão mais suscetíveis à erosão hídrica, especialmente por existirem mais solos expostos e facilitando a desagregação e o transporte de sedimentos. As terras agrícolas registraram aumento ao longo do tempo, enquanto o padrão oposto foi observado no uso da terra por florestas (Ma *et al.*, 2024). Um estudo na região semiárida da Austrália identificou que a pastagem produziu 63% a mais de sedimento em relação a floresta aberta (Muñoz-Robles *et al.*, 2011).

Para realizar uma breve comparação dos resultados da RNA, foi adicionada uma linha acima dos nomes dos solos na Figura 23, correspondente ao grau de vulnerabilidade do tipo de solo à erosão hídrica, conforme adaptação de Crepani et al. (2001). Esse grau de vulnerabilidade varia de 1 a 3, sendo 1 a menor vulnerabilidade. Considerando-se a variação na distribuição dos tipos de solos entre as bacias, optou-se por executar a RNA separadamente para cada bacia hidrográfica. Os resultados das RNAs para as diferentes bacias hidrográficas apresentaram comportamentos distintos. No entanto, há boa coerência na ordem de importância dos tipos de solos entre as bacias, baseada na vulnerabilidade à erosão hídrica. Embora calcular a média de cada tipo de solo não seja adequado, pois nem todos os solos estão presentes em todas as bacias hidrográficas, muitos apresentaram valores de importância relativa bastante próximos. Por exemplo, as classes Neossolo, Argissolo e Latossolo, presentes em quase todas as bacias, demonstraram coerência com a ordem de vulnerabilidade. Solos menos vulneráveis como Latossolo e Nitossolo possuíram menores importância relativa, também coerente com a referência citada.

A declividade acima de 75% não foi considerada devido à falta de representatividade nos dados disponíveis. Conforme a Figura 24 observou-se uma coerência na importância relativa com o aumento da declividade. Essa coerência foi constatada nos três modelos selecionados como mais eficientes, bem como na média dos resultados. Esses resultados reforçam as inferências apresentadas em seções anteriores, destacando que a taxa de produção de sedimento é fortemente influenciada pela declividade em relação à sua escala percentual.

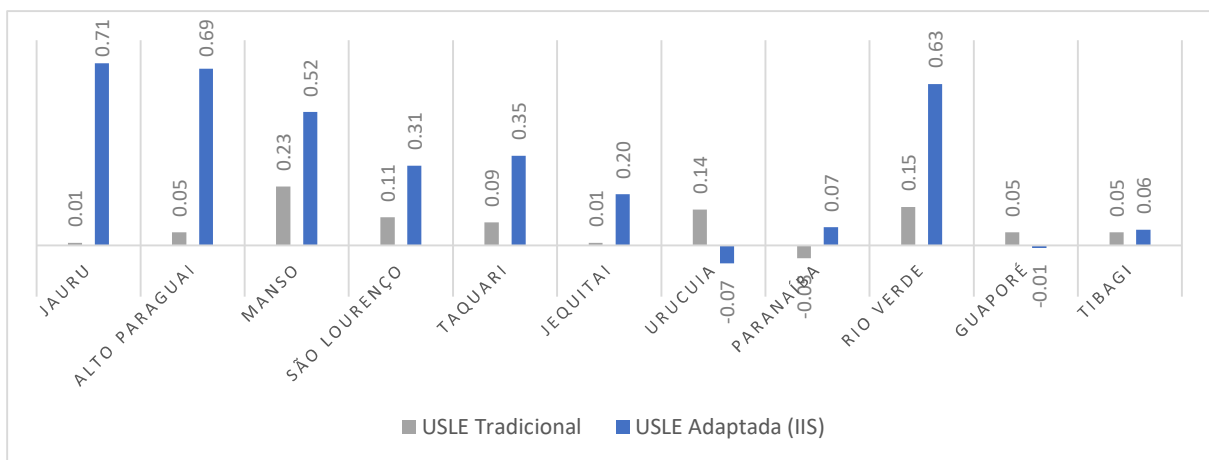
4.3. VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS

Como definido na metodologia, optou-se por validar o índice, realizando-se uma adaptação na equação universal de perda de solo (USLE). Essa adaptação foi a inclusão dos valores do IIS substituindo-se os parâmetros da USLE, com exceção da erosividade da chuva. Como a perda de solo está diretamente relacionada com a taxa de produção de sedimento, a validação do IIS foi pela correlação com a taxa. A Figura 25 apresenta a faixa dos valores do IIS para cada bacia que foi aplicada na equação USLE. A validação do IIS foi desenvolvida por meio da correlação entre o resultado da perda de solo com a taxa de produção de sedimento obtidas na modelagem (Figura 26).

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir da aplicação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) na equação de perda de solo (Universal Soil Loss Equation USLE), resultando na chamada USLE Adaptada, proposta da presente tese. O processo metodológico adotado visou validar a eficácia do IIS como um componente adicional na modelagem da erosão do solo. Para tanto, foram realizadas análises comparativas entre a USLE Adaptada e a USLE tradicional, correlacionando ambas com a taxa de produção de sedimento calculada nas modelagens hidrossedimentológicas (Figura 25).

Paralelamente, a USLE tradicional foi calculada utilizando os mesmos dados de entrada, mas sem a inclusão do IIS. A correlação entre os valores estimados pela USLE tradicional e a taxa de produção de sedimento simulada foi então realizada para fins de comparação. Esta análise comparativa permitiu avaliar as melhorias proporcionadas pela inclusão do IIS no índice de conectividade de sedimento como ponte central desse trabalho ou outras aplicações que possam ser úteis.

Figura 25 - Correlação da USLE Tradicional com USLE Adaptada

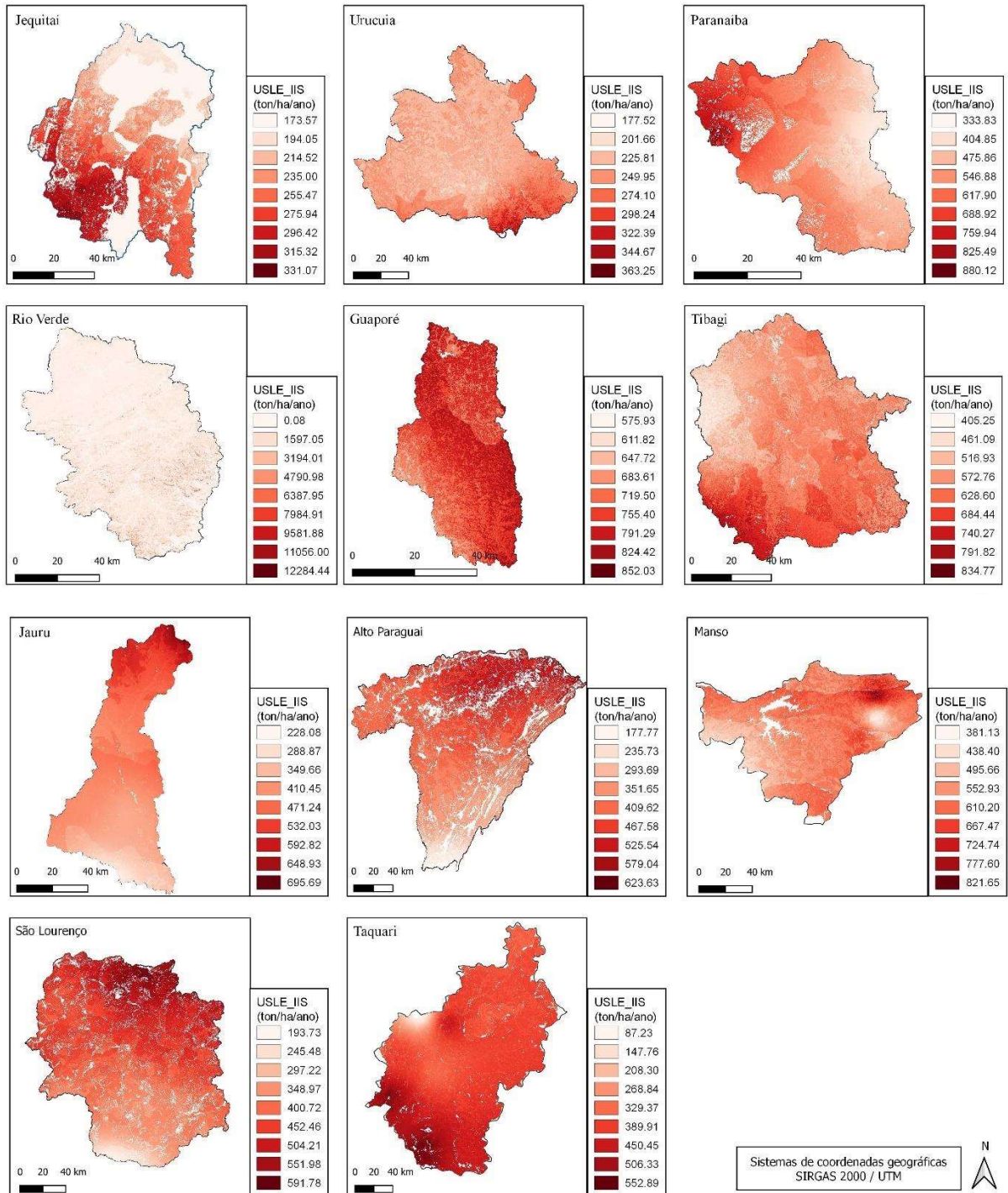


Fonte: Autor (2024)

A validação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) através da aplicação na USLE Adaptada e a subsequente comparação com a USLE tradicional proporcionaram uma compreensão significativa sobre a eficácia do IIS. Conforme ilustrado na Figura 25, apenas as bacias do Urucuiava e Guaporé apresentaram correlações da USLE Adaptada inferiores às da USLE tradicional. Pode ter a ver com o controle da declividade mais solo sobre a erosão. Mais declividade com solos menos erodíveis (neossolo). No entanto, é importante destacar que, embora essas bacias tenham exibido correlações negativas, isso não implica necessariamente uma ineficiência do IIS. Na verdade, as correlações obtidas pela USLE tradicional nessas bacias

hidrográficas também foram muito baixas. Portanto, considera-se que a validação do IIS foi satisfatória, demonstrando-se sua prontidão para aplicação em estudos futuros e práticas de gestão ambiental. Como complemento dos resultados obtidos nas correlações, a Figura 26 apresenta os mapas da USLE Adaptada de cada bacia.

Figura 26 - Resultados da USLE Adaptada com IIS

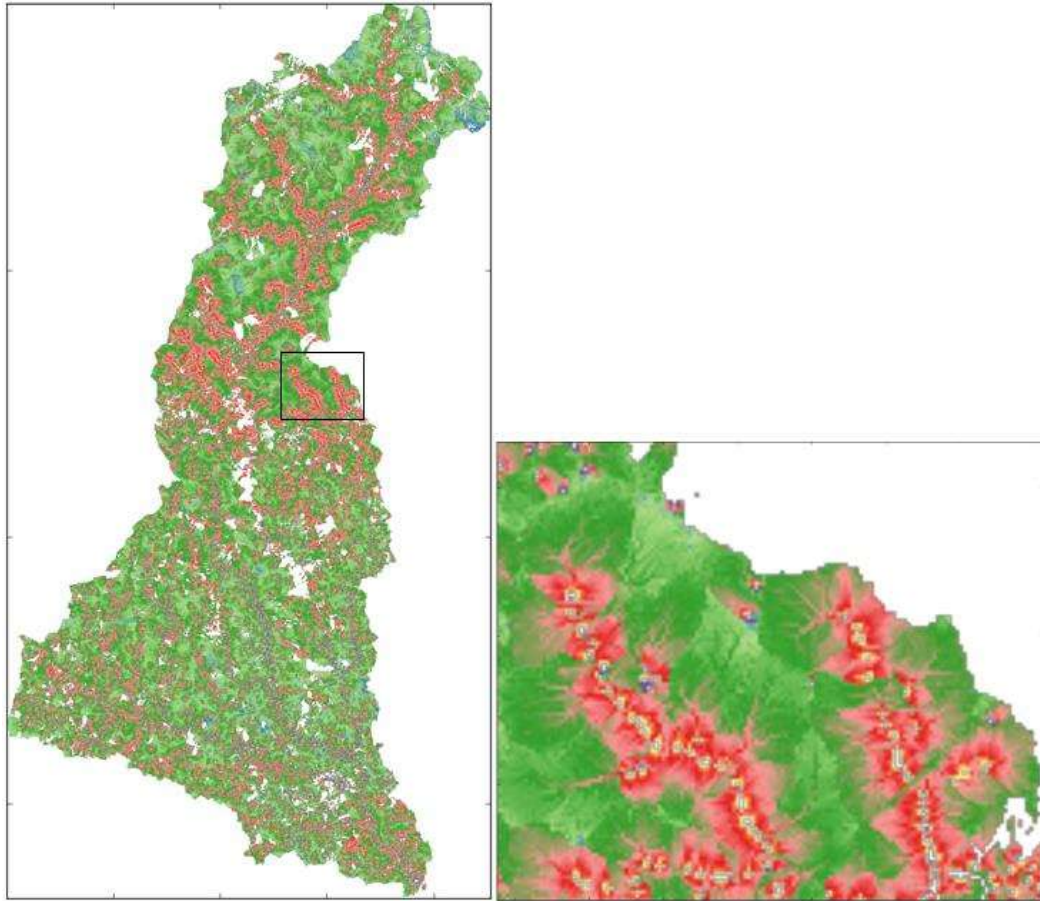


Fonte: Autor (2024)

4.4. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE IMPEDÂNCIA DE SUPERFÍCIE – IIS

A Figura 27 apresenta o resultado do índice de conectividade de sedimento obtido com o uso do software SedINConnect, com aplicação do IIS.

Figura 27 - Aplicação do Índice de Conectividade de Sedimento para a Bacia hidrográfica do Rio Jauru



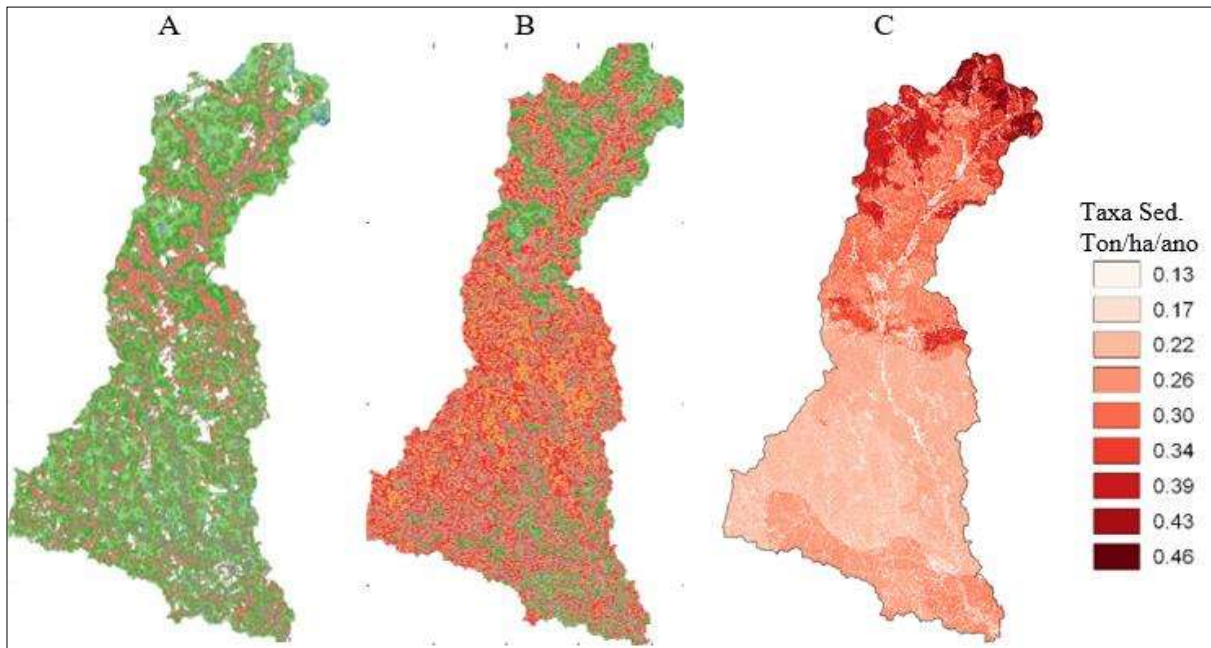
Fonte: Autor (2024)

Na Figura 27, é possível observar as áreas em vermelho, que representam as maiores probabilidades de conectividade de sedimentos. Os caminhos de fluxo são bem delimitados, especialmente ao norte da bacia hidrográfica, onde há uma maior densidade de conectividade. Essa maior densidade está associada a sub-bacias com maiores declividades, enquanto as áreas ao sul são mais planas e apresentam menor conectividade. Na mesma figura, há um recorte da bacia hidrográfica que destaca o caminho dos fluxos de sedimentos calculados pelo modelo. Os resultados das demais bacias hidrográficas podem ser visualizadas no Apêndice E.

Uma das maneiras de calcular o índice de conectividade desenvolvido por Cavalli (2013), é o uso da rugosidade de superfície como fator de influência na conexão dos sedimentos. A Figura

28 apresenta três diferentes abordagens: o índice de conectividade utilizando o IIS (A), o índice de conectividade utilizando a rugosidade da superfície (B) e a taxa de produção de sedimentos (C).

Figura 28 - Comparação dos Índices de Conectividade de sedimento com a taxa de produção de sedimento. (A) IIS, (B) Rugosidade de superfície e (C) Taxa de produção de sedimentos



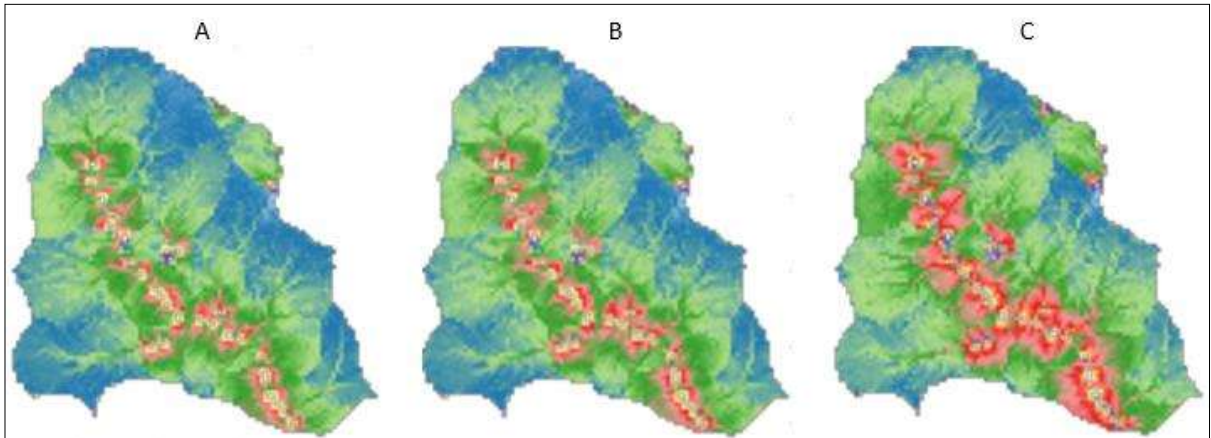
Fonte: Autor (2024)

O índice de conectividade calculado com o uso da rugosidade de superfície (Figura 28B), apresenta maiores probabilidades de conectividade em áreas com menor taxa de sedimento. Em contraste, o índice de conectividade calculado com o IIS mostra uma maior coerência com a taxa de produção de sedimentos. Observa-se também que o uso do IIS demonstrou uma conectividade com menor densidade em relação às áreas de alta probabilidade de conexão. Essa observação sugere uma melhor resposta, uma vez que os caminhos dos fluxos de sedimentos são mais delineados e menos espalhados como na Figura 28B representando a conectividade com índice de rugosidade.

Com o objetivo de avaliar o comportamento do IC em pequenas bacias hidrográficas, o índice foi calculado para uma sub-bacia hidrográfica específica da bacia hidrográfica do Rio Jauru. Essa escolha foi aleatória, com o objetivo de apenas de ampliar a imagem da conectividade. Esta sub-bacia hidrográfica faz parte da área destacada na Figura 27. A separação desta sub-bacia permitiu uma nova análise, considerando-se diferentes resoluções para o mapa de

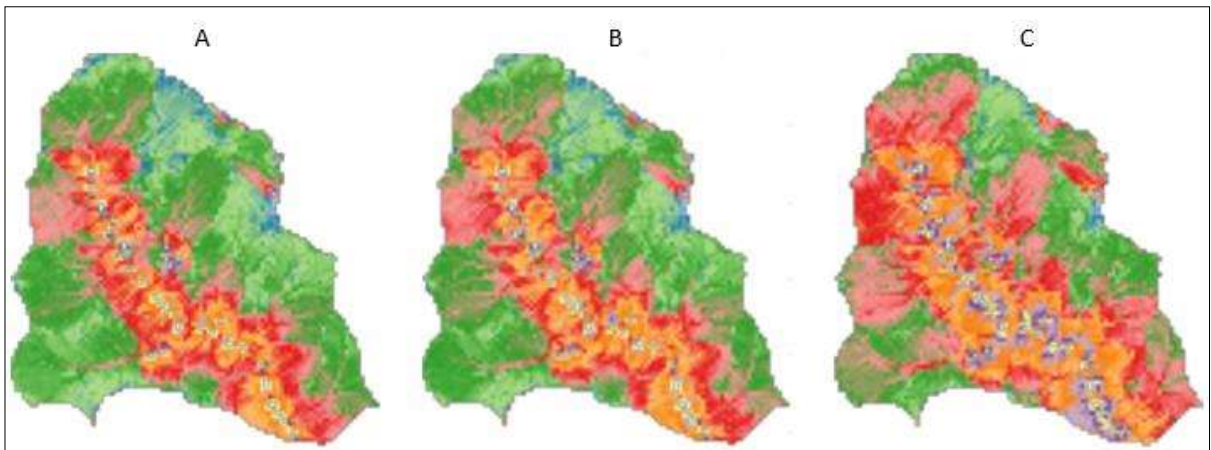
resposta. O software padrão utiliza uma resolução espacial de 2,5 metros, que foi mantida para obter maior detalhamento. Além disso, o modelo foi executado com resoluções espaciais de 90 metros, para um exemplo de menor resolução, e 30 metros, que foi a resolução espacial adotada em todos os arquivos rasters do projeto.

Figura 29 - Índice de conectividade com IIS com resolução de 90m (A), 30m (B) e 2,5m (C)



Fonte: Autor (2024)

Figura 30 - Índice de conectividade com IR com resolução de 90m (A), 30m(B) e 2,5m (C)



Fonte: Autor (2024)

Para os dois tipos de processamento, um utilizando o IIS e outro utilizando a rugosidade de superfície (IR) como parâmetro de conectividade, os resultados demonstraram um aumento na densidade da conectividade com a melhora da resolução espacial. Observa-se um espalhamento dos maiores valores de conectividade, representados pelos tons de vermelho. Essa mudança na resposta do índice de conectividade sugere que as resoluções espaciais dos mapas de entrada e

saída devem ser consistentes, pois a conectividade não deveria ser alterada apenas em função da variação de resolução espacial.

