

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Tese

**Identificação das Fontes de Sedimentos na Avaliação da Sustentabilidade
Ambiental de uma Bacia Hidrográfica**

Celso Elias Corradi

Pelotas. 2024

Celso Elias Corradi

**Identificação das Fontes de Sedimentos na Avaliação da Sustentabilidade
Ambiental de uma Bacia Hidrográfica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares.

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Miguel.

Pelotas.2024

Ficha catalográfica

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

C823i Corradi, Celso Elias

Identificação das fontes de sedimentos na avaliação da sustentabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica [recurso eletrônico] / Celso Elias Corradi ; Vitor Emanuel Quevedo Tavares, Pablo Miguel, orientadores. — Pelotas, 2024.
88 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Bacia hidrográfica. 2. Gestão e manejo. 3. Sedimentos. 4. Método Fingerprinting. 5. Watershed Sustainability Index – WSI.. I. Tavares, Vitor Emanuel Quevedo, orient. II. Miguel, Pablo, orient. III. Título.

CDD 333.917

Elaborada por Ubirajara Buddin Cruz CRB: 10/901

Celso Elias Corradi

Identificação das Fontes de Sedimentos na Avaliação da Sustentabilidade Ambiental
de uma Bacia Hidrográfica

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências,
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água,
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 31 de janeiro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares (Orientador). Doutor em Ciências pela
Universidade Federal de Pelotas.

Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig. Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Luís Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki. Doutor em Engenharia Florestal pela
Universidade Federal de Santa Maria.

Dr. Stefan Domingues Nachtigall. Doutor em Ciências pela Universidade Federal de
Pelotas.

**Sonia minha mulher,
razão do meu esforço.**

Agradecimentos

Na minha idade os agradecimentos se apresentam em duas etapas, a primeira é agradecer aqueles que me permitiram chegar neste ponto da minha vida. Sendo assim, começo pelos meus pais Celso e Laura, que durante todo o tempo que compartilhamos de suas presenças nesta vida, me ensinaram o que é o amor, o respeito, a ética, no convívio com o próximo. Mas o que de mais importante que os dois me deram foi a minha irmã Analaura, uma mulher forte sempre a frente do seu tempo, que eu amo muito e que gostaria de ter um pouco da sua coragem de enfrentamento na vida.

Falando em mulher forte chego na minha Sonia, mulher que é a razão de tudo isso, muito tenho que agradecer por permitir realizar meus sonhos, que em muitas vezes não eram os seus, mas suas maiores contribuições para o sucesso de minha vida foram os nossos filhos Rodrigo e Lilian, que agradeço por serem pessoas dignas, honestas e que construíram suas famílias que só vieram a somar em alegria e felicidade. A vida nos oferece a possibilidade de agregar novos membros a família, desta forma, muito agradeço ao Monteiro a Lucinha por todo o apoio e amor compartilhado.

Não estaria no doutorado sem passar pelo mestrado, por isso, muito agradeço ao Dr. Luiz Felipe Hax Niencheski, por permitir ter seu nome na minha dissertação de mestrado como orientador, mas agradeço, mais ainda, ao Felipe, Bruno, André e Sidi, por compartilhar da amizade, que me dá condições de levar a vida no Happy.

Chego no agora.

Agradeço através do Prof. Dr. João Koglin, aos meus colegas do Curso de Bacharelado em Gestão Ambiental, pelo desprendimento na minha licença para realizar este doutorado.

Agradeço de forma muito sincera ao meu orientador Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares e ao Coorientador Prof. Dr. Pablo Miguel pela condução coerente e firme desta tese. Duas personalidades distintas no convívio, o primeiro um exímio jogador de xadrez, o outro um exímio treinador de um time de futebol, ambos fantásticos e que me permitiram ao final dessa jornada considerá-los muito mais que orientadores, meus amigos.