5. CONCLUSÕES

A modelagem hidrossedimentológica aplicada nessa tese demonstrou ser um recurso técnico eficaz para mensurar a dinâmica e as taxas de produção de sedimentos, servindo como a principal base de dados para a proposição deste estudo. Os índices de eficiência dos modelos hidrossedimentológicos obtidos variaram de 0,55 a 0,70 para calibração e de 0,51 a 0,65 para validação de vazão, e de 0,52 a 0,69 para calibração e de 0,50 a 0,65 para validação de sedimento. De acordo com as referências citadas na seção de resultados, esses valores são considerados bons. A variação nas taxas de produção de sedimentos, que oscilaram entre 0,01 a 1.293 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ nas onze bacias simuladas, evidencia as diferentes características das áreas estudadas. Esse resultado é positivo para um dos principais objetivos deste estudo, que é a identificação da sensibilidade das classes das variáveis espaciais de uso e ocupação da terra, solo e declividade.

A análise de padrões na dinâmica dos sedimentos revelou que a taxa de produção de sedimentos é influenciada por variáveis espaciais como uso da terra, tipo de solo e declividade. Em geral, a agricultura apresentou as maiores taxas de produção de sedimentos, seguida pela pastagem e pela vegetação natural. A produção de sedimentos foi maior com o aumento da declividade, embora nem sempre de forma linear. Essas observações foram feitas de maneira isolada, embora existam interações entre elas. Esses comportamentos também foram observados por meio das distribuições, que revelou a densidade das taxas de produção de sedimento próxima da média, o que reforçou essas inferências.

A análise detalhada do comportamento da taxa de produção de sedimentos em relação às variáveis espaciais agrupadas revelou elementos significativos sobre a dinâmica dos sedimentos nas bacias hidrográficas estudadas. A integração de uso e ocupação da terra, tipo de solo e declividade permitiu identificar padrões e tendências que influenciam a erosão e o transporte de sedimentos. Os resultados mostraram que, de maneira geral, há uma relação linear entre a taxa de produção de sedimentos e o aumento da declividade, com exceções das bacias hidrográficas Jequitaí e São Lourenço. A Bacia Hidrográfica do Rio São Lourenço apresentou um comportamento atípico, assim como as bacias dos rios Jauru, Jequitaí, Manso e Alto Paraguai, onde a taxa de sedimentos não aumentou linearmente com a declividade. Esses comportamentos atípicos podem estar relacionados às características específicas da vegetação dessas regiões. Ou para áreas que não continham material para serem desprendidos e transportados. A análise também destacou que o solo Neossolo, por ser mais vulnerável,

apresentou maiores taxas de produção de sedimentos nas bacias dos rios Jequitai, Urucua e São Lourenço. Em contraste, o Argissolo teve a maior taxa nas bacias dos rios Jauru e Tibagi. A vegetação natural, reclassificada de todas as classes de vegetação, mostrou as menores taxas de produção de sedimentos em todas as bacias, exceto na classe Latossolo com declividade de 0 a 3%. A pastagem e a agricultura apresentaram taxas de sedimentos equilibradas em todas as bacias.

Com a identificação das taxas de produção de sedimentos em função das variáveis espaciais, foi calculada a importância relativa das classes dessas variáveis espaciais, por meio da utilização das Redes Neurais Artificiais (RNA), como um dos principais elementos do objetivo central desse estudo. Os resultados dessa etapa destacaram a influência significativa do uso da terra, tipo de solo e declividade na taxa de produção de sedimentos nas bacias hidrográficas analisadas. A agricultura foi identificada como a principal responsável pelo aumento da produção de sedimentos, seguida pela pastagem, áreas não vegetadas e vegetação natural. A análise das Redes Neurais Artificiais (RNAs) revelou comportamentos distintos entre as diferentes bacias hidrográficas, mas mostrou coerência na ordem de importância dos tipos de solos baseada na vulnerabilidade à erosão hídrica, conforme adaptação de Crepani et al. (2001). Solos como Neossolo, Argissolo e Latossolo, presentes em quase todas as bacias, demonstraram uma ordem de importância relativa que reflete sua vulnerabilidade. Solos menos vulneráveis, como Latossolo e Nitossolo, apresentaram menor importância relativa, corroborando as referências citadas. A declividade mostrou-se um fator crucial na produção de sedimentos, com uma relação clara entre o aumento da declividade e a taxa de produção de sedimentos. No entanto, declividades acima de 75% não foram consideradas devido à falta de representatividade nos dados disponíveis. A coerência na importância relativa da declividade foi observada nos três modelos selecionados como mais eficientes, bem como na média dos resultados, reforçando as inferências apresentadas em seções anteriores.

A validação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) por meio da adaptação da equação universal de perda de solo (USLE) demonstrou resultados promissores na modelagem da erosão do solo. A metodologia adotada, que incluiu a substituição de parâmetros da USLE pelos valores do IIS, exceto pela erosividade da chuva, permitiu uma análise comparativa robusta entre a USLE Adaptada e a USLE tradicional.

Os resultados indicam que a inclusão do IIS na USLE Adaptada proporcionou uma correlação significativa (9 das 11 bacias com resultados melhores) com a taxa de produção de sedimento,

validando a eficácia do IIS como um componente adicional na modelagem hidrossedimentológica. A análise comparativa revelou que, com exceção das bacias do Urucua e Guaporé, a USLE Adaptada, ou seja, nova proposta da tese, apresentou correlações superiores ou equivalentes às da USLE tradicional. Mesmo nas bacias onde a USLE Adaptada apresentou correlações inferiores, as correlações obtidas pela USLE tradicional também foram muito baixas, o que não compromete a eficiência do IIS.

A validação do IIS foi considerada satisfatória, demonstrando sua prontidão para aplicação em estudos futuros e práticas de gestão ambiental. Os mapas gerados pela USLE Adaptada para cada bacia, apresentados anteriormente na Figura 27, complementam os resultados das correlações e oferecem uma visualização clara da distribuição espacial da perda de solo.

Sendo assim, a validação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) através da USLE Adaptada reforça a sua aplicabilidade e eficácia, abrindo caminho para sua utilização em diversos contextos de gestão ambiental e conservação do solo. A metodologia proposta e os resultados obtidos neste estudo contribuem significativamente para o corpo de conhecimento existente, oferecendo novas perspectivas e ferramentas para a modelagem da erosão do solo e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Porém, vale ressaltar que a validação do IIS nesse estudo foi exclusivamente para a aplicação no índice de conectividade de sedimentos.

A aplicação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) como parâmetro para o cálculo do Índice de Conectividade de Sedimento (IC) demonstrou pontos importantes sobre a dinâmica de transporte de sedimentos em bacias hidrográficas. Utilizando o software desenvolvido por Cavalli (2013), foram comparados dois métodos: um utilizando o IIS e outro utilizando a rugosidade de superfície (IR). Os resultados indicam que o IC calculado com o IIS apresenta uma maior coerência com a taxa de produção de sedimentos, demonstrando caminhos de fluxo de sedimentos mais bem delineados e menos dispersos. Em contraste, o IC calculado com a rugosidade de superfície mostrou maiores probabilidades de conectividade em áreas com menor taxa de sedimento, sugerindo uma dispersão maior dos caminhos de fluxo.

Para avaliar o comportamento do IC em diferentes resoluções espaciais, foram realizadas simulações em uma sub-bacia hidrográfica específica da Bacia do Rio Jauru, utilizando resoluções de 2,5 metros, 30 metros e 90 metros. Os resultados mostraram que, tanto para o IIS quanto para o IR, a densidade da conectividade aumentou com a melhora da resolução espacial. No entanto, observou-se um espalhamento dos maiores valores de conectividade com a variação da resolução, representados pelos tons de vermelho nos mapas.

Esses resultados obtidos sugerem que a resolução espacial dos mapas de entrada e saída deve ser consistente e a melhor possível para garantir a precisão dos resultados. A variação na resolução espacial não deve alterar significativamente a conectividade, o que indica a necessidade de um cuidado especial na escolha da resolução adequada para os estudos de conectividade de sedimentos.

Com isso, a utilização do IIS como parâmetro de conectividade mostrou-se mais eficaz e coerente com a taxa de produção de sedimentos em comparação com a rugosidade de superfície. Além disso, a consistência na resolução espacial é crucial para a precisão dos resultados, destacando a importância de uma abordagem cuidadosa na modelagem da conectividade de sedimentos. Esses resultados também fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas na gestão de bacias hidrográficas e conservação do solo.

Contudo, este estudo não encerra o assunto, mas, na verdade, abre novas discussões para futuras pesquisas. Por exemplo, a aplicação do Índice de Impedância de Superfície (IIS) desenvolvido aqui pode ser explorada em outros índices de conectividade de sedimentos. Além disso, pode-se considerar a inclusão de novos parâmetros para a identificação da sensibilidade na taxa de sedimento, como métricas de paisagem e morfometria de bacia para compor o IIS.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- ARNOLD, J. G. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentaion**. Texas: GRASSLAND, SOIL AND WATER RESEARCH LABORATORY ◦ AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2012.
- ARNOLD, J. G. *et al.* **Soil and Water Assessment Tools - SWAT Model**. Texas: [s. n.], 2012.
- ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- BAARTMAN, Jantiene E.M. *et al.* Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 38, n. 12, p. 1457–1471, 2013.
- BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 4ªed. Belo Horizonte: UFMG, 2018.
- BARKEY, R. *et al.* Climate change impacts related flood hazard to communities around Bantimurung Bulusaraung National Park, Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 235, n. 1, 2019.
- BERTI, Matteo; CORSINI, Alessandro; DAEHNE, Alexander. Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides. **Geomorphology**, [s. l.], v. 182, p. 1–18, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.022>.
- BERTOLANI, Fernando Cesar *et al.* Spatial variability of soil surface roughness measured by pin and laser reliefmeters. **Bragantia**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 227–234, 2000.
- BEZERRA, Ivanhoe; SILVA, Tarciso. Análise de riscos à perda de solo para diferentes cenários de uso e ocupação na bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 195–204, 2014.
- BORSELLI, Lorenzo; CASSI, Paola; TORRI, Dino. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena**, [s. l.], v. 75, n. 3, p. 268–277, 2008.

- BRACKEN, L. J. *et al.* Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 119, p. 17–34, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>.
- CALSAMIGLIA, Aleix *et al.* Changes in soil quality and hydrological connectivity caused by the abandonment of terraces in a Mediterranean burned catchment. **Forests**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. 1–20, 2017.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ªed. Rio de Janeiro: Interciência, Editora, 2008.
- CAVALLI, Marco *et al.* Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, [s. l.], v. 188, p. 31–41, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>.
- CAVALLI, Marco *et al.* The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. **Catena**, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 249–260, 2008.
- CAVALLI, M.; MARCHI, L. Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. **Natural Hazards and Earth System Science**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 323–333, 2008.
- CFSR, Climate Forecast System Reanalysis. **Global Weather Data for SWAT**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://globalweather.tamu.edu/>. Acesso em: 10 out. 2021.
- CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 9ªed. São Paulo: Blucher, 2019.
- CISLAGHI, Alessio; BISCHETTI, Gian Battista. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 652, p. 1168–1186, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.318>.
- COULTHARD, Tom J.; VAN DE WIEL, Marco J. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes. **Geomorphology**, [s. l.], v. 277, p. 265–281, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.027>.
- CREMA, Stefano; CAVALLI, Marco. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. **Computers and Geosciences**, [s. l.], v. 111, p. 39–45, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>.

DI STEFANO, C.; FERRO, V. Assessing sediment connectivity in dendritic and parallel calanchi systems. **Catena**, [s. l.], v. 172, n. January 2018, p. 647–654, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.023>.

DIDONÉ, Elizeu Jonas *et al.* Monitoramento Do Impacto Da Agricultura Conservacionista No Comportamento Hidrossedimentológico Em Duas Grandes Bacias Rurais. [s. l.], p. 1–18, 2000.

FRESSARD, M.; COSSART, E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: Development and application in the Mercurey vineyards (France). **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 651, p. 2566–2584, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.158>.

GAY, Aurore *et al.* Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 280–293, 2016.

GRAUSO, Sergio; PASANISI, Francesco; TEBANO, Carlo. Assessment of a simplified connectivity index and specific sediment potential in river basins by means of geomorphometric tools. **Geosciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 2, 2018.

GUPTA, Hoshin V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

HECKMANN, Tobias *et al.* Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 187, n. September, p. 77–108, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>.

JAIN, SANJAY K.; KUMAR, SUDHIR; VARGHESE, JOSE. Estimation of Soil Erosion for a Himalayan Watershed using GIS technique. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 15, p. 41–54, 2001.

KALANTARI, Zahra *et al.* Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 581–582, p. 386–398, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.147>.

KINDLMANN, Pavel; BUREL, Françoise. Connectivity measures: A review. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 23, n. 8, p. 879–890, 2008.

- LAMARRE, Hélène; ROY, André G. The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system. **Geomorphology**, [s. l.], v. 99, n. 1–4, p. 270–279, 2008.
- LIEW, M W Van; ARNOLD, J G; GARBRECHT, J D. H s a w : c b t m. [s. l.], v. 46, n. 6, p. 1539–1551, 2003.
- LIU, Yu; FU, Bojie. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 66, p. 259–268, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.055>.
- LLENA, M. *et al.* The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 660, p. 899–912, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.479>.
- LÓPEZ-VICENTE, Manuel; BEN-SALEM, Nahed. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 651, p. 179–191, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.170>.
- LÓPEZ, Raúl *et al.* Downstream changes of particle entrainment in a hydropeaked river. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 745, p. 140952, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140952>.
- LU, Hua; MORAN, C. J.; PROSSER, Ian P. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 1297–1308, 2006.
- MA, Tianle *et al.* Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years. **Geoderma**, [s. l.], v. 443, n. March, p. 116837, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116837>.
- MAGALHÃES JÚNIOR, Antônio Pereira; BARROS, Luiz Fernando de Paula. **Hidrogeomorfologia, formas, processos e registros sedimentares fluviais**. 1ªed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020.
- MAHONEY, David Tyler; FOX, James Forrest; AL AAMERY, Nabil. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 561, p. 862–883, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.034>.

MAPBIOMAS, Projeto. **Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 maio 2023.

MASSELINK, R. *et al.* Assessing hillslope-channel connectivity in an agricultural catchment using rare-earth oxide tracers and random forests models. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 17, 2017.

MCDONALD, Spencer *et al.* Web-based decision support system tools: The Soil and Water Assessment Tool Online visualization and analyses (SWATOnline) and NASA earth observation data downloading and reformatting tool (NASAaccess). **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 120, n. December 2018, p. 104499, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104499>.

MESSENZEHL, Karoline; HOFFMANN, Thomas; DIKAU, Richard. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschuns, Swiss National Park - linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. **Geomorphology**, [s. l.], v. 221, p. 215–229, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>.

MINELLA, Jean P G; MERTEN, Gustavo H; CLARKE, Robin T. Método “ fingerprinting ” para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural Fingerprinting method for identification of sediment sources in a rural watershed. [s. l.], n. 51, p. 633–638, 2009.

MISHRA, Kanchan *et al.* Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 661, p. 251–265, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.118>.

MOORE, D S; MCCABE, G P; CRAIG, B A. **Introduction to the Practice of Statistics**. [S. l.]: W. H. Freeman, 2014. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=pX1_AwAAQBAJ.

MUÑOZ-ROBLES, C. *et al.* Soil hydrological and erosional responses in areas of woody encroachment, pasture and woodland in semi-arid Australia. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 75, n. 10, p. 936–945, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.008>.

NAJAFI, Saeed *et al.* Sediment connectivity concepts and approaches. **Catena**, [s. l.], v. 196, n. August 2020, p. 104880, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>.

NASCIMENTO;, Ednilson Roberto do; NETO;, José Manoel dos Reis; REBELO, Antônio Manuel de Almeida. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONCENTRAÇÃO DA RUGOSIDADE DO RELEVO NO ENTENDIMENTO DO NÍVEL DE EXPOSIÇÃO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS OCORRENTES NA REGIÃO NORTE DO MUNICÍPIO DE CURITIBA , PR. [s. l.], v. 2, p. 61–68, 2010.

NEARING, Mark A. *et al.* Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 77–84, 2017.

OLIVEIRA, Warlen Librelon De; PINHEIRO, Adilson. RELAÇÕES ENTRE PAISAGEM E VAZÃO NAS BACIAS DO ALTO RIO. **XXV Simpósio Brasileiro de recursos hídricos**, [s. l.], v. 0, p. 1–10, 2023.

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; WENDLAND, Edson; NEARING, Mark A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, [s. l.], v. 100, p. 139–147, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>.

ORTÍZ-RODRÍGUEZ, A. J.; BORSELLI, L.; SAROCCHI, D. Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. **Catena**, [s. l.], v. 157, n. January, p. 90–111, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.009>.

PANACHUKI, Elói *et al.* Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira Ci. Solo**, [s. l.], n. 1, p. 443–451, 2010.

PANAGOS, Panos *et al.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 48, p. 38–50, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>.

PERRY, Chris; TAYLOR, Kevin. Book Reviews Environmental Sedimentology. [s. l.], v. 7, n. 6, p. 460, 2007.

PERSICHILLO, Maria Giuseppina *et al.* The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. **Catena**, [s. l.], v. 160, n. September 2017, p. 261–274, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.025>.

PRINGLE, Catherine M. Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: A Global Perspective. **Ecological Applications**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 981, 2001.

QGIS GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em:

www.qgis.org.

R. Viena - Austria: A language and environment for statistical computing. Foundation for Statistical Computing, 2021.

RAJIB, Mohammad Adnan *et al.* SWATShare - A web platform for collaborative research and education through online sharing, simulation and visualization of SWAT models.

Environmental Modelling and Software, [s. l.], v. 75, p. 498–512, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.032>.

RENARD, K. *et al.* **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. [S. l.]: . Agriculture Handbook, vol. 703. U.S. Department of Agriculture, 1997.

RENARD, Kenneth G.; FREIMUND, Jeremy R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 157, n. 1–4, p. 287–306, 1994.

RSTUDIO TEAM. Boston: RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, 2020. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>.

SAMPAIO, Marcos Vinícios Pereira. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente – ES**. 2008. 174 f. - Tese de Doutorado. IGC/UFMG. Belo Horizonte, [s. l.], 2008.

SPERLING, Marcos von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Estudo e modelagem da qualidade da água de rios**. Ed. 1 Vol.ed. Belo Horizonte: [s. n.], 2007.

TOBIAS, Heckmann; WOLFGANG, Schwanghart. Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment — Exploring sediment cascades using graph theory. **Elsevier**, [s. l.], v. 182, p. 89–103, 2013.

TREVISANI, Sebastiano; CAVALLI, Marco. Topography-based flow-directional roughness: Potential and challenges. **Earth Surface Dynamics**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 343–358, 2016.

TUCCI, Carlos E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª Ediçãoed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TURNBULL, Laura; WAINWRIGHT, John. From structure to function: Understanding shrub

encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 98, n. March 2018, p. 608–618, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.039>.

VALERIANO, M M; ROSSETTI, D F; SANTOS, M C. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 1–14, 2010. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>.

WANG, Tian *et al.* Establishment of a sediment transport capacity equation on loessal slope via experimental investigation. **International Journal of Sediment Research**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 166–174, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.10.001>.

WISCHMEIER, Willian H.; SMITH, Da Da. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: Science and Education Administration, 1978.

WOHL, Ellen. Particle dynamics: The continuum of bedrock to alluvial river segments. **Geomorphology**, [s. l.], v. 241, p. 192–208, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.014>.

YAN, B. *et al.* Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 484, p. 26–37, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>.

ZANANDREA, Franciele *et al.* Conectividade Dos Sedimentos: Conceitos, Princípios E Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 0–3, 2020.

ZANANDREA, Franciele; KOBİYAMA, Masato; MICHEL, Gean Paulo. Conectividade Hidrossedimentológica: Uma Abordagem Conceitual. [s. l.], p. 1–8, 2017.

ZANANDREA, Franciele; MICHEL, Gean Paulo; KOBİYAMA, Masato. Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment. **Geomorphology**, [s. l.], v. 351, p. 106962, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106962>.

ZETTAM, Amin. **Transfert des Nitrates du Bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la Mer Méditerranée Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versant Nord Africains**. 2018. [s. l.], 2018.

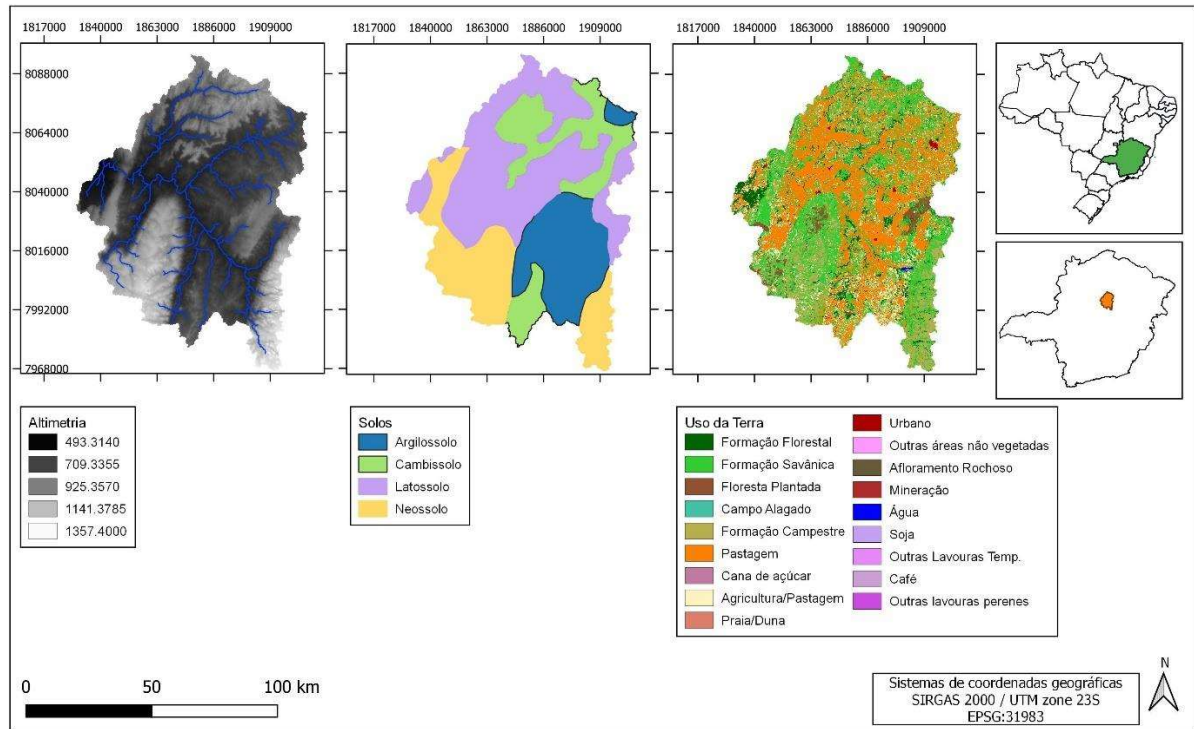
ZINGARO, Marina *et al.* Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping

approach. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 672, p. 763–775, 2019.

APÊNDICE

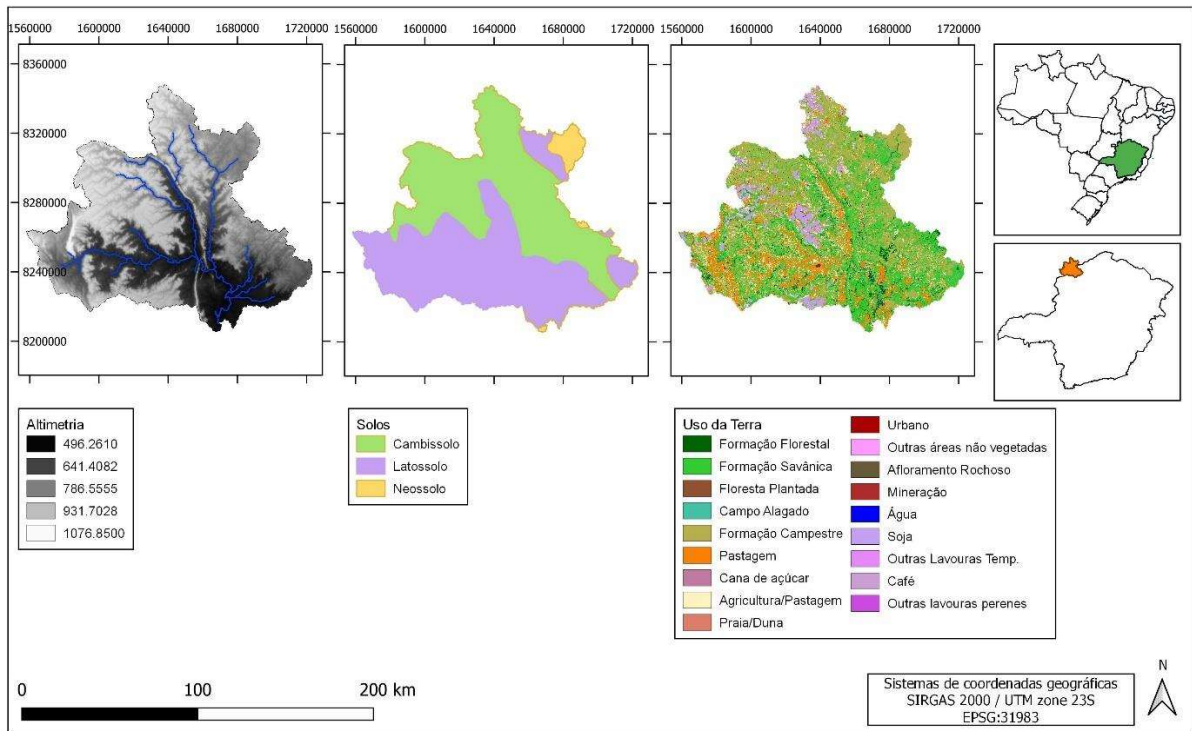
Apêndice A - Mapas de entrada para modelagem hidrossedimentológica

Figura A 1 - Bacia do Jequitai



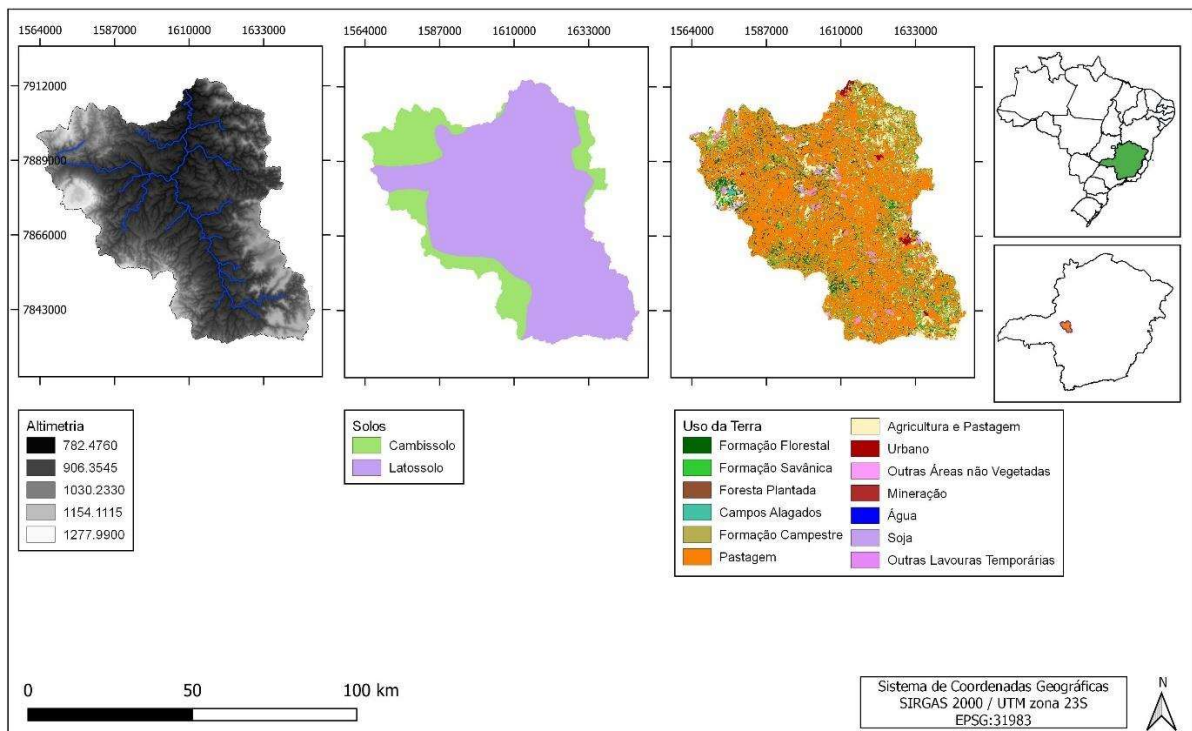
Fonte: Autor (2024)

Figura A 2 - Bacia do Urucuia



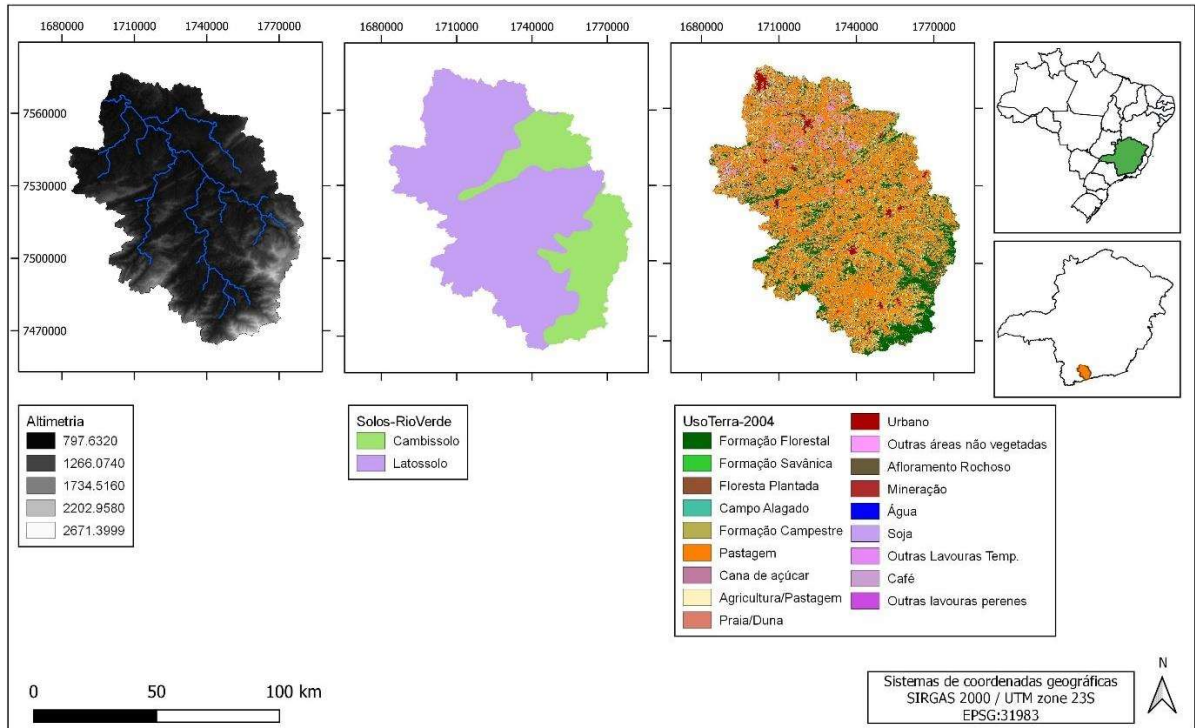
Fonte: Autor (2024)

Figura A 3 - Bacia do Paranaíba



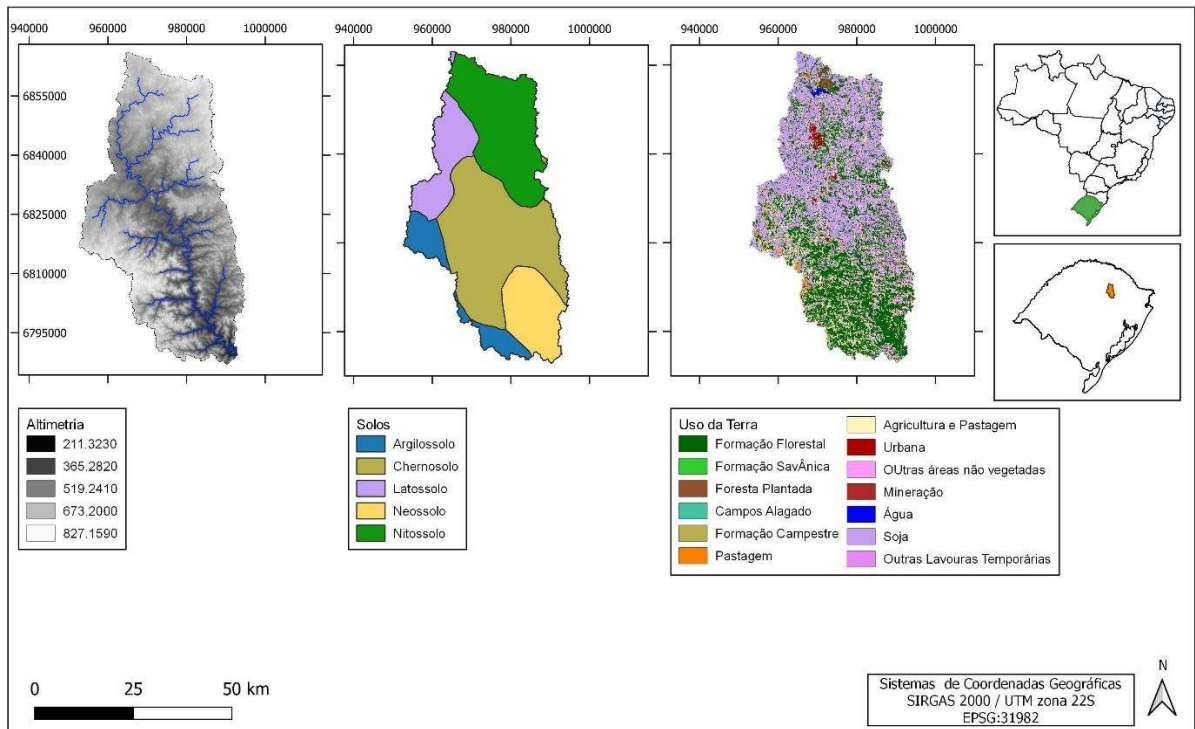
Fonte: Autor (2024)

Figura A 4 - Bacia do Rio Verde



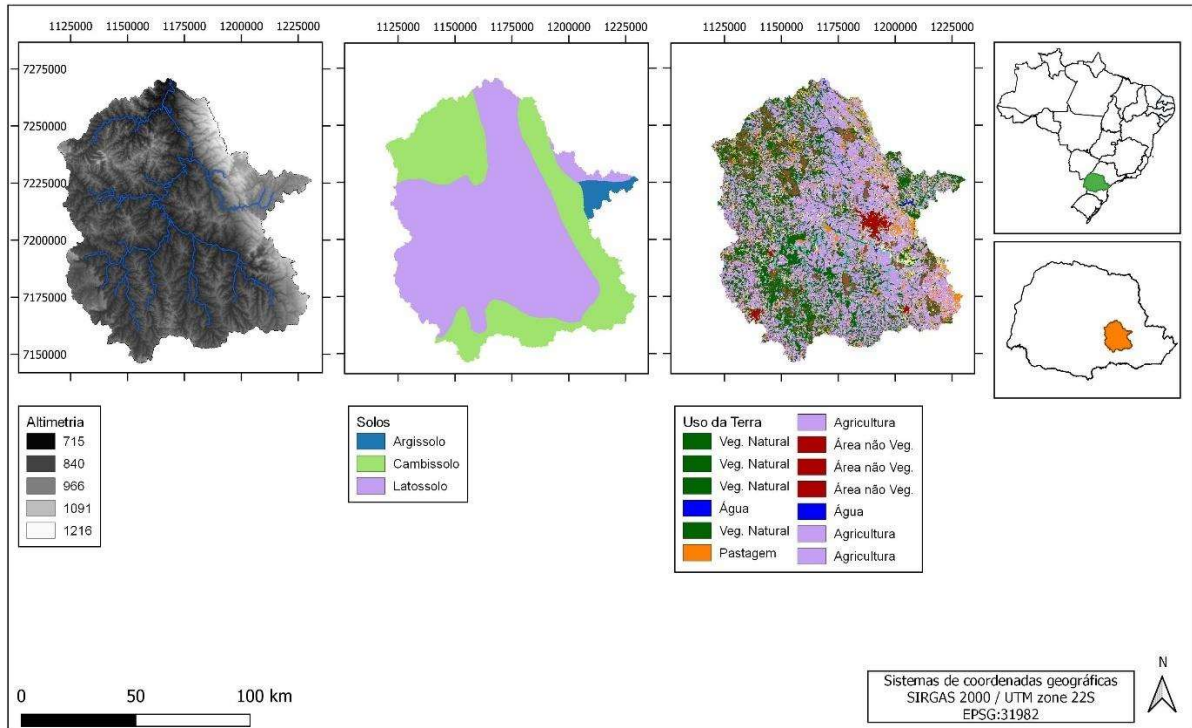
Fonte: Autor (2024)

Figura A 5 - Bacia do Guaporé



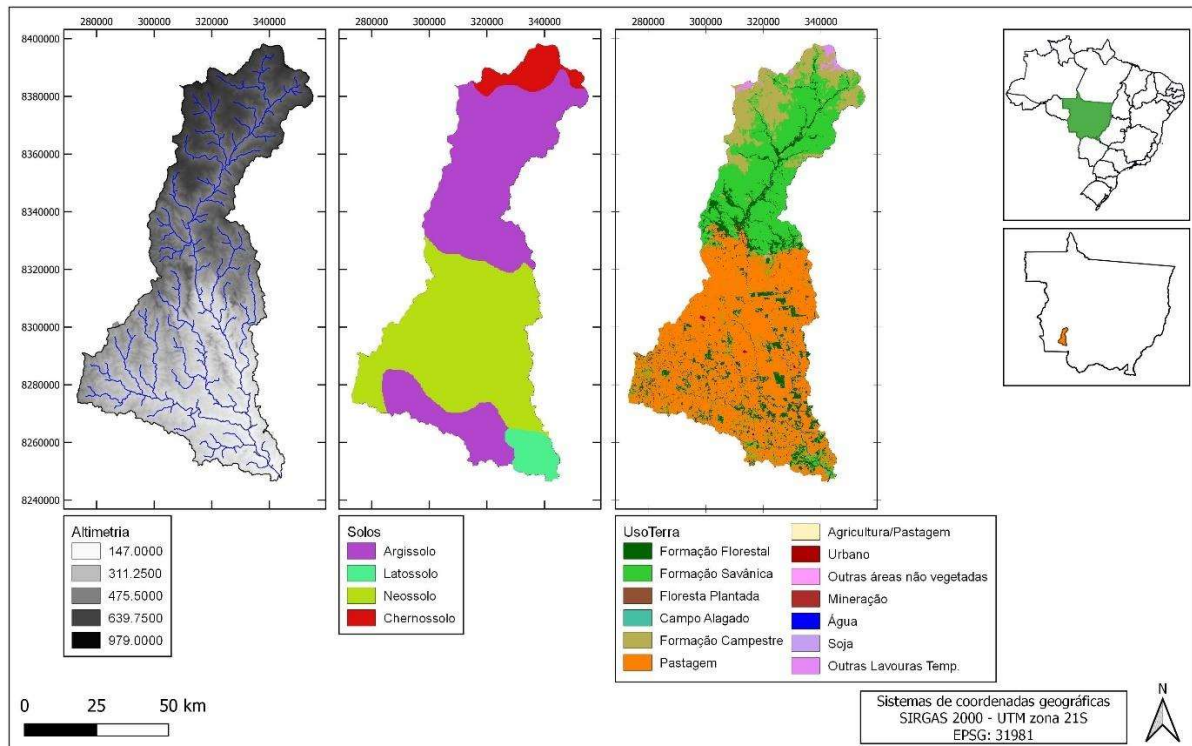
Fonte: Autor (2024)

Figura A 6 - Bacia do Tibagi



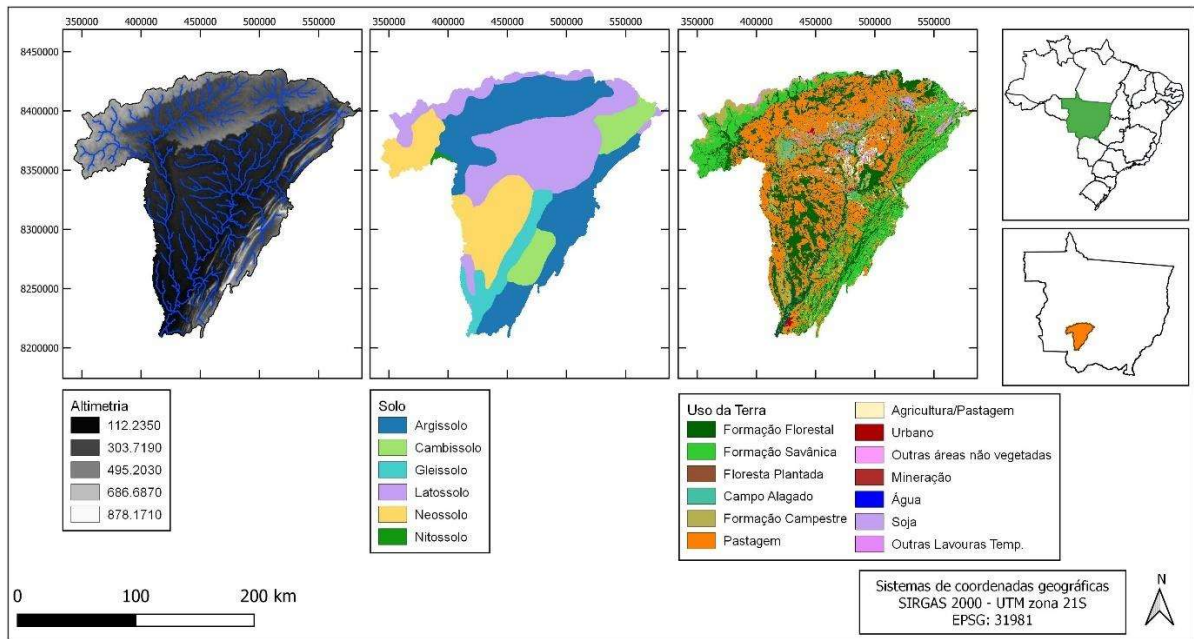
Fonte: Autor (2024)

Figura A 7 - Bacia do Jauru



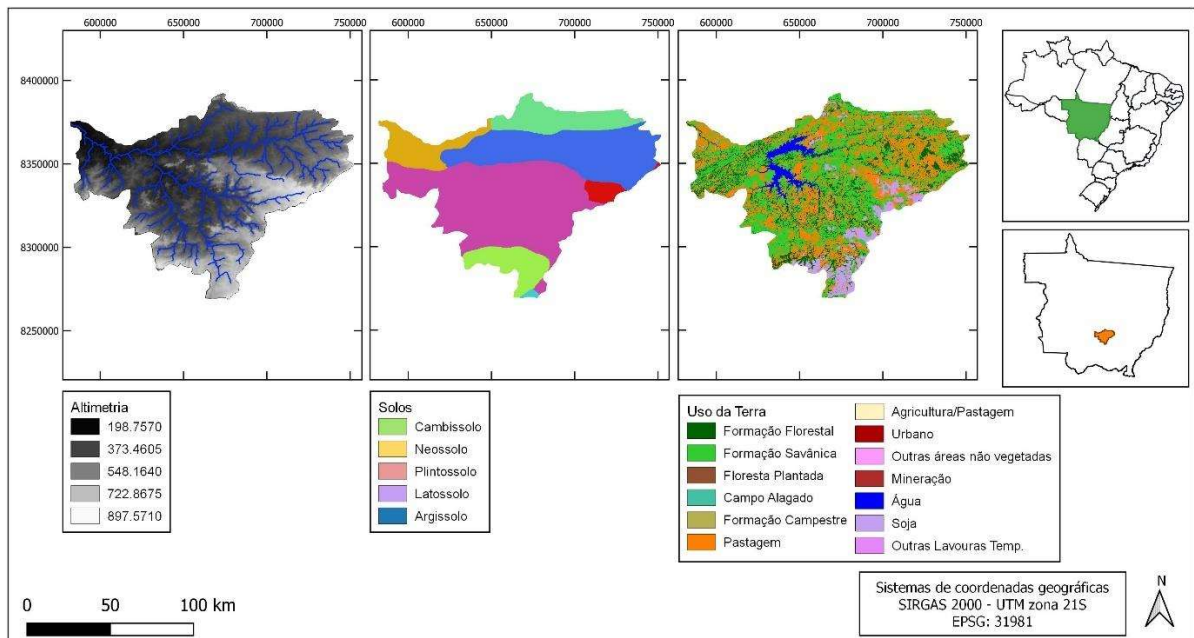
Fonte: Autor (2024)