Na pessoa da Professora Dr^a Maria Cândida Nunes, agradeço todo o corpo docente do Programa de Pós- Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da

Água, pela dedicação a mim demonstrada. Não poderia deixar de agradecer o apoio e a dedicação que a nossa secretária Josiele Garcia Dutra, teve comigo nestes últimos anos.

Sem dados não temos como elaborar nossos pensamentos, agradeço ao SANEP, na pessoa da bióloga Letícia do Nascimento, os dados de qualidade de água fornecidos, da mesma forma agradeço ao Técnico em Química Dr. Rafael Francisco dos Santos da Central Analítica da UFFS - Campus Erechim, pela dedicação e profissionalismo nas análises químicas de solo e sedimentos desta tese.

Parte da minha tese se deve a generosidade da Dr^a. Eliana Aparecida Cadoná, a quem devo agradecer sua compreensão, orientação e apoio, minha eterna amizade.

Ser professor traz algumas compensações uma delas é ver seu aluno evoluir e superar os objetivos, agradeço a minha ex-aluna e atual colega Mélory Maria Fernandes de Araújo pelo apoio e paciência que teve comigo.

Certamente o convívio no Laboratório de Pedologia foi uma das coisas mais rejuvenescedoras desta caminhada, agradeço ao Diego, Stefan, Adão e toda a gurizada, pela paciência e o vigor juvenil a mim dedicado.

Por fim, na certeza de que sem o amor de Deus nada seria possível, Lhe agradeço.

Resumo

CORRADI, Celso Elias. **Identificação das fontes de sedimentos na avaliação da sustentabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica**. Orientador: Vitor Emanuel Quevedo Tavares. Coorientador: Pablo Miguel. 2024. 88 f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Tendo a bacia hidrográfica como uma unidade básica de gestão ambiental, tem-se que levar em conta a íntima relação entre o solo e o ciclo hidrológico, que tem na erosão, seu mais contundente efeito. A identificação das fontes de produção de sedimentos, em uma bacia hidrográfica, permite o desenvolvimento de estratégias de mitigação destes efeitos. O método do *Fingerprinting*, baseado na utilização de traçadores geoquímicos, vem se apresentando como um instrumento de grande valia na identificação das fontes dos sedimentos. Na equação da sustentabilidade de uma região, o Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas (*Watershed Sustainability Index* – WSI) se apresenta como uma alternativa viável para a avaliação de sustentabilidade de uma bacia hidrográfica. Esse trabalho está estruturado em dois capítulos, o primeiro aborda a utilização da metodologia *Fingerprinting* para a identificação de fontes de produção de sedimentos através de variáveis geoquímicas, em uma bacia hidrográfica situada no sul do Rio Grande do Sul. O segundo trata da aplicação do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas, adaptado para a consideração da qualidade dos sedimentos, no estudo da sustentabilidade ambiental na mesma bacia. A bacia selecionada foi a bacia hidrográfica do arroio Epaminondas, que corresponde a 70% da área de drenagem e abastecimento da bacia do Santa Bárbara, a qual é responsável por 60% do abastecimento da área urbana do município de Pelotas. A bacia estudada possui área de 33 km² e suas principais atividades estão associadas à agropecuária e atividades de mineração, contando, também, com sítios de lazer. Como resultados, tivemos no capítulo 1 que a técnica *Fingerprinting* se mostrou adequada para a identificação das fontes de produção de sedimentos na bacia analisada. O número de variáveis selecionadas se mostrou suficiente para permitir uma avaliação das contribuições das fontes de sedimento. A malha amostral demonstrou impacto positivo nos resultados observados através da distribuição dos pontos em função das áreas do estudo. No capítulo 2 o WSI da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas obtido foi de 0,57, considerado intermediário. Os indicadores Hidrológico (H) e Meio Ambiente (E), foram os que mais contribuíram para este enquadramento. A utilização da qualidade do sedimento, como um novo componente do indicador Hidrológico, não afetou de forma determinante o WSI da bacia. No entanto, a utilização deste parâmetro apresentou o potencial de ser mais representativo na mensuração da qualidade do ambiente das bacias a serem estudadas, principalmente aquelas com maior impacto antropogênico.