Figura A 8 - Bacia do Alto Paraguai



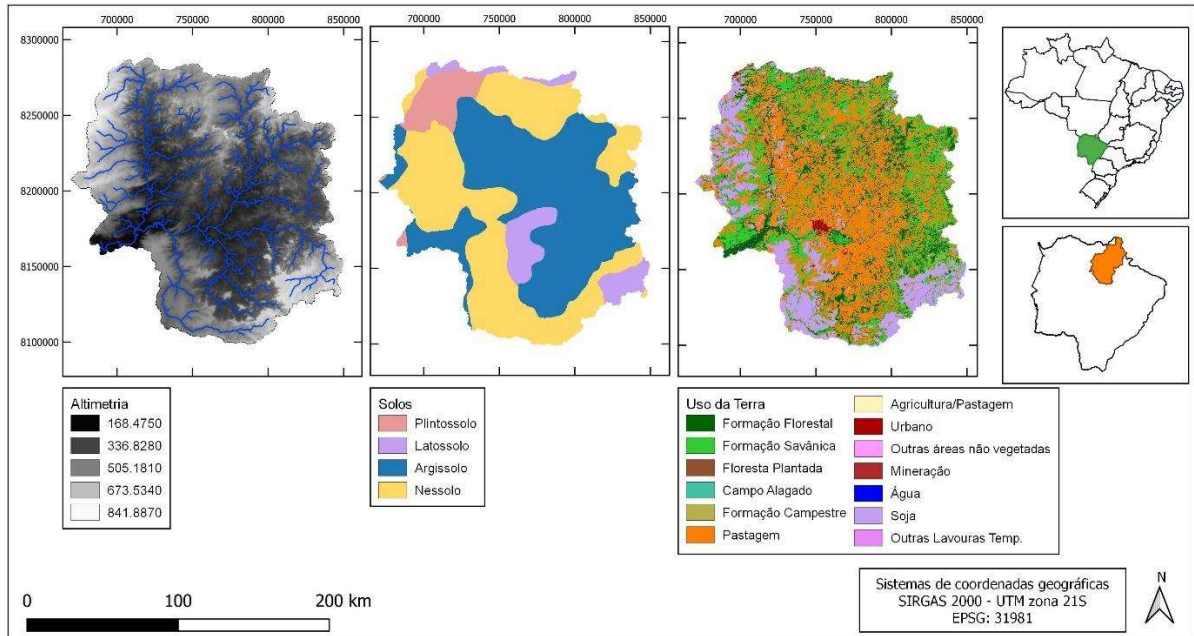
Fonte: Autor (2024)

Figura A 9 - Bacia do Manso



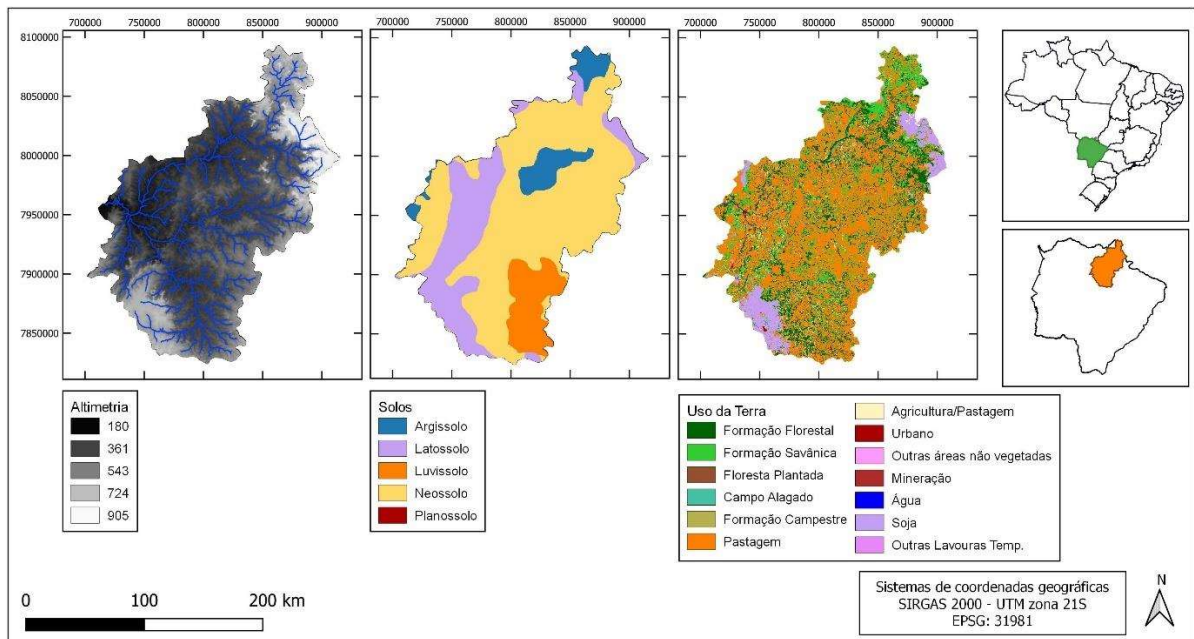
Fonte: Autor (2024)

Figura A 10 - Bacia do São Lourenço



Fonte: Autor (2024)

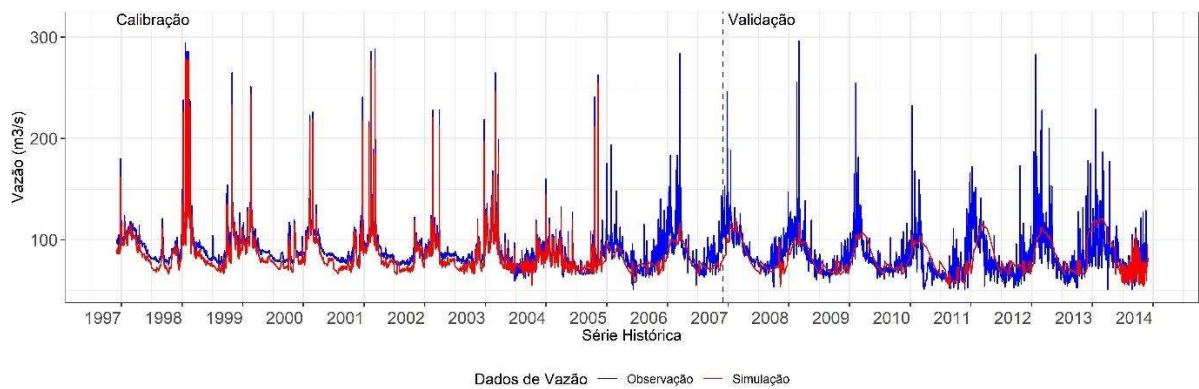
Figura A 11 - Bacia do Taquari



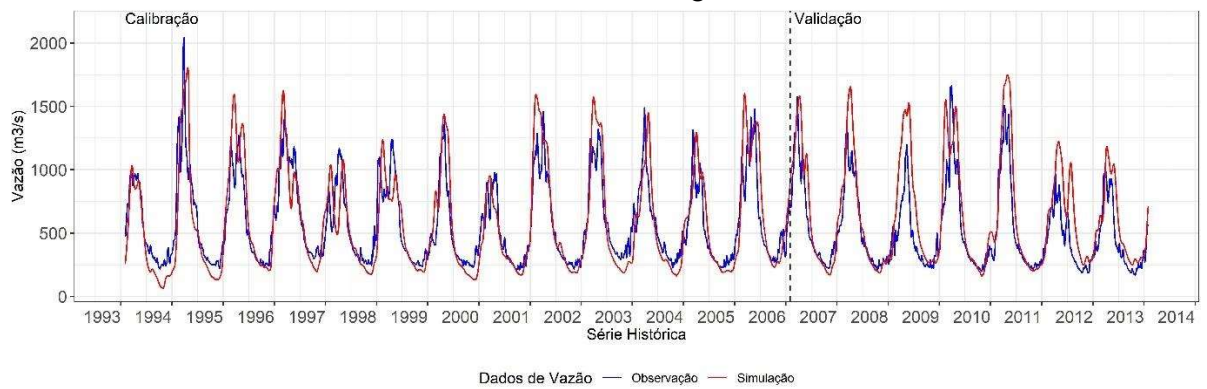
Fonte: Autor (2024)

Apêndice B - Calibração e validação para vazão

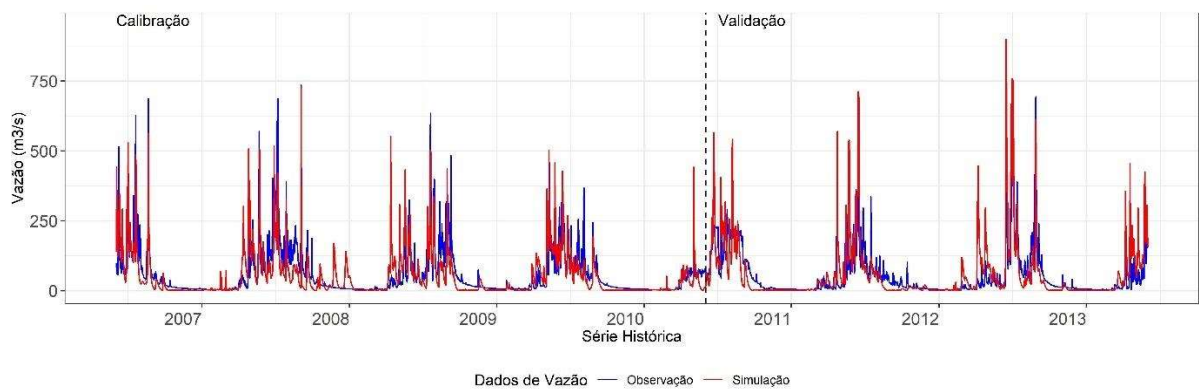
Bacia do rio Jauru



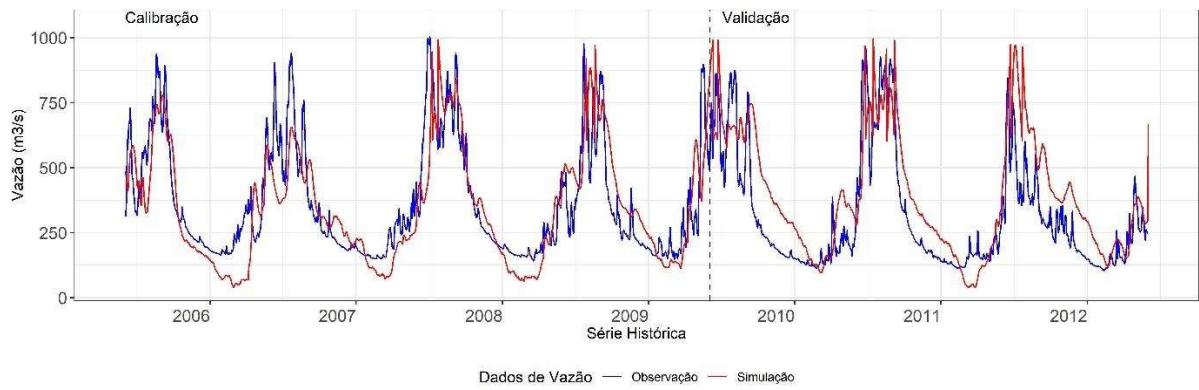
Bacia do Alto Paraguai



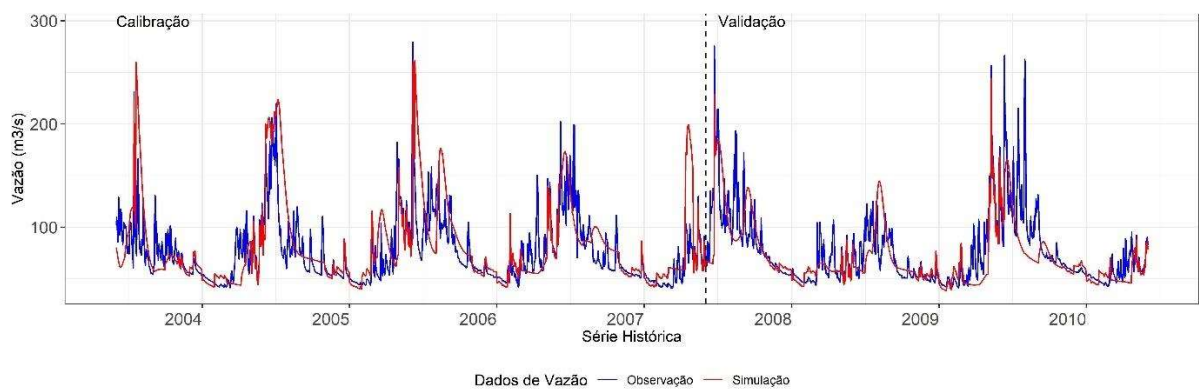
Bacia do rio Manso



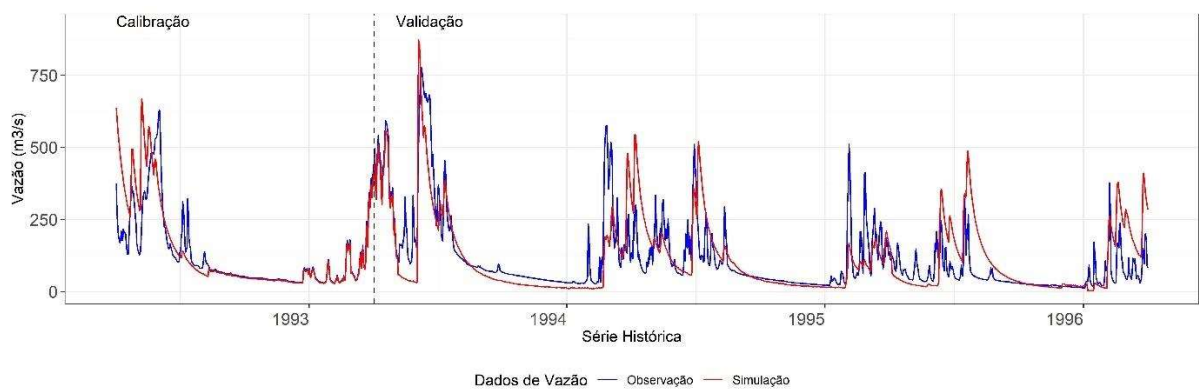
Bacia do rio São Lourenço



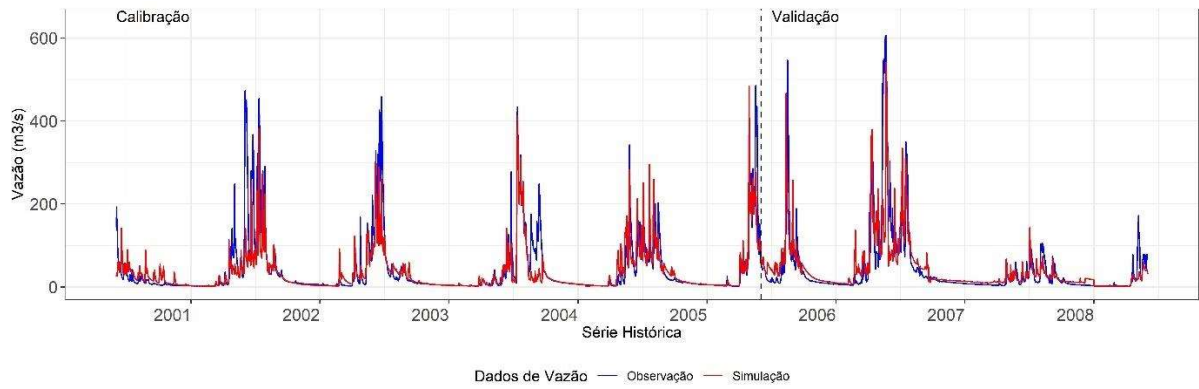
Bacia do rio Taquari



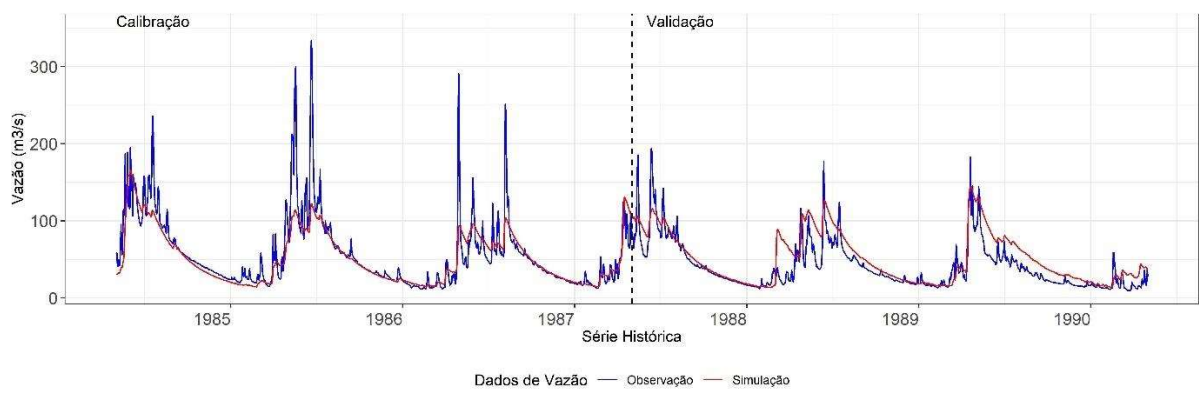
Bacia do rio Urucua



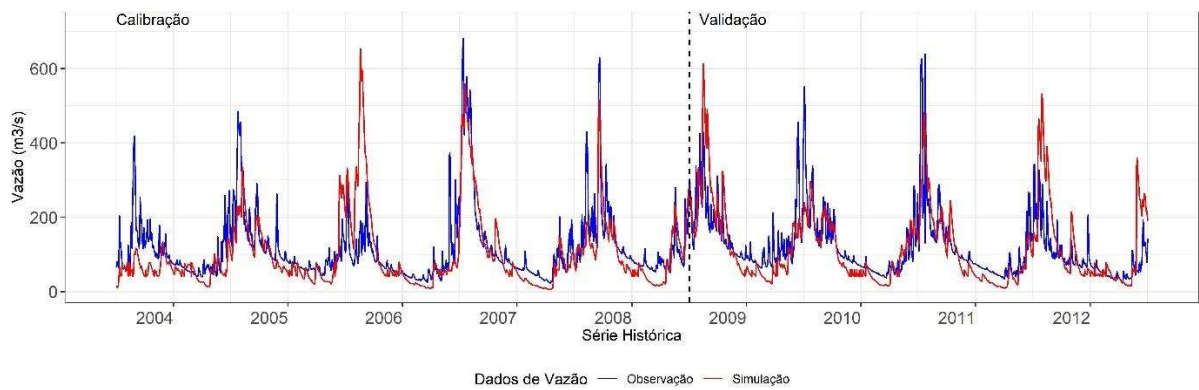
Bacia do rio Jequitaiá



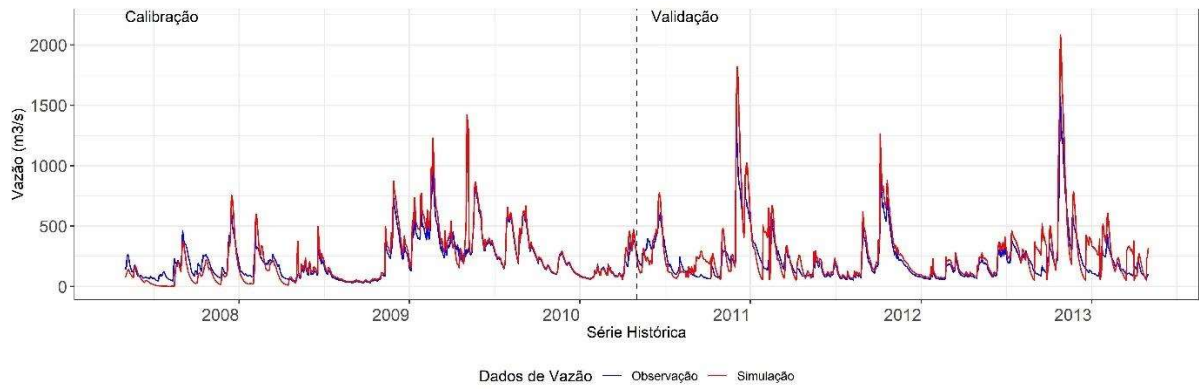
Bacia do rio Paranaíba



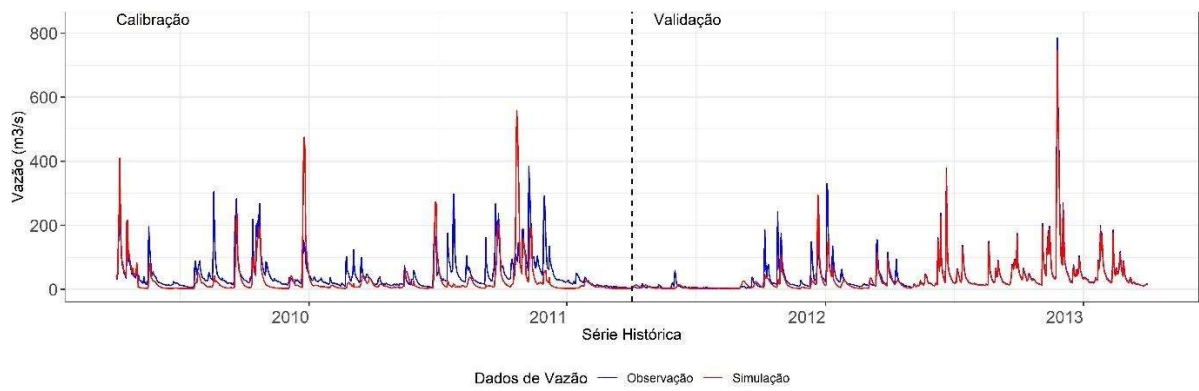
Bacia do Rio Verde



Bacia do rio Tibagi



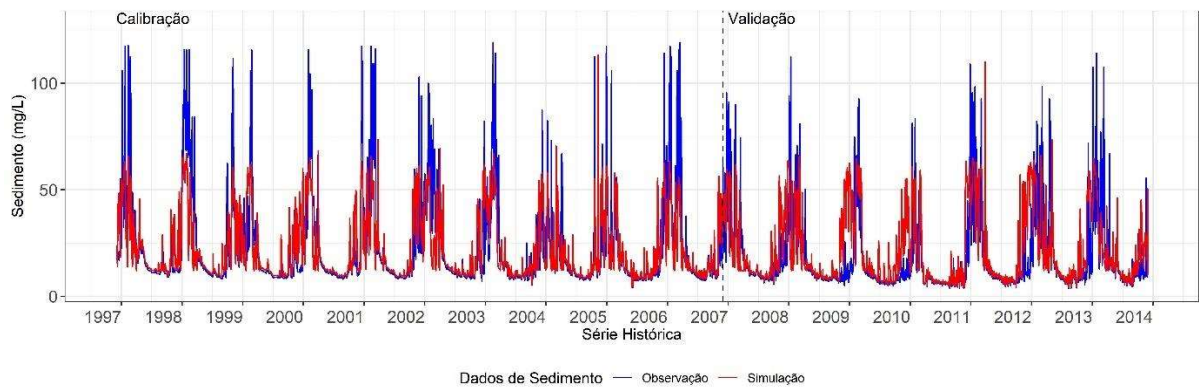
Bacia do rio Guaporé



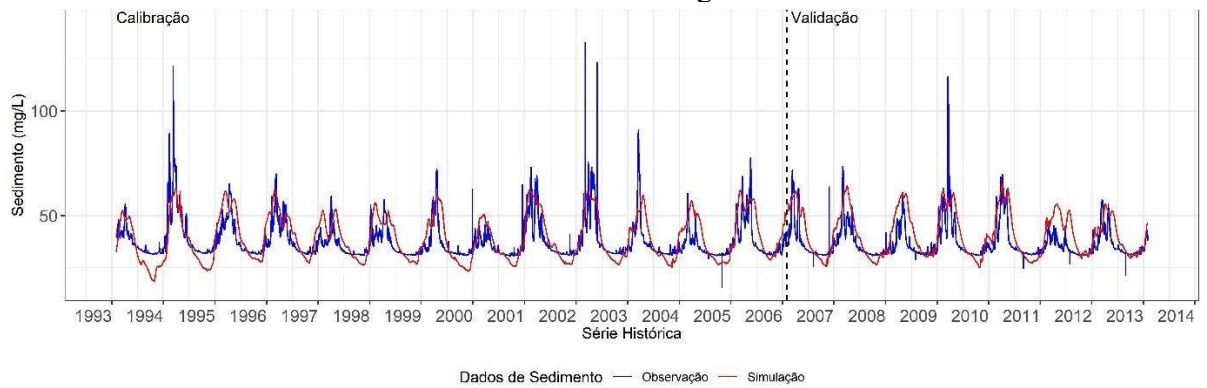
Fonte: Autor (2024)

Apêndice C - Calibração e validação para sedimento

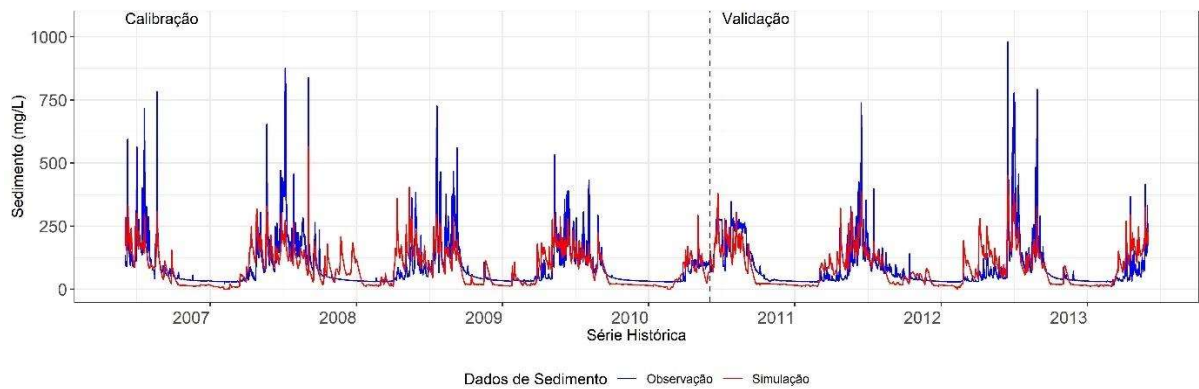
Bacia do rio Jauru



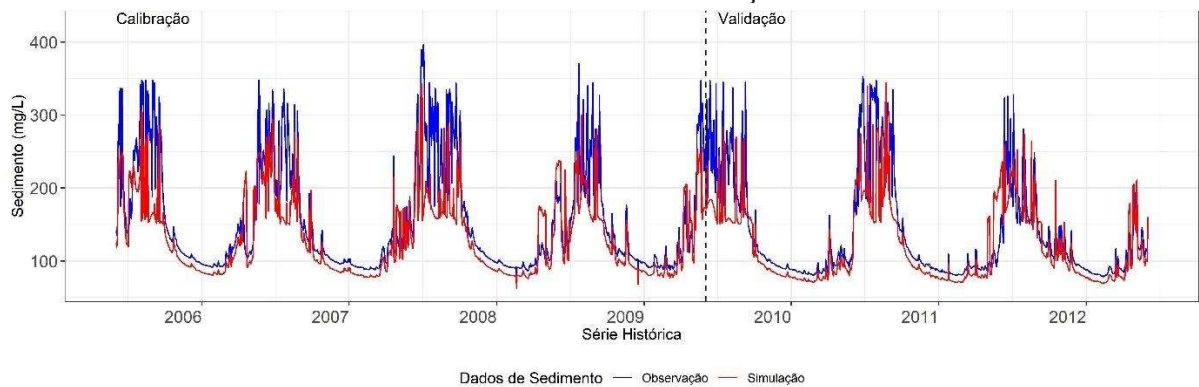
Bacia do Alto Paraguai



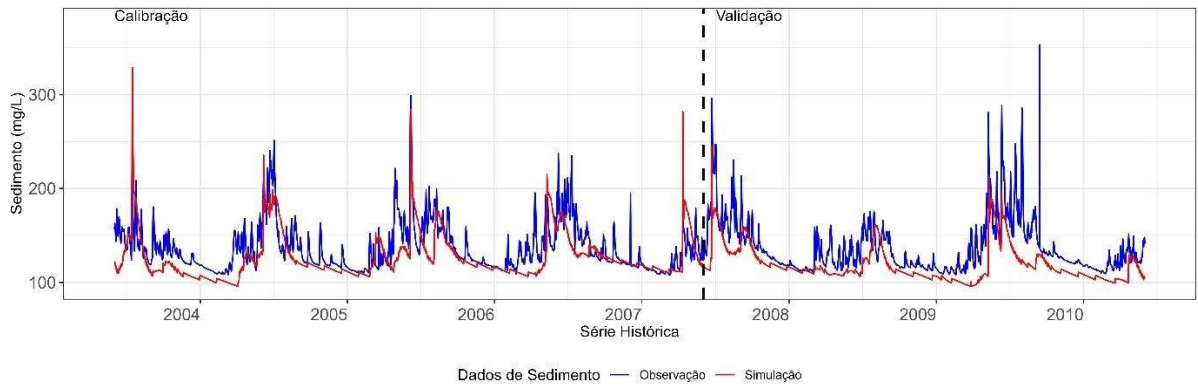
Bacia do rio Manso



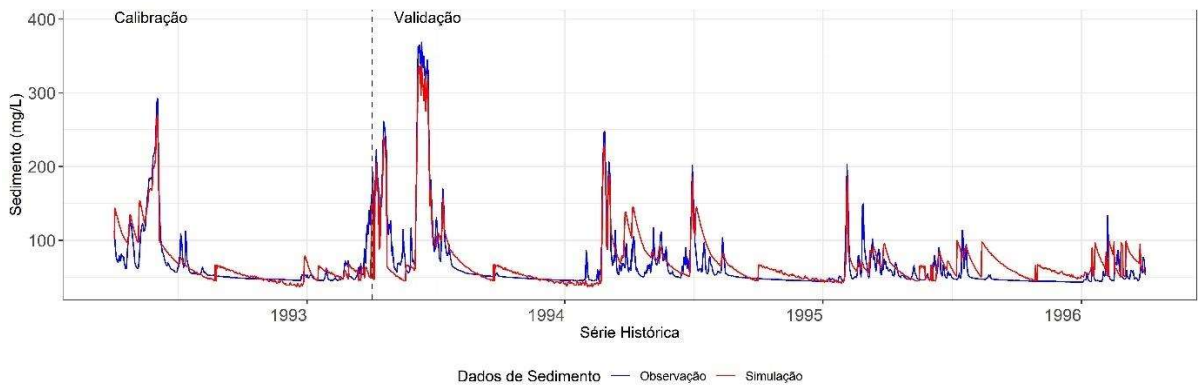
Bacia do rio São Lourenço



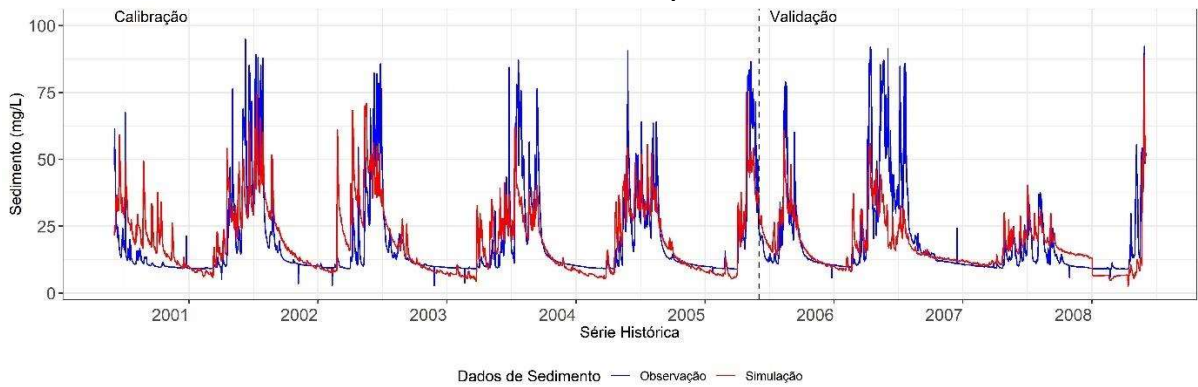
Bacia do rio Taquari



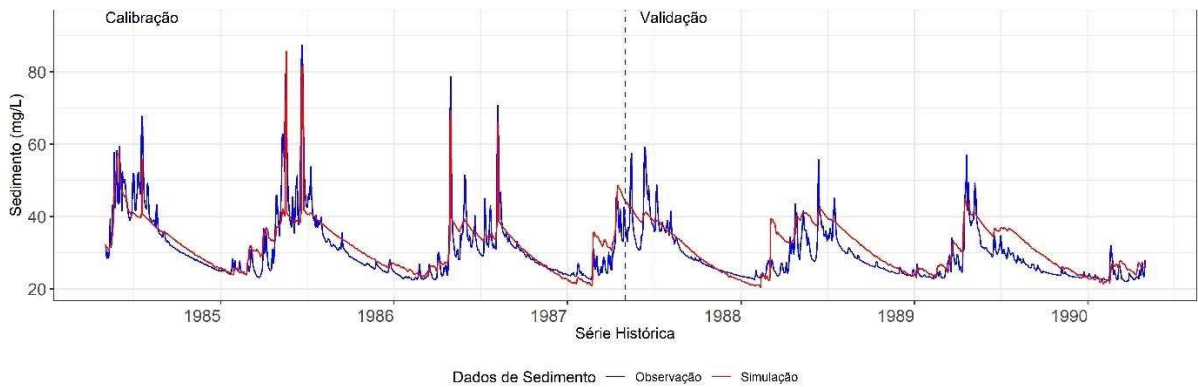
Bacía do rio Urucuiá



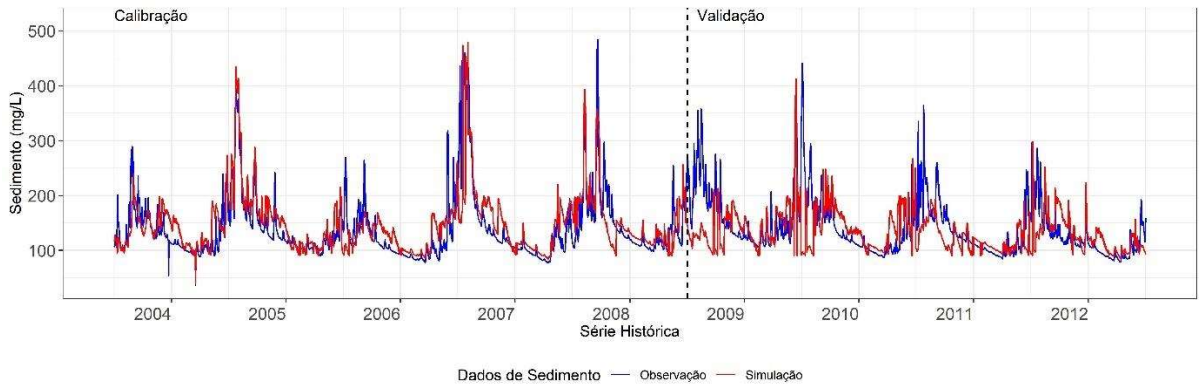
Bacía do rio Jequitá



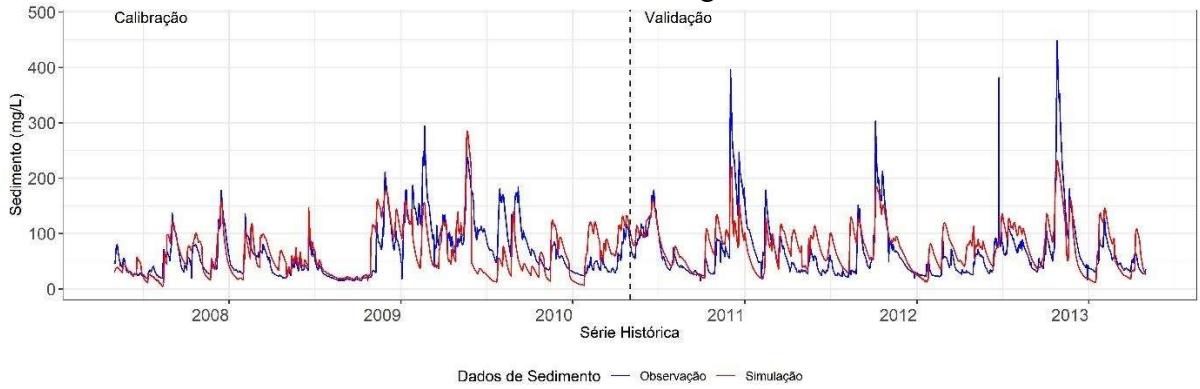
Bacía do rio Paranaíba



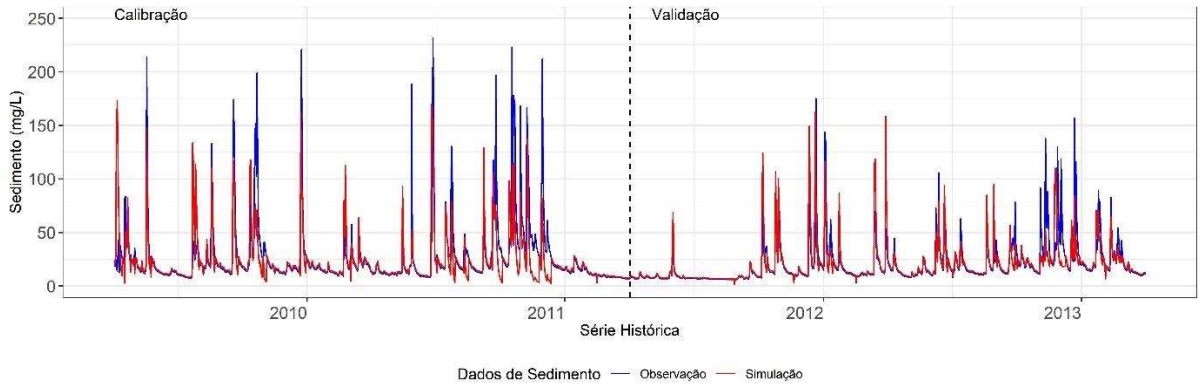
Bacía do rio Verde



Bacia do rio Tibagi



Bacia do rio Guaporé



Fonte: Autor (2024)

Apêndice D – Taxa média de produção de sedimento por agrupamento de HRU

Uso Terra/Solo/Declividade	Guaporé	Jauru	Jequitai	Manso	Tibagi	Alto Paraguai	Taquari	Paranaíba	Rio Verde	Urucuaia	São Lourenço
Agricultura/Argissolo/a0-3.0	2.14	0.38	2.17	19.82	0.43						
Agricultura/Argissolo/b3.0-8.0	20.91	0.39	1.36	23.77	6.58	1.57	5.03				
Agricultura/Argissolo/c8.0-20.0	55.29		0.39		21.12						
Agricultura/Argissolo/d20.0-45.0	109.23				27.07						
Agricultura/Argissolo/e45.0-75.0	206.37										
Agricultura/Argissolo/f75.0-	374.26										
Agricultura/Cambissolo/a0-3.0			0.00	19.51	1.25	1.63		0.10	0.44	0.32	
Agricultura/Cambissolo/b3.0-8.0			0.01	24.36	15.06	2.30		0.17	6.94	2.01	
Agricultura/Cambissolo/c8.0-20.0			0.03		28.21			0.17	22.94	2.78	
Agricultura/Cambissolo/d20.0-45.0					30.52			0.16	24.44	2.75	
Agricultura/Cambissolo/e45.0-75.0					32.22			0.17	25.19	2.78	
Agricultura/Cambissolo/f75.0-					30.26			0.19	26.41		
Agricultura/Chernossolo/a0-3.0	1.77	0.30									
Agricultura/Chernossolo/b3.0-8.0	20.21	0.39									
Agricultura/Chernossolo/c8.0-20.0	57.11										
Agricultura/Chernossolo/d20.0-45.0	110.14										
Agricultura/Chernossolo/e45.0-75.0	228.32										
Agricultura/Chernossolo/f75.0-	307.12										
Agricultura/Esposossolo/a0-3.0											26.65
Agricultura/Esposossolo/b3.0-8.0											29.08
Agricultura/Esposossolo/c8.0-20.0											31.82
Agricultura/Esposossolo/d20.0-45.0											29.94
Agricultura/Esposossolo/e45.0-75.0											29.38
Agricultura/Gleissolo/a0-3.0						0.75					
Agricultura/Latossoso/a0-3.0	2.34		0.51	21.59	0.84	1.30	3.44	0.32	0.44	0.44	28.76

Agricoltura/Latossolo/b3.0-8.0	22.38	79.50	23.62	11.70	1.77	5.65	0.34	6.82	2.36	29.09
Agricoltura/Latossolo/c8.0-20.0	59.06	0.31		27.13		7.22	0.34	18.65	3.37	27.99
Agricoltura/Latossolo/d20.0-45.0	96.20			30.77			0.34	20.09	3.75	29.58
Agricoltura/Latossolo/e45.0-75.0	186.95			32.87			0.34	21.19	3.99	27.91
Agricoltura/Latossolo/f75.0-	337.15			33.66			0.42	22.45		
Agricoltura/Luvisolo/a0-3.0										26.65
Agricoltura/Luvisolo/b3.0-8.0						7.63				26.14
Agricoltura/Luvisolo/c8.0-20.0						7.70				25.95
Agricoltura/Luvisolo/d20.0-45.0										26.43
Agricoltura/Luvisolo/e45.0-75.0										26.86
Agricoltura/NA/a0-3.0									0.05	
Agricoltura/NA/b3.0-8.0									0.35	
Agricoltura/NA/c8.0-20.0									0.71	
Agricoltura/Neossolo/a0-3.0	1.89	564.54	21.34			3.41				29.43
Agricoltura/Neossolo/b3.0-8.0	22.92	256.78	24.68			5.61				29.92
Agricoltura/Neossolo/c8.0-20.0	75.71	333.39	24.72			6.42				29.33
Agricoltura/Neossolo/d20.0-45.0	141.94					4.85				30.15
Agricoltura/Neossolo/e45.0-75.0	276.53									31.31
Agricoltura/Neossolo/f75.0-	387.80									38.15
Agricoltura/Nitossolo/a0-3.0	2.08									
Agricoltura/Nitossolo/b3.0-8.0	23.32									
Agricoltura/Nitossolo/c8.0-20.0	61.82									
Agricoltura/Nitossolo/d20.0-45.0	106.19									
Agricoltura/Nitossolo/e45.0-75.0	190.58									
Agricoltura/Nitossolo/f75.0-	289.29									
Agricoltura/Plintossolo/a0-3.0			21.84							
Agricoltura/Plintossolo/b3.0-8.0			24.08							
Agricoltura/Plintossolo/c8.0-20.0			26.18							
Area_Nao_Vegetada/Argissolo/a0-3.0	1.72			0.07	0.09					

Area_Nao_Vegetada/Latossolo/e45.0-75.0	175.77			23.69			6.87		28.25
Area_Nao_Vegetada/Luvisso/a0-3.0									26.52
Area_Nao_Vegetada/Luvisso/b3.0-8.0									29.14
Area_Nao_Vegetada/Luvisso/c8.0-20.0									25.98
Area_Nao_Vegetada/Luvisso/d20.0-45.0									31.27
Area_Nao_Vegetada/Neossolo/a0-3.0	2.18	0.01						0.84	33.20
Area_Nao_Vegetada/Neossolo/b3.0-8.0	16.24	0.28	0.02					2.56	31.34
Area_Nao_Vegetada/Neossolo/c8.0-20.0	41.49								37.30
Area_Nao_Vegetada/Neossolo/d20.0-45.0	99.62								
Area_Nao_Vegetada/Nitossolo/a0-3.0	1.79								
Area_Nao_Vegetada/Nitossolo/b3.0-8.0	13.91								
Area_Nao_Vegetada/Nitossolo/c8.0-20.0	40.12								
Area_Nao_Vegetada/Nitossolo/d20.0-45.0	59.37								
Area_Nao_Vegetada/Nitossolo/e45.0-75.0	147.13								
Area_Nao_Vegetada/Plintossolo/a0-3.0				4.10					
Area_Nao_Vegetada/Plintossolo/b3.0-8.0				7.14					
Pastagem/Argissolo/a0-3.0	1.65	0.28	9.63	22.77	0.95	0.98		4.68	
Pastagem/Argissolo/b3.0-8.0	16.76	0.33	7.72	23.98	13.48	1.94		5.40	
Pastagem/Argissolo/c8.0-20.0	43.62	0.31	2.52	24.49	27.78	1.98		6.32	
Pastagem/Argissolo/d20.0-45.0	87.05	0.24			29.40				
Pastagem/Argissolo/e45.0-75.0	183.50				30.42				
Pastagem/Argissolo/f75.0-	254.14								
Pastagem/Cambissolo/a0-3.0			0.02	20.15	1.35	0.98	0.11	0.64	0.42
Pastagem/Cambissolo/b3.0-8.0			84.35	23.71	16.78	1.70	0.18	8.95	2.32

Apêndice E - Aplicações do Índice de Conectividade Cavalli (2013)