Palavras-chave: recursos hídricos; gestão e manejo; solos; método *Fingerprinting*; *Watershed Sustainability Index* – WSI.

Abstract

CORRADI, Celso Elias. **Identification of sediment sources in the assessment of environmental sustainability of a watershed**. Advisor: Vitor Emanuel Quevedo Tavares. Co-advisor: Pablo Miguel. 2024. 88 p. Thesis (Doctorate in Soil and Water Management and Conservation) – Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Considering the watershed as a fundamental unit of environmental management entails recognizing the intimate relationship between soil and the hydrological cycle, with erosion being its most pronounced effect. Identifying sediment sources within a watershed allows for the development of mitigation strategies for these effects. The Fingerprinting method, based on the use of geochemical tracers, proves to be a valuable tool in sediment source identification. Within the sustainability equation of a region, the Watershed Sustainability Index (WSI) emerges as a viable alternative for assessing watershed sustainability. This work comprises two chapters: the first discusses the utilization of the Fingerprinting methodology to identify sediment production sources through geochemical variables in a watershed located in southern Rio Grande do Sul. The second chapter explores the application of the Watershed Sustainability Index, adapted to consider sediment quality, in assessing environmental sustainability within the same watershed. The selected watershed was that of the Epaminondas stream, which accounts for 70% of the drainage area and supply of the Santa Bárbara basin, responsible for 60% of the urban supply in the municipality of Pelotas. With an area of 33 km², the studied basin's primary activities include agriculture, livestock farming, mining, and leisure sites. In chapter 1, results indicate that the Fingerprinting technique proved suitable for identifying sediment production sources in the analyzed basin. The selected variables were sufficient to assess sediment source contributions, and the sampling grid positively impacted the results by distributing points according to study areas. In Chapter 2, the WSI of the Epaminondas Stream Watershed was 0.57, considered intermediate. Hydrological (H) and Environmental (E) indicators contributed the most to this classification. Incorporating sediment quality as a new component of the Hydrological indicator did not decisively affect the WSI of the basin. However, this parameter showed potential to be more representative in measuring the environmental quality of studied basins, particularly those with greater anthropogenic impact.