Figura E 1 - Bacia do Jauru

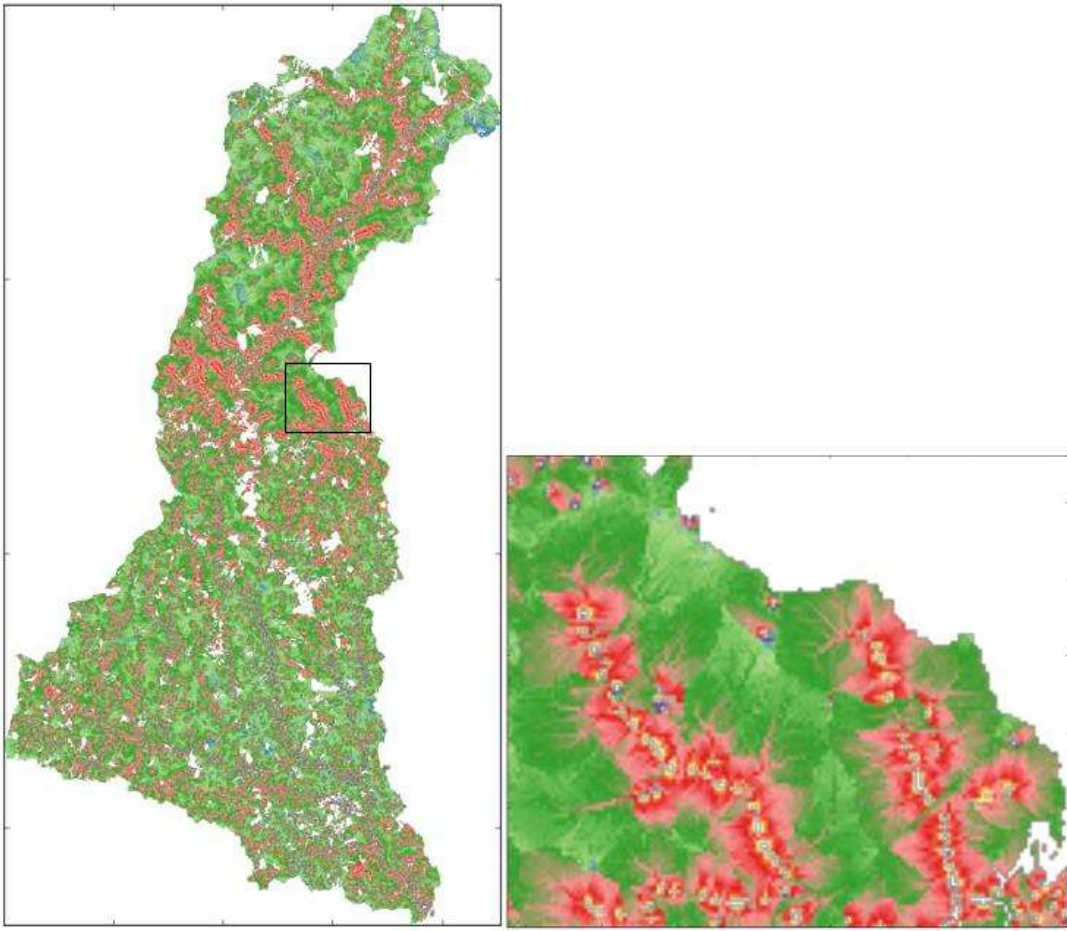


Figura E 2 - Bacia do Alto Paraguai

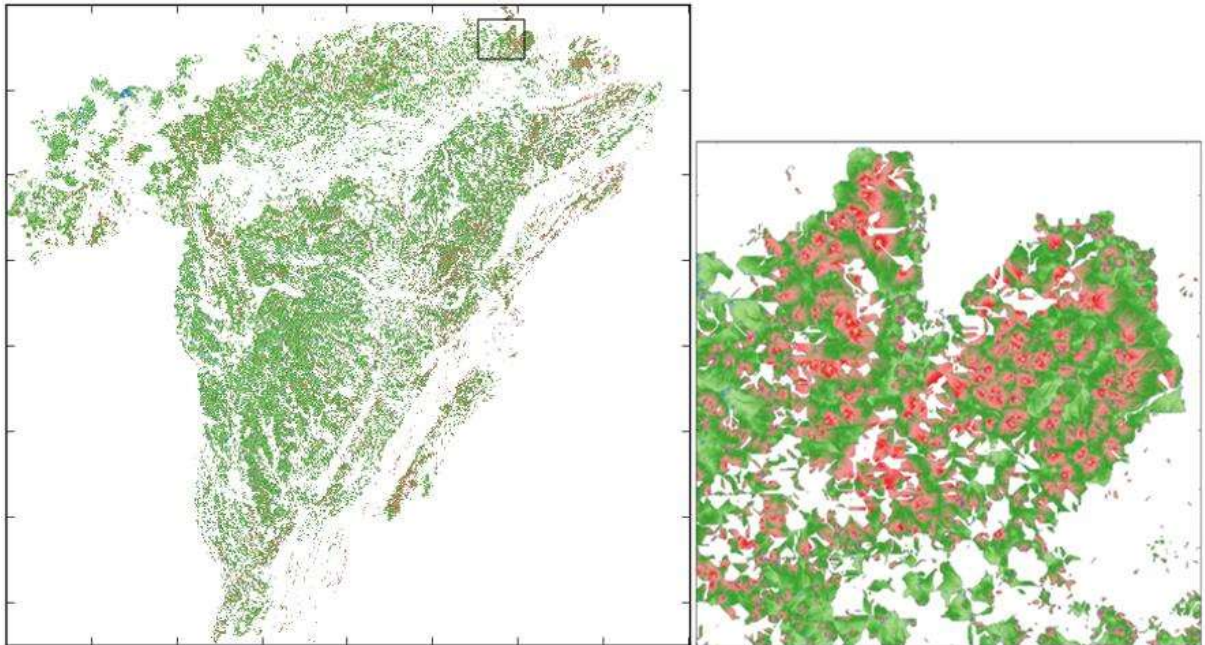


Figura E 3 - Bacia do Manso

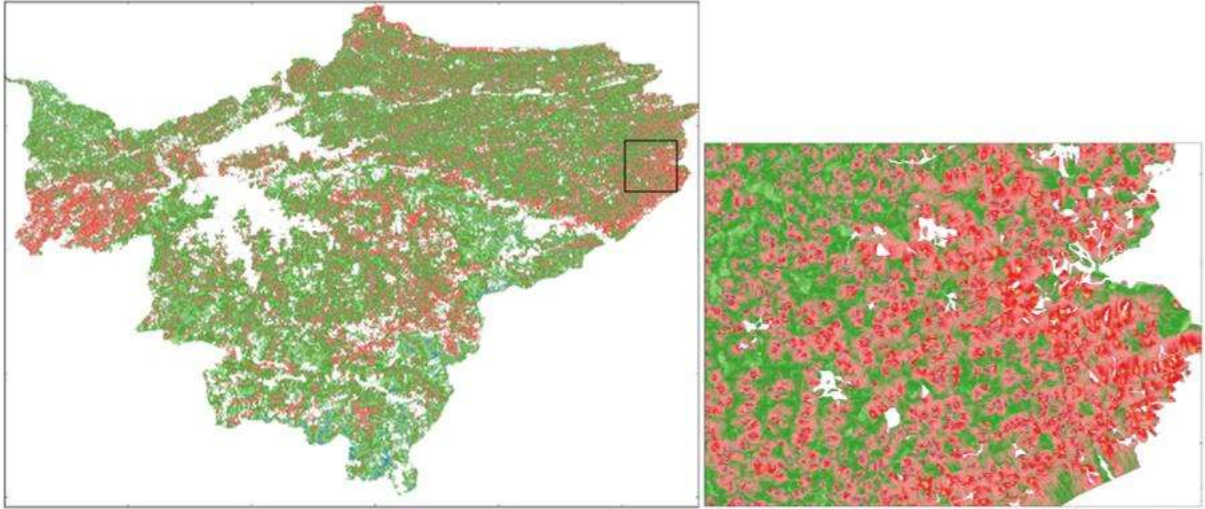


Figura E 4 - Bacia do São Lourenço

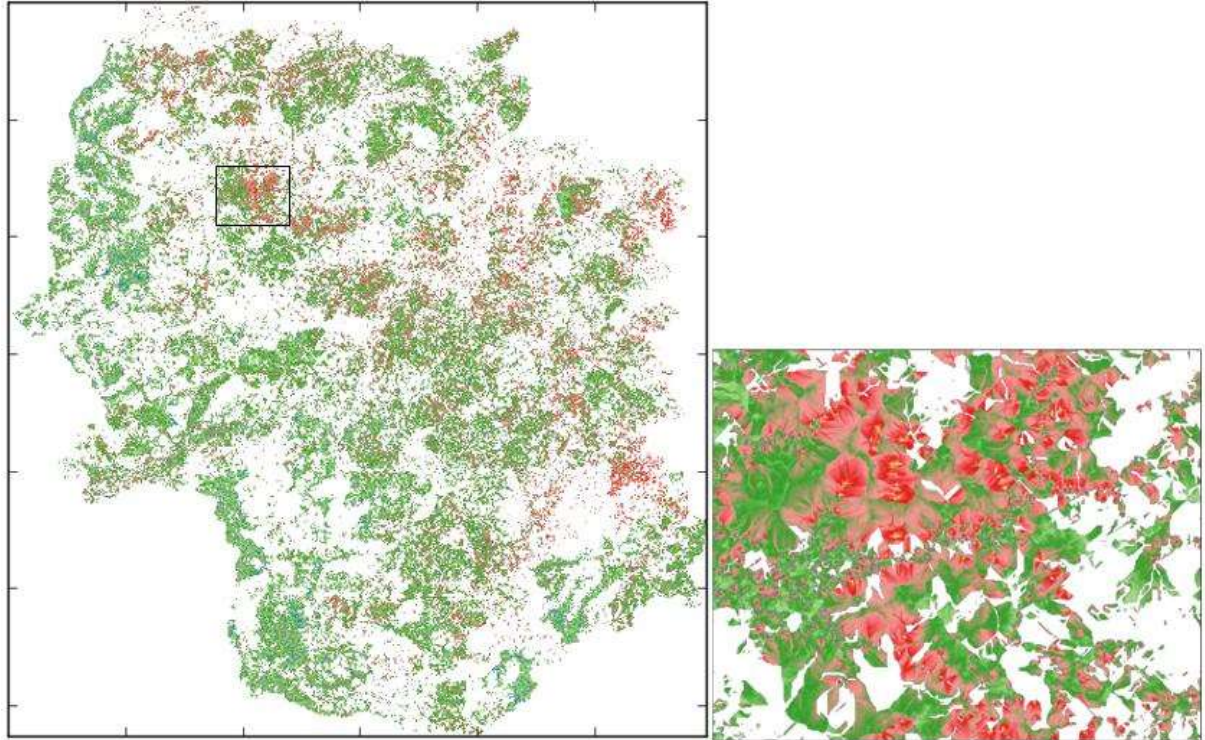


Figura E 5 – Bacia do Taquari

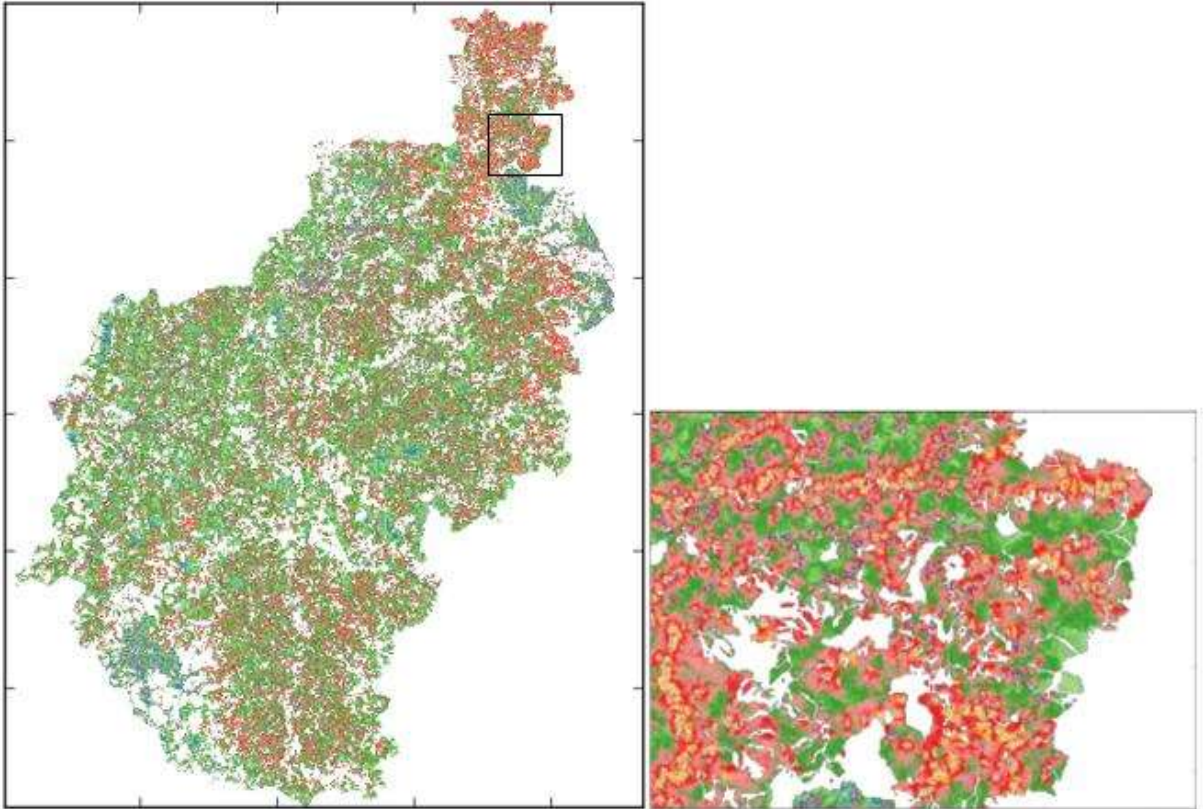


Figura E 6 - Bacia do Jequitai

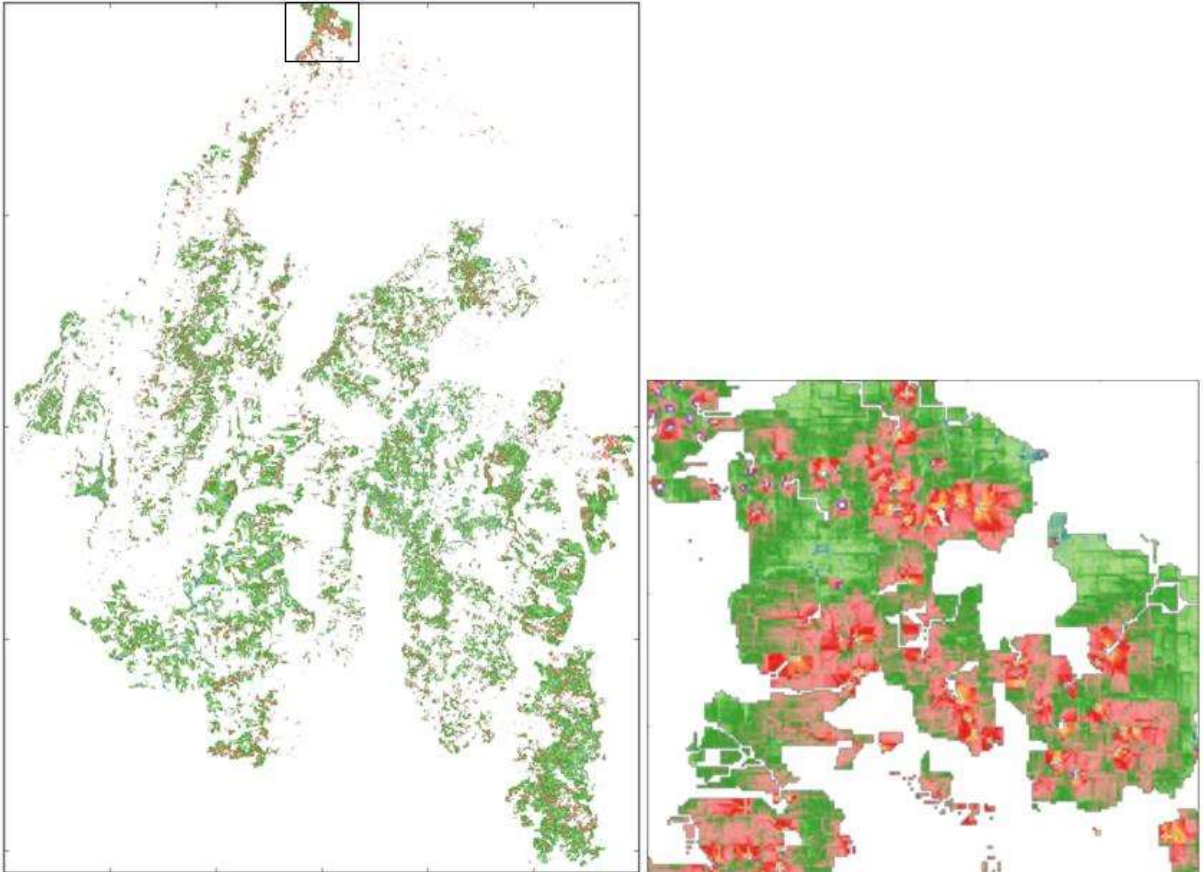


Figura E 7 - Bacia do Urucua

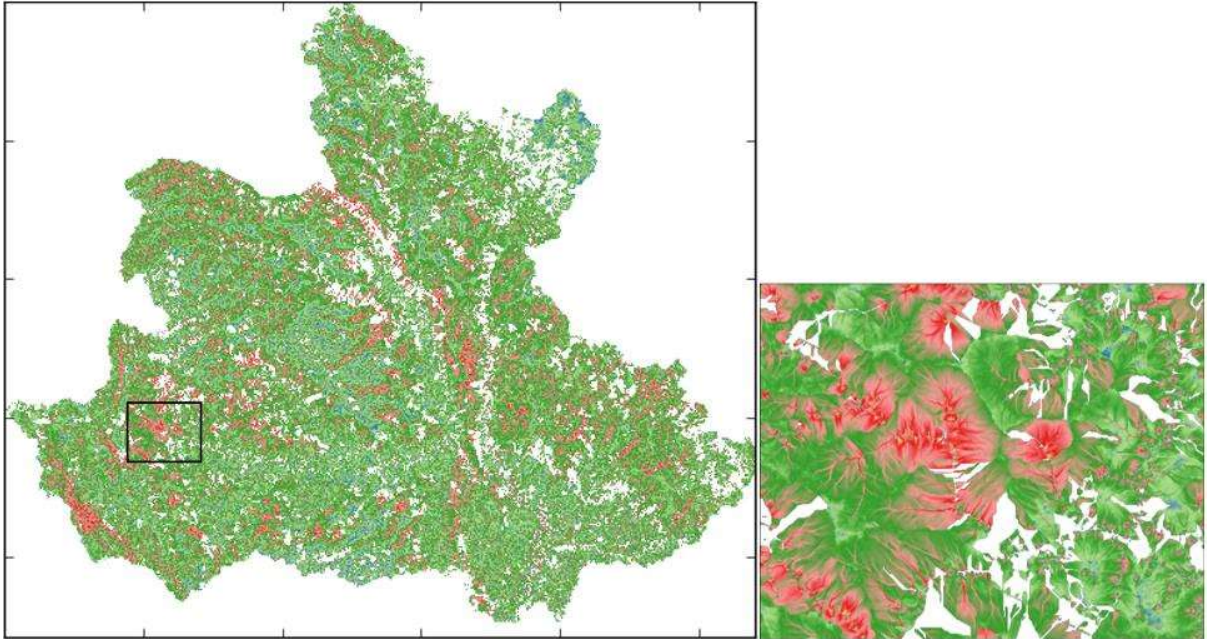


Figura E 8 - Bacia do Paranaíba

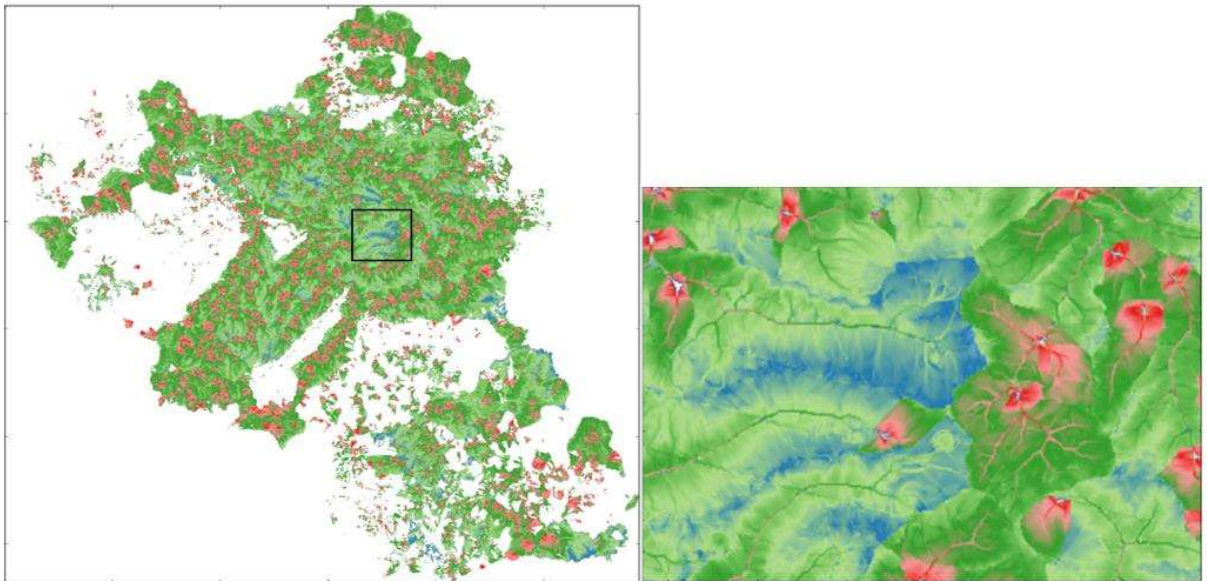


Figura E 9 - Bacia do Rio Verde

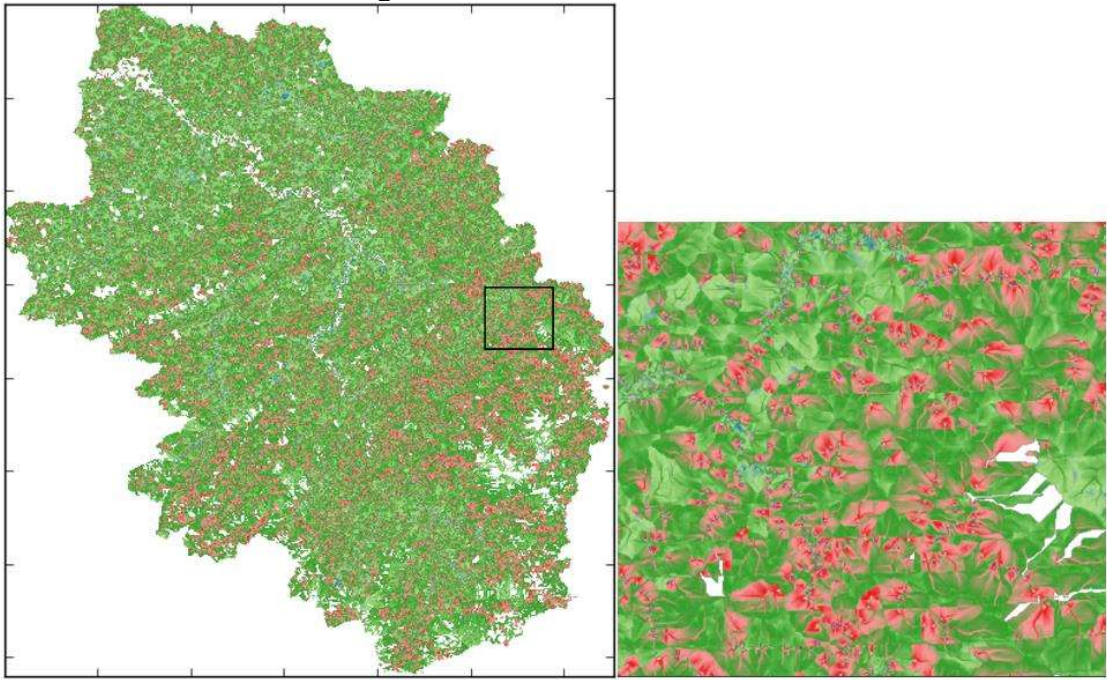


Figura E 10 - Bacia do Guaporé

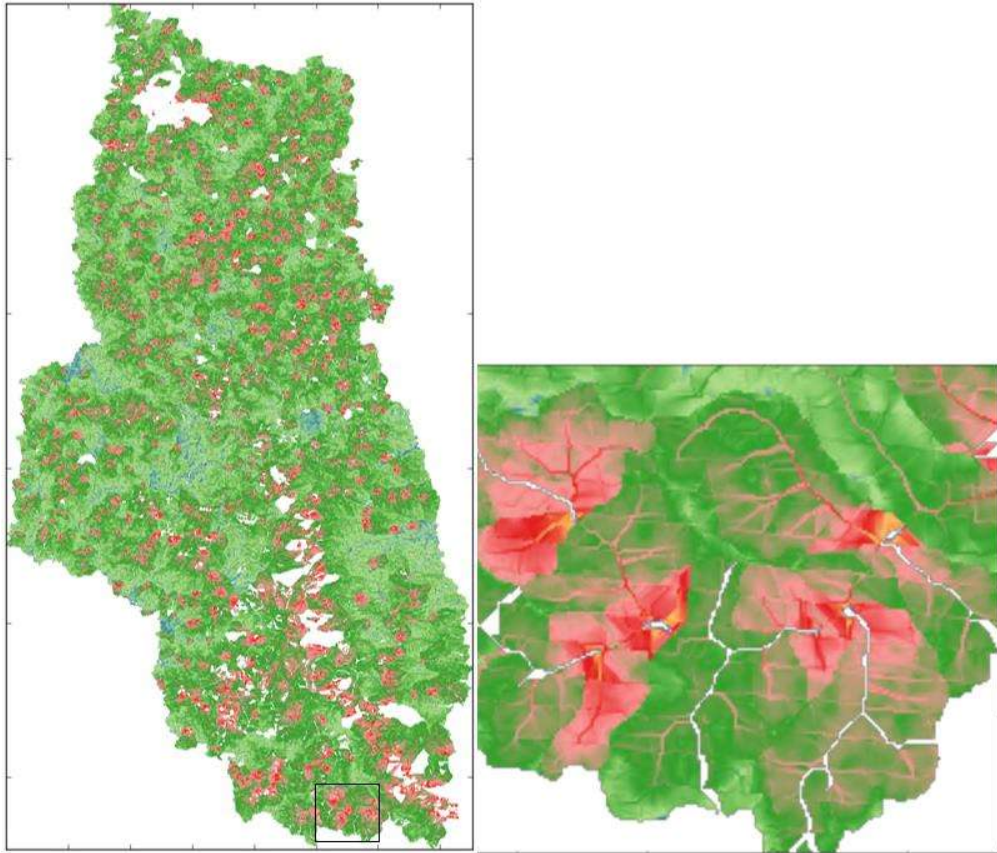
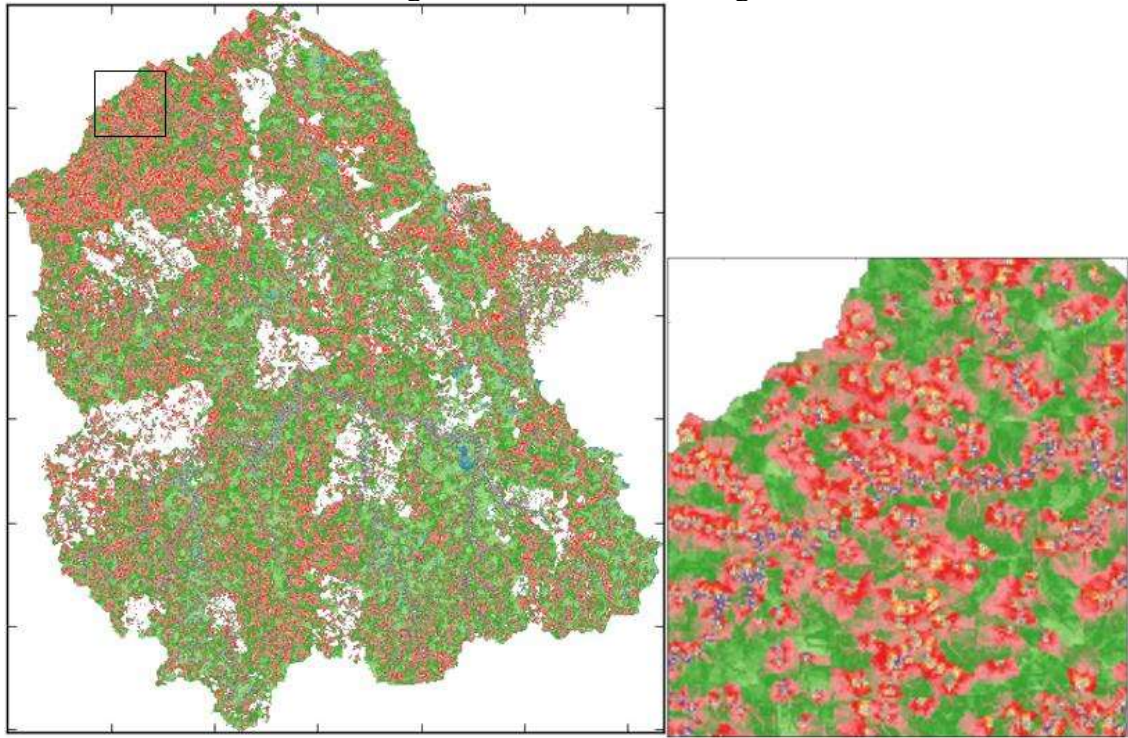


Figura E 11 - Bacia do Tibagi

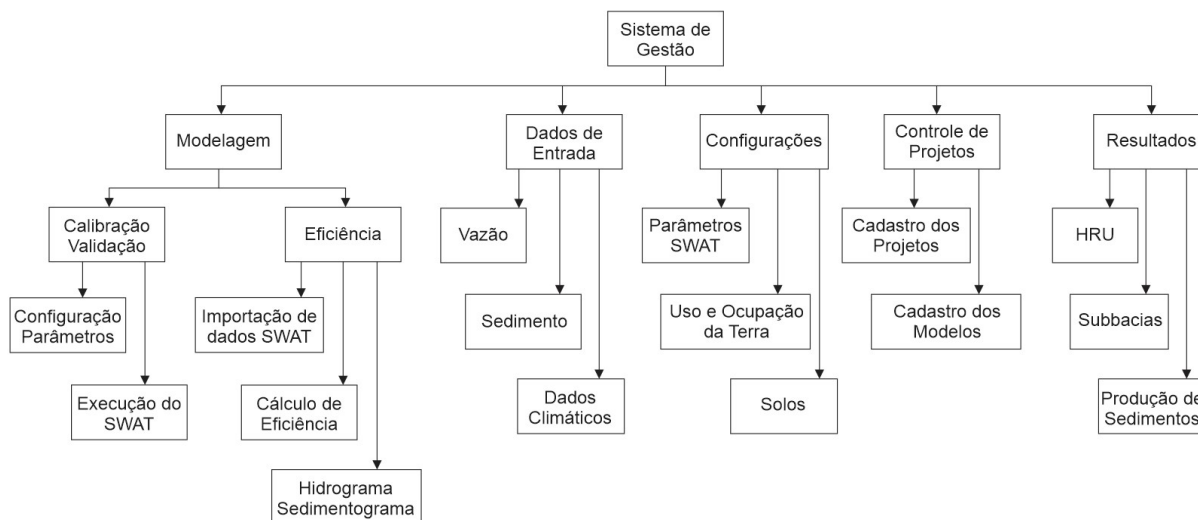


Apêndice F - Software de gestão da modelagem hidrossedimentológica

O software de gestão de dados da modelagem com SWAT desenvolvido pelo autor, teve como objetivo inicial o controle e execução das calibrações dos modelos, uma vez que o processo tradicional é trabalhoso em termos de manipulação. Com a necessidade de calibrar e validar várias bacias, a criação de um recurso para agilizar era inevitável. Fazer com que esse objetivo inicial tivesse êxito, só foi possível devido a estrutura aberta que o SWAT possibilita.

Com o decorrer da criação do software e ao aprofundar nos recursos, foram aparecendo novas ideias de implementação e sempre com o objetivo de facilitar a manipulação dos dados processados pelo SWAT bem como trabalhar com os resultados após a calibração do modelo, aplicado a cada bacia hidrográfica. Com isso, foram sendo criados módulos internos à medida que foram surgindo as demandas. Na Figura F 1 são apresentados os principais recursos do software e as perspectivas futuras.

Figura F 1 - Organograma dos principais recursos



A seguir são descritos os principais recursos implementados em cada módulo

Controle de projetos

Esse módulo organiza o sistema em projetos e cada um com a possibilidade de criar vários modelos. Subentende que cada modelo representa a simulação de uma bacia, onde terá todos os detalhes de dados e execução de maneira independente. A Figura F 2 representa a tela de controle desse módulo.

Figura F 2 - Tela de controle de projetos para modelagem

Controle de Projetos

Relação de Projetos

Id_Projeto	Nome
1	Alto Paraguai
2	Teste 1
3	Teste 2

Nome: Alto Paraguai
 Localização: Bacia Alto Paraguai
 Data: 12/7/2021
 Autores: Warlen Librelon de Oliveira, Adilson Pinheiro, Vander Kaufmann
 Pasta de Arquivos Principal do Projeto: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos

Cidades do Projeto

Codigo	Nome	Estado

Incluir Gravar Incluir Cidade

Relação de Modelos por Projeto

Id_Modelo	Id_Projeto	Nome	SubBaciaEstacaoVazao	SubBaciaEstacaoSedim	Pat#BDResul
59	1	Bacia do Jauru	11	17	D:\Doutorado
77	1	Bacia do Manso	33	33	
69	1	Bacia do Paraguai	1	1	
75	1	Bacia do São Lourenço	1	1	
76	1	Bacia do Taquari	29	29	
57	1	Controle de Sedimentos	0	0	
61	1	Metrica de Paisagem	0	0	
49	1	Região 5-Rio Itaquara-Mod1	1	1	

Nome: Bacia do Jauru Nome Arquivo: Jauru SubBacia Estação Sedim: 17 SubBacia Estação Vazão: 11 Qt. SubBacias: 259 Qt. HRU: 1500

Path do Projeto SWAT: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova\Mod3

Path TxtInOut (SWAT): D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova\Mod3\Scenarios\Default\TxtInOut

Path Arquivos Satélite: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova

Path Arquivos Estações: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova\Mod3\Config

Path Dados Estatísticos: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova\Estatisticas

Path Resultados do Modelo: D:\Doutorado\FURB\Tese\Sub_Modelos\Regiao1_Nova\Mod3\Resultados

Período de Calibração	Período de Validação	Período Clima	Período Vazão	Período Sedimentos
01/01/1997-31/12/2003	01/01/2007-31/12/2012	01/01/1995-31/07/2013	01/01/1994-31/12/2000	01/01/1995-31/12/2019

Estação Clima	Estação Vazão	Estação Sedimentos	Ano Uso da Terra	Última Calibração	BD. SWAT
3296	66071400	66071382	1998	4/14/2024 6:51:44 PM	Mod3.mdb

Observações: período completo: 01/01/1997-31/12/2012
 calib 01/01/1997-31/12/2006 valid: 01/01/2007-31/12/2012
 SB 258 - sedim mais a jusante
 Calib: 12

Incluir Gravar Atualiza Uso, Solo e Decliv nas HRUs Atualizar SubBacias e HRUs

Backup Calibração Original Configuração para Execução do SWAT Configuração de Solo Duplicar Modelo BIBIn21 Visualizar: de uso da terra, solo e declividade

A área em vermelho representa os projetos dentro do sistema e a área verde representa os modelos dentro do projeto. Além do nome do projeto, inclui-se também algumas informações para detalhar o projeto, localização, data, autores e cidades envolvidas. A área dos modelos já possui mais informações por razão óbvia, que irá controlar várias configurações. Destaca-se nesse cadastro, as pastas de controle do SWAT, os períodos de calibração e validação das simulações, identificação das estações de dados, quantidade de subbacias e HRUs entre outros.

Dados de Entrada

Esse módulo propõe o controle de dados hidrológicos e climatológicos. Possibilita a importação dos dados para ser incluído nos modelos. A estrutura da base de vazão e sedimento são iguais, diferenciando apenas com um recurso para interpolação de sedimentos através da regressão matemática. A Figura F 3 apresenta a tela de controle de sedimentos, onde na parte superior possui os dados das estações e na parte inferior os dados da série histórica de cada estação.

Figura F 3 - Tela de controle de dados de entrada para sedimentos

The screenshot displays the 'Dados Hidrológicos e Qualidade' application window. It features a top navigation bar with tabs for 'Importação de Dados de Estação', 'Importação de Séries Históricas', 'Exportação de Dados', and 'Curva Chave de Sedimentos'. The main area is divided into two sections:

Estações

Id_Estacao	Código	Nome	Tipo	Latitude	Longitude	Altitude	AreaDrenagem (ha)	Estado	Responsavel	Uso	Inicio_Monit	Fim_Monit	QRegSerie
5267	66470000	SÃO JOSÉ DO BORIRÉU	Sedimentos	-16.9253	-56.2236	160	24100	MT		N	6/26/2008	6/16/2022	36
5268	66492000	CGH AQUARIUS MONTANTE	Sedimentos	-17.6175	-54.8867	263	327	MS		N	7/10/2014	10/10/2019	24
5269	66522000	UHE ITIQUIRA MONTANTE	Sedimentos	-17.1386	-54.8192	160	5280	MT		N	4/18/2012	2/26/2013	5
5270	66525100	UHE ITIQUIRA JUSANTE	Sedimentos	-17.0953	-54.9361	417	4910	MT		N	4/18/2012	2/26/2013	4
5271	66600000	SÃO JERÔNIMO	Sedimentos	-17.2017	-56.0086	112	23300	MT		N	4/4/2000	6/23/2022	70
5272	66650000	SÃO JOSÉ DO PIQUIRI	Sedimentos	-17.2917	-56.3872	150	30000	MT		N	11/9/2005	6/24/2022	45
5273	66750000	PORTO DO ALEGRE	Sedimentos	-17.6233	-56.9655	91	103000	MS		N	11/8/2005	6/25/2022	51
5274	66800000	AMOLAR	Sedimentos	-18.0386	-57.4886	85	234000	MS		N	6/30/2007	4/22/2022	42

Importação de Dados da Estação

Id_Sedimento	Id_Estacao	Data	Sedimento	Cota	Vazao	Tipo Sedm_Tmp	Campo 1
489297	5267	6/26/2008	166.65	1.83	217	O	0
489694	5267	9/24/2008	139.92	0.92	191	O	0
490171	5267	3/31/2009	365.6	3.3	107	O	0
490697	5267	7/23/2009	125.67	1.38	228	O	0
491055	5267	10/19/2009	109.04	1.14	3994750977	O	0
491426	5267	1/25/2010	166.52	3.34	0007324219	O	0
492019	5267	5/12/2010	118.52	2.33	5003662109	O	0
492020	5267	5/12/2010	118.52	2.33	258	O	0
494318	5267	8/26/2011	84.87	1.04	2997436523	O	0
494870	5267	11/23/2011	148.9	1.31	0999758899	O	0
495853	5267	4/20/2012	162.8	2.63	9000244141	O	0
496503	5267	7/16/2012	80	1.57	5999145508	O	0
497903	5267	3/12/2013	335.6	3.37	7990722656	O	0
498405	5267	6/7/2013	351.6	2.83	1201171875	O	0
498920	5267	8/28/2013	76	1.13	4998168945	O	0
499856	5267	2/10/2014	319.1	3.24	3005371094	O	0
501758	5267	6/19/2014	194	2.45	0944767695	O	0

The interface also includes a SQL query editor at the bottom with the following text:

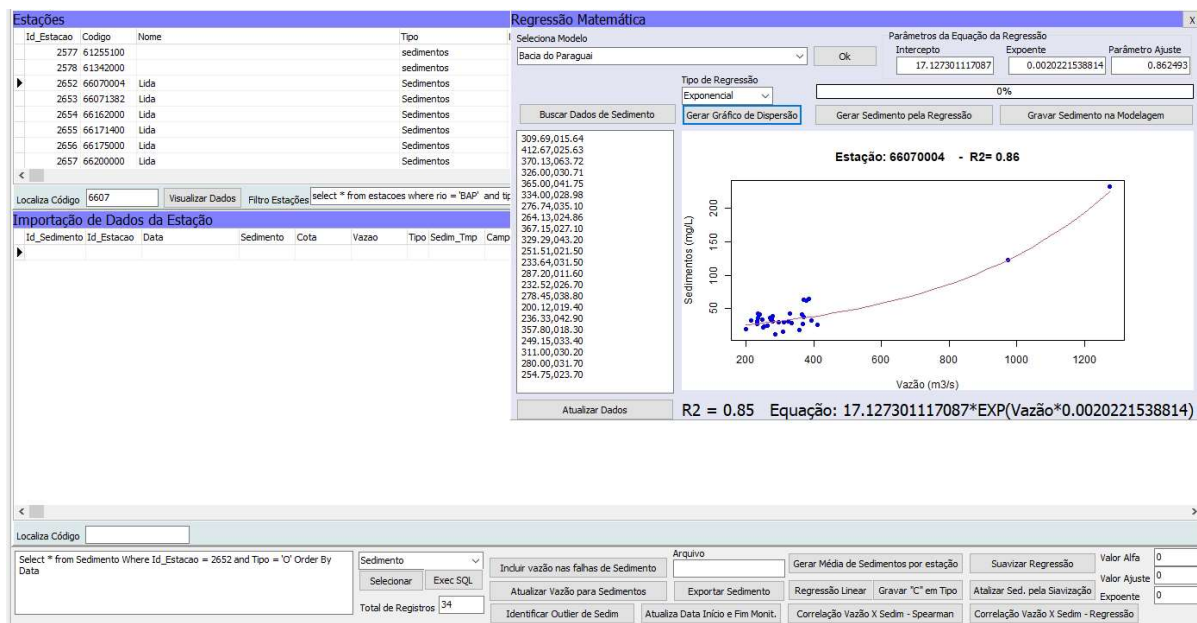
```

Select * from Sedimento
where id_Estacao = 2652 and TIPO = 'O'
order by data
update Sedimento set Sedimento=0.6022*Vazao+(1-0.6022)*109.2893-1
  
```

Additional controls include buttons for 'Selecionar', 'Exec SQL', 'Atualizar Vazão para Sedimentos', 'Exportar Sedimento', 'Regressão Linear', 'Gravar "C" em Tipo', 'Atualizar Sed. pela Sieravização', 'Expoente', 'Identificar Outlier de Sedim', 'Atualiza Data Início e Fim Monit.', 'Correlação Vazão X Sedim - Spearman', and 'Correlação Vazão X Sedim - Regressão'. There are also input fields for 'Arquivo', 'Gerar Média de Sedimentos por estação', 'Suavizar Regressão', 'Valor Alfa', 'Valor Ajuste', and 'Total de Registros'.

Para dados de sedimento que não possui série histórica diária, o sistema permite fazer a interpolação de dados a partir da regressão linear ou exponencial. Após gerar a regressão e calcular a equação da curva, a mesma é aplicada na base de dados gerando os novos dados de sedimento preenchendo os dados diários. A Figura F 4 destaca a área da regressão para interpolação de dados.

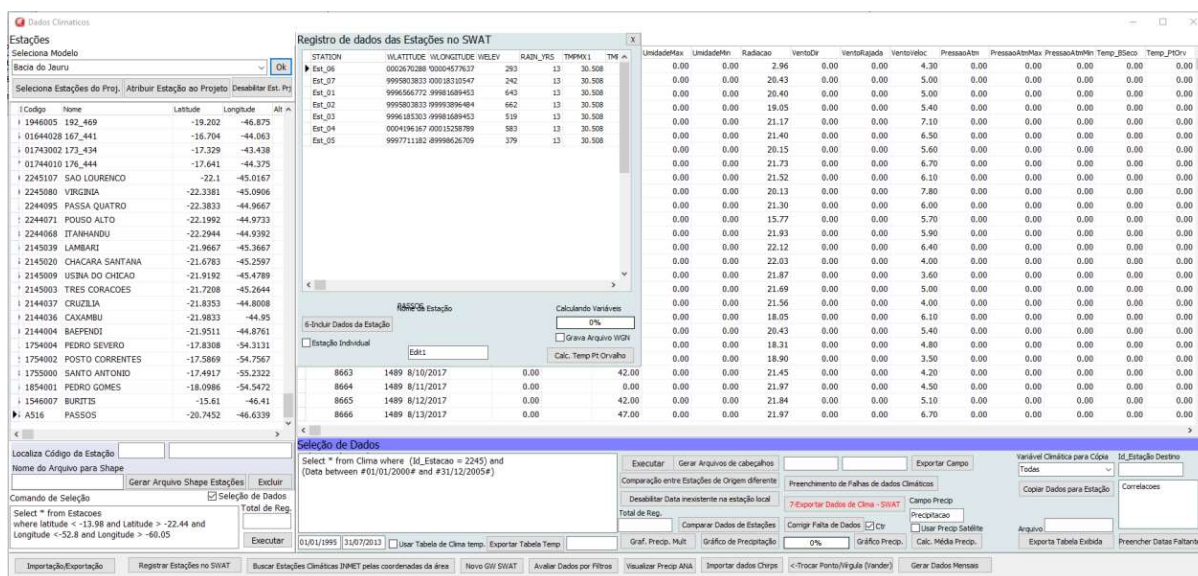
Figura F 4 - Tela com destaque para regressão de dados de sedimento



Para os dados climatológicos, o módulo apresenta diversos recursos, desde a importação de bases externas até os cálculos específicos como as variáveis climáticas apresentadas na Figura F 5, que será exportado para o SWAT. Essa estrutura é controlada basicamente por duas tabelas. Uma referente aos dados das estações, como latitude, longitude e altitude que são dados cruciais para as modelagens. E a outra tabela com os dados da série histórica das estações. Na série histórica, já inclui todas as variáveis climáticas necessárias à modelagem, como: precipitação, umidade, radiação, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento.

Com os dados importados, o sistema exporta os cálculos das variáveis necessárias direto para a base de dados do SWAT. A Figura F 5 apresenta a tela de dados climáticos, sendo a área da esquerda com dados das estações e na direita os dados da série histórica com um destaque para os dados calculados que serão exportados para o SWAT.

Figura F 5 - Tela de dados climáticos



Modelagem

A modelagem é controlada por duas seções: Uma para executar a calibração e validação e outra para calcular a eficiência da simulação.

Calibração/Validação

A primeira etapa da calibração é definir quais parâmetros farão parte do processo. Essa definição parte do pressuposto que a tabela geral com todos os parâmetros esteja cadastrada. Na tabela geral de parâmetros, cadastra-se o nome, o grupo, os limites inferiores e superiores e o valor padrão do SWAT. O nome do parâmetro deve ser igual ao definido pelo SWAT. O Grupo representa o tipo de arquivo do SWAT a qual o parâmetro pertence, pois um determinado grupo de parâmetros será gravado em um arquivo padronizado do SWAT. Por exemplo: parâmetros do grupo de HRU serão gravados em arquivos com extensão (.HRU).

Ao incluir os parâmetros que serão associados ao modelo em desenvolvimento, o sistema atribui o valor padrão do SWAT. Com a inclusão dos parâmetros de interesse em calibrar, atribui novos valores que deseja para que o modelo SWAT considere no processo de simulação. Com todos os parâmetros ajustados, executa-se a gravação dos dados nos arquivos do modelo SWAT. Após a gravação, inicia-se a execução do modelo SWAT. Nesse procedimento, o sistema acessa o modelo SWAT e começa a executá-lo. Será aberto uma tela do modelo SWAT exibindo a execução por cada ano do período de calibração. A Figura F 6 apresenta os detalhes do módulo de modelagem, especificamente a calibração/validação.

Figura F 6 - Tela de processamento da calibração/validação do modelo

The screenshot displays the SWAT calibration/validity processing interface. Key components include:

- Lista de Variáveis Calibráveis do SWAT:** A table listing parameters with columns for Name, Group, Limit, and Value. A red box highlights this table.
- Variáveis Calibradas para o Modelo:** A table showing parameters selected for calibration, with a green box highlighting it.
- Calibration Results:** A table titled 'Eficiências das Calibrações' showing efficiency metrics for various calibration runs.
- Validation Results:** A table titled 'Eficiências das Validações' showing efficiency metrics for validation runs.
- Configuration and Controls:** Various panels on the left and right for model selection, variable selection, and simulation control.

O destaque em vermelho representa a tabela geral de parâmetros do SWAT com os limites e valores padrões. A área em verde é a tabela de parâmetros que serão aplicados aos modelos para calibração/validação. Em azul é o registro com os coeficientes de eficiência após a calibração/validação. O sistema permite criar várias simulações de calibração para acompanhamento da evolução dos processos. Cada uma dessas simulações podendo ter valores diferentes dos parâmetros ajustados. Com isso, pode analisar as eficiências em função dos ajustes. A área em amarelo controla cada simulação configurada. Vale ressaltar que essa nomenclatura de simulação nesse contexto refere-se a um grupo de parâmetros ajustados que poderá ser considerado o melhor dos ajustes durante várias execuções do modelo SWAT.

Além do processo manual de calibração apresentado anteriormente, com ajuste individual dos parâmetros, o sistema permite automatizar esse processo com duas possibilidades de configuração. 1) Otimização aleatória: define-se quais parâmetros serão ajustados e a faixa de valores de interesse. Não necessariamente precisa ser o limite definido pelo modelo SWAT. 2) Otimização incremental: Define-se um percentual de incremento que será aplicado nos parâmetros a cada ciclo de execução. Em seguida define-se um limite aceitável dos coeficientes Nash e KGE para que o sistema interrompa a otimização quando os resultados chegarem nesse limite. Quando a otimização é executada, o sistema ajusta os parâmetros, grava no SWAT, executa o SWAT, importa os resultados, calcula os coeficientes de eficiência e registra os resultados. Essa sequência de processos que foram feitas manualmente

são automatizados para poupar esforços no primeiro momento. A Figura F 7 mostra a tela para otimização com as possíveis configurações apresentadas.

Figura F 7 - Tela de calibração com recurso de otimização

The screenshot displays the SWAT calibration software interface. It features several key components:

- Seleção de Variáveis de Calibração:** A panel on the left for selecting calibration variables, including options like 'Select * from VarCalibraco' and 'update VarCalibraco set NomeVar = Upper(nomevar)'.
- Lista de Variáveis Calibráveis do SWAT:** A table listing variables such as SLSOIL, FLD_FR, SLSUBSN, SURLAG, DIS_STREAM, EVPOT, and OV_N, with columns for NomeVar, Grupo, LimiteInf, LimiteSup, ValorDefault, and Tipovar.
- Variáveis Calibradas para o Modelo:** A table showing calibrated parameters like ALPHA_BF, ALPHA_BF_D, CANMX, CH_K2, CH_L2, CH_N2, CN2, DIS_STREAM, EPCO, ESCO, and EVPOT, with columns for X, Cod_Calb, Grupo, NomeVar, and Valor.
- Otimização de Parâmetro para Calibração:** A table for parameter optimization, listing parameters like GW_ALPHA_BF, GW_ALPHA_BF_D, HRU_CANMX, RTE_CH_K2, RTE_CH_L2, RTE_CH_N2, MGT_CN2, HRU_DIS_STREAM, HRU_EPCO, HRU_ESCO, HRU_EVPOT, GW_GW_DELAY, GW_GW_REVP, GW_GWQMN, SOL_KSAT, HRU_LAT_SED, HRU_LAT_TIME, HRU_DW_N, GW_RCHRC_DP, GW_REVPAMN, and HRU_SED_CON, with columns for Grupo, NomeVar, ValorMin, ValorMax, and Decimas.
- Referência para Índice de Eficiência:** A dialog box for selecting efficiency indices, with options for Nash and KGE, and checkboxes for 'Vazão', 'Sedimento', and 'Vazão Sedimento'.
- Configuração de Reservatórios:** A panel at the bottom left for configuring reservoir data, including a table with columns for Cod_Calb, NashVazao, KGEVazao, WilmoVazao, PbiasVazao, NashSedim, KGESedim, WilmoSedim, PbiasSedim, MedaVazaoObs, MedaVazaoSim, MedaSedimObs, MedaSedimSim, MaorVazaoObs, MaorVazaoSim, MaorSedimObs, MaorSedimSim, MemorVazaoObs, MemorVazaoSim, and MemorSedim.

Ainda na calibração, existe um submódulo para configurar dados de reservatório, caso exista na bacia simulada. Para isso inclui-se todos os reservatórios na tabela e define-se os dados necessários para a calibração (Figura F 8).

Figura F 8 - Tela de configuração de reservatórios

The screenshot displays the 'Calibração' (Calibration) window of the SWAT software. It is divided into several panels:

- Seleção de Reservatórios:** A table for selecting reservoirs with columns for Name, Area, and other parameters. Reservoirs listed include Juba I, Juba II, Graça Brenand, Pamparna, Maracaná, Sapó, Diamante, and Santana.
- Configuração de Reservatórios:** A detailed configuration panel with a monthly grid for parameters like 'Vazão Mínima' (Minimum Flow) and 'Média retratada de água do reservatório' (Reservoir water retention average). It also includes a section for 'Média diária mensal para saída do reservatório' (Monthly average daily outflow) with a table of calculated values.
- Seleção de Variáveis de Calibração:** Panels for selecting calibration variables and parameters to be optimized.
- Gráficos e Resultados:** A section for generating reports and visualizations, including a table for 'Eficiências das Validações' (Validation Efficiencies).

The 'Eficiências das Validações' table is as follows:

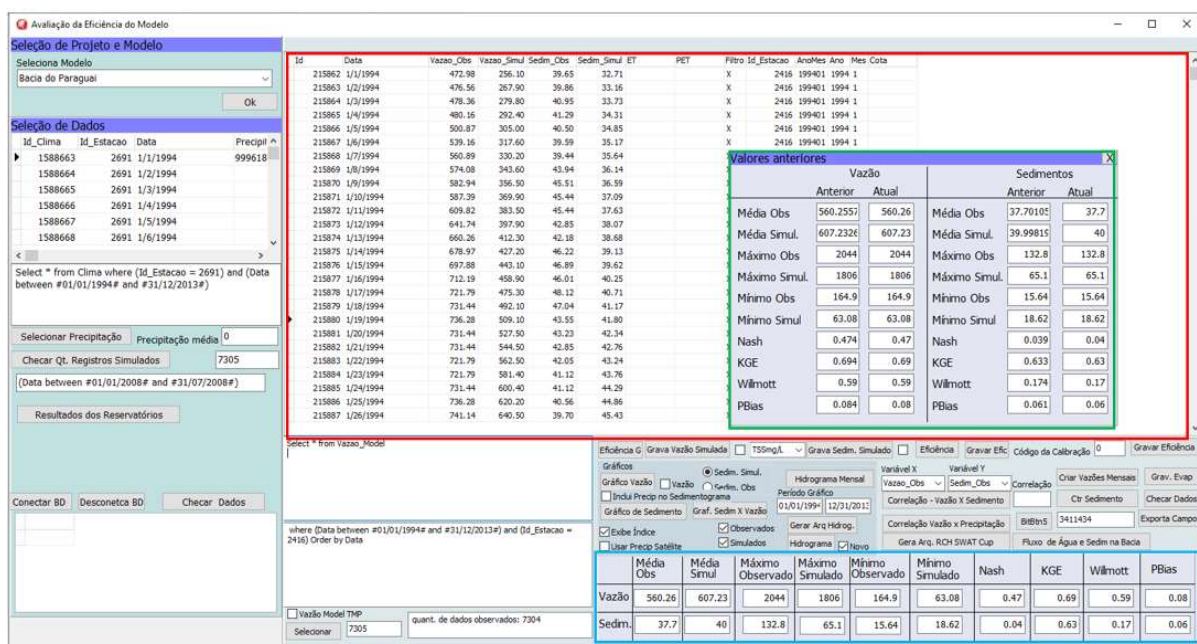
Cod_Calb	NashVazao	KGEVazao	WillmottVazao	PBIasVazao	NashSedim	KGESedim	WillmottSedim	PBIasSedim	MediaVazaoObs	MediaVazaoSimul	MediaSedimObs	MediaSedimSimul	MaiorVazaoObs	MaiorVazaoSimul	MaiorSedimObs	MaiorSedimSimul	MenorVazaoObs	MenorVazaoSimul	MenorSedimObs	MenorSedimSimul	
1	0.52	0.724	0.654	0.02	0.068	0.644	0.235	0.043	580.77	593.50	1798596.12	1899	5158806.35	1522	2044	1806	132.8	64.14	205.3	63.08	15
2	0.27	0.621	0.247	0.11	-0.14	0.331	-0.08	0.048	519.91	576.98	176426700371	1967066370	1995	1664	1806	116.3	62.97	164.9	63.08	2	

Eficiência da modelagem

Após a execução do modelo SWAT na etapa de calibração, deve-se avaliar se a calibração ficou bem ajustada, com o uso da aplicação dos coeficientes de eficiência, como: Nash, KGE, Willmott e pBias.

No processo de cadastro, o qual foi definido a estação fluviométrica de vazão e sedimento, o sistema automaticamente traz os dados dessas estações para a área de avaliação da eficiência. A avaliação da eficiência é uma comparação dos dados observados com os dados simulados. Nesse módulo ao executar o processo de cálculo de eficiência, o sistema vai na base de dados do modelo SWAT e importa os dados simulados, gravando-os na tabela de análise apresentado na Figura F 9 e já executa os cálculos dos coeficientes. Ao término, apresenta-se uma janela de resultados, mantendo-se os resultados atuais e anteriores para facilitar a análise em relação ao último ajuste de parâmetros. Assim o usuário poderá saber de imediato se a mudança que fez melhorou ou não em relação ao ajuste anterior.

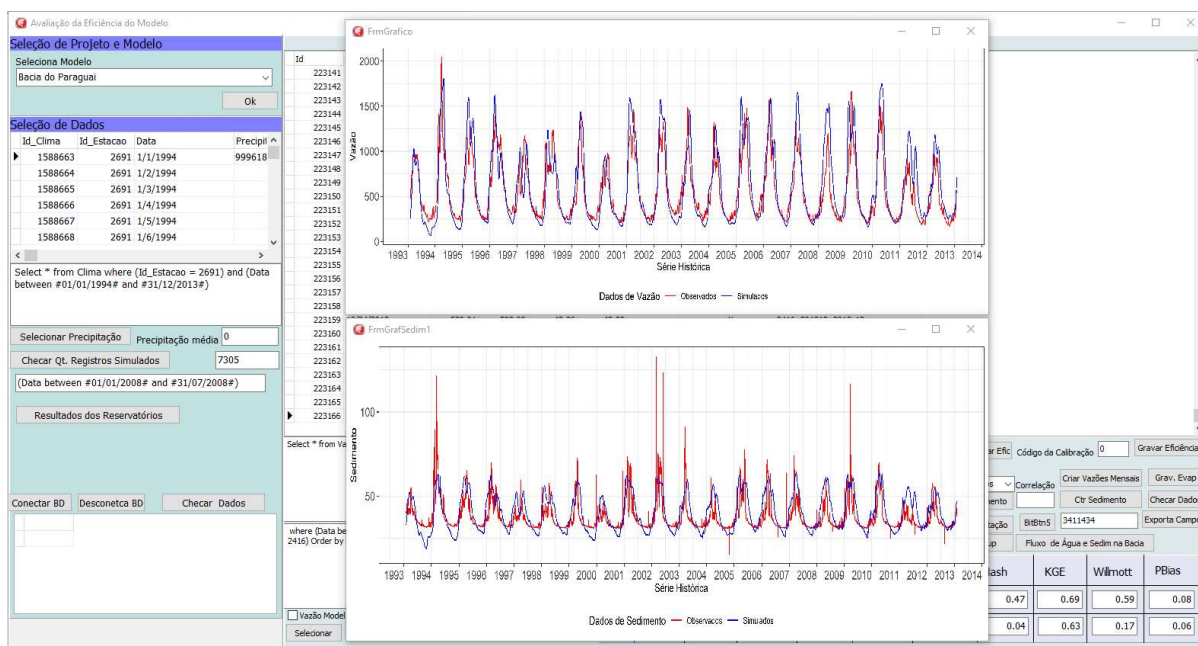
Figura F 9 - Tela de cálculo de eficiência do modelo



A área em vermelho representa a tabela com dados da série histórica com vazão e sedimento observados e simulados. Em verde a janela de resultados no momento que conclui os cálculos de eficiência da simulação. Em azul são os mesmos resultados que ficam gravados no sistema relacionado ao modelo em uso. Além dos coeficientes de eficiência, o sistema apresenta os resultados de média, valor máximo e valor mínimo de vazão e sedimento, observado e simulado para contribuir com as interpretações.

Além desses resultados, o sistema permite visualizar o hidrograma e o sedimentograma para análise visual das curvas observadas e simuladas (Figura F 10).

Figura F 10 - Tela com destaque para hidrograma e sedimentograma



Resultados

Esse módulo traz a possibilidade de acessar algumas bases de dados geradas pelo modelo SWAT para obter informações que contribuíram para as análises dos objetivos do estudo. Como o foco do estudo está nos dados sedimentológicos, foi criado alguns recursos para exportar dados de resultados do modelo SWAT e assim seguir com outras operações de análises.

A primeira base é o arquivo de HRUs que contém vários dados como as características de cada HRU como: uso e ocupação da terra, solo e declividade, bem como as áreas de cada um (Figura F 11).

Figura F 11 - Tabela com dados das HRUs

The screenshot shows the 'Saídas SWAT' window in the SWAT software. The window title is 'Seleção de Projeto e Modelo'. It features a 'Seleção Modelo' dropdown menu set to 'Bacia do Jauru' and an 'Ok' button. Below this, a SQL query editor contains the text 'select * from HRUs'. To the right of the query editor is a 'Tabela' dropdown menu and an 'Executar SQL' button. Further right, there is a text area containing a complex SQL query: 'select year(data), Subbacia, avg(area) as area, sum(Sedim_IN) as Sedm_IN, sum(Sedim_OUT) as Sedm_OUT, (sum(Sedim_IN)-sum(Sedim_OUT)) as Prod_SB from SEdim_Producao group by year(data), subbacia'. Below the query editor, a table displays the results of the query. The table has columns: 'OID', 'SUBBASIN', 'ARSUB', 'LANDUSE', 'ARLU', 'SOIL', 'ARSO', 'SLP', 'ARSLP', 'SLOPE', 'UNIQECOMB', 'HRU_ID', and 'HRU_GIS'. The table contains 37 rows of data. On the right side of the window, there are two checkboxes: 'Gerar SubBacias a Montante' (checked) and 'Gerar para todos reservatórios'. At the bottom of the window, there are several buttons: 'Ler Arquivo Saída', 'Qt. Registro', 'Distribuição de uso da terra nas sub bacias a montante', 'Gravar Data Output.HRU', 'Gravar Data Output.SED', and 'Gravar Data Output.SUB'. The 'Qt. Registro' button shows '0%'. The 'Distribuição de uso da terra...' button has a small table with one row and two columns.

Outra base importante para acesso é a base de subbacias. Entre os dados contidos nessa base, é a possibilidade de identificar a ordem de fluxo de jusante a montante. Com isso, é possível também identificar todas as subbacias a montante a partir da escolha de uma específica. Recurso útil para avaliar parte da região em função do fluxo hídrico.

A partir dos dados das HRUs, gera arquivos em formato CSV com as taxas de produção de sedimento que foram as bases principais nas análises do estudo. Essas exportações foram geradas em formato CSV para facilitar o uso do software R para a execução de diversos scripts e geração de outros resultados.

A partir dessas bases foram também gerados os arquivos com os percentuais de área por cada classe de uso e ocupação da terra, solo e declividade.

Outra base de resultados importante para as análises dentro do projeto, foram os resultados referentes aos reservatórios, onde a partir da produção de sedimento por subbacia, possibilitou a seleção das subbacias nas saídas dos reservatórios e avaliar os valores antes e depois das instalações. Os resultados são gravados em função de todo o período da simulação.

Configurações de uso da terra e solo

Uma das partes de configuração do sistema é o controle dos dados de uso e ocupação da terra e tipos de solos. O sistema possui um cadastro completo dos usos e ocupação da terra com base no MapBiomias para definir todas as classes aplicadas no modelo (Figura F 12). É possível reclassificar essa base para atender de maneira específica os interesses do estudo.

Para os tipos de solo, determina-se as classes envolvidas no modelo e permite as configurações detalhadas para as características do solo em cada camada (Figura F 13). Todos esses dados são exportados para o modelo SWAT de forma automática para os devidos locais de processamento.

Figura F 12 - Tela de configuração de uso e ocupação da terra e solo

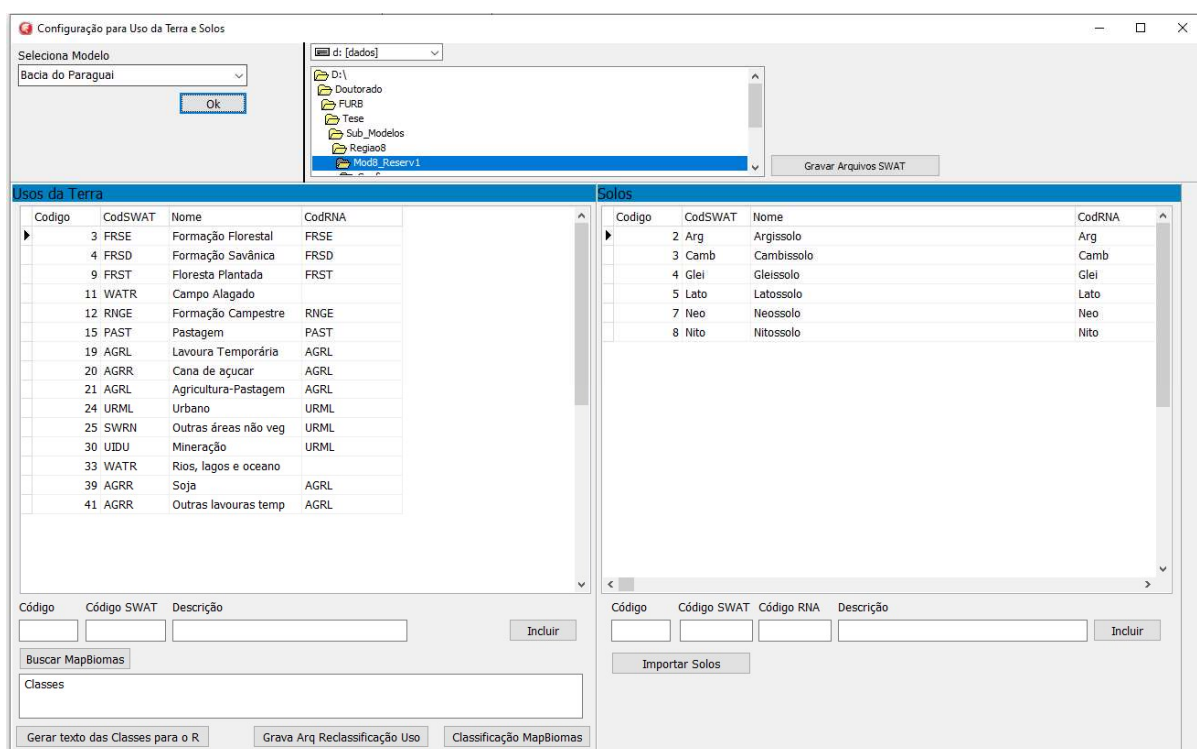


Figura F 13 - Tela específica de configuração das características do solo

Nome	CodSWAT	Descrição	Qt. Camadas	Grupo Solo	Textura	Anion_Excl	Sol_CRK	Ksat
Argissolo	Arg	Argissolo	1	A	L	0.6	0.7	
Nitossolo	Nito							
Cambissolo	Camb							
Neossolo	Neo							
Gleissolo	Glei							
Latossolo	Lato							

Camada	Profundidade (m)	Carbono Org.(%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Rocha (%)	SubBacias
Camada: 1	15	2	23	22	55	1	100
Camada: 2	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 3	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 4	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 5	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 6	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 7	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 8	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 9	0	0	0	0	0	0	0
Camada: 10	0	0	0	0	0	0	0

Considerações finais

O sistema está em uma fase ainda de organização de estrutura de tela, para uma possível liberação para uso de outros pesquisadores. O desenvolvimento do sistema se deu à medida que foram aparecendo as necessidades urgentes e novas ideias de recursos. Especialmente no módulo de resultados que de uma certa forma, existem vários resultados que são extraídos nos módulos operacionais.

De qualquer maneira, o sistema será continuado e ajustado para possibilidade de uso de outros pesquisadores. Além de uma expectativa futura de fazer com o sistema tenha também a parte de geoprocessamento. Pois no atual momento, a dinâmica de modelagem, utiliza o QSWAT que é a versão para o QGIS na parte inicial de preparação dos mapas.