Keywords: water resources; management; soil; Fingerprinting method; Watershed Sustainability Index – WSI.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas.....	26
Figura 2 – Solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas	27
Figura 3 – Sub-áreas definidas na BHAE	29
Figura 4 – Localização dos Pontos de coleta	30
Figura 5 – Fixação de torpedos da área 3	31
Figura 6 – Modelo de Torpedo utilizado nas coletas de sedimentos.	31
Figura 7 – Bancada de pesagem das amostras	33
Figura 8 – Coleta dos ácidos.....	34
Figura 9 – Adição do ácido nítrico e clorídrico nos tubos do micro-ondas	35
Figura 10 – Processo de digestão no micro-ondas.....	36
Figura 11 – Micro-ondas com o rotor de amostras	36
Figura 12 – Amostras acondicionadas em frascos de polipropileno para análise no ICP-OES	37
Figura 13 – ICP-OES utilizado para as análises.....	37
Figura 14 – Resultados do pré-teste de conservação. Os elementos em verde foram pré-selecionados e os elementos em vermelho foram descartados.....	40
Figura 15 – As variáveis selecionadas no Teste H foram assinaladas em amarelo em cada área	45
Figura 16 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal- Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 1.....	48
Figura 17 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal- Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 2.....	48
Figura 18 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal- Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 3.....	49
Figura 19 – Estrutura dos indicadores que compõem o Índice de Sustentabilidade para Bacias Hidrográficas (WSI) da BHAE	55
Figura 20 – Classe de disponibilidade hídrica segundo Índice de Falkenmark	58
Figura 21 – Uso do solo na BHAE em 2019	62
Figura 22 – Uso do solo da BHAE em 2022	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Períodos de coletas dos sedimentos nos torpedos instalados.....	32
Tabela 2 – Número de amostras por área e por fonte.....	32
Tabela 3 – Valores de p da área 1 com a aplicação do teste Kruskal-Wallis (*) valores de $p < 0,1$ selecionando os Elementos Traçadores	41
Tabela 4 – Valores de p da área 2. com a aplicação do teste de Kruskal- Wallis (*) valores de $p < 0,1$ selecionando os Elementos Traçadores	42
Tabela 5 – Valores de p da área 3 com a aplicação do teste Kruskal- Wallis (*) valores de $p < 0.1$ selecionando os Elementos Traçadores.	43
Tabela 6 – Variáveis selecionadas na área1.....	46
Tabela 7 – Variáveis selecionadas na área 2.....	47
Tabela 8 – Variáveis selecionadas na área 3.....	47
Tabela 9 – Resultados das contribuições das fontes. Calha (CAL), Lavoura (LAV) e Campo (CAM), para os sedimentos com os valores do Critério Global de Qualidade de Ajuste (GOF) para cada subárea	50
Tabela 10 –Proporção entre lavoura e campo nas subáreas	50
Tabela 11 –Dados de precipitação pluviométrica e calendários agrícola para soja e milho referente ao período de estudo	51
Tabela 12 –Apresentação dos subíndices do parâmetro PRESSÃO com seus níveis e respectivos escores	57
Tabela 13 –Apresentação dos subíndices do parâmetro ESTADO com seus níveis e respectivos escores	59
Tabela 14 –Apresentação dos subíndices do parâmetro RESPOSTA com seus níveis e respectivos escores.	61
Tabela 15 –Valores dos sedimentos coletados no período relacionados como os níveis da Resolução do CONAMA nº454.Os valores são apresentados em mg/Kg.....	64
Tabela 16 –Resultados dos escores (Esc.) dos parâmetros do WSI da BHA	65

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Hipóteses.....	15
1.2	Objetivos.....	16
2	Revisão da literatura	17
2.1	Políticas ambientais	17
2.2	Bacias Hidrográficas	18
2.3	Indicadores de Sustentabilidade	19
2.4	Índice de Sustentabilidade de Bacia Hidrográfica - WSI	20
2.5	Método Fingerprinting	21
2.5.1	A espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES)	24
3	Caracterização da área de estudo	25
4	Capítulo 1 - Utilização da metodologia <i>Fingerprinting</i> na identificação dos traçadores, através do uso de variáveis geoquímicas, na bacia hidrográfica do arroio Epaminondas (BHAÉ).....	28
4.1	Introdução.....	28
4.2	Metodologia	28
4.2.1	Análises químicas.....	33
4.2.2	Método Fingerprinting	38
4.3	Resultado e discussão	39
4.4	Conclusão.....	52
5	Capítulo 2 - Estimativa do índice de sustentabilidade de bacias hidrográficas (Watershed Sustainability Index-WSI) adaptado para a bacia hidrográfica do arroio Epaminondas	53
5.1	Introdução.....	53
5.2	Metodologia	54
5.2.1	Parâmetro Pressão.....	56
5.2.2	Parâmetro Estado.....	57
5.2.3	Parâmetro Resposta.....	60
5.3	Resultados e discussão	61
5.4	Conclusão.....	66
6	Conclusão geral	68
	Referências.....	70
	Apêndices	76
	Apêndice A - Identificação dos frascos das amostras com as suas respectivas fontes	77
	Apêndice B - Valores brutos das análises químicas de solo e sedimento	78
	Apêndice C - Variação dos valores dos elementos no período de estudos do torpedo 2.....	82
	Apêndice D - Valores de IBPL. IETRAC. IITA, população, volume de água produzida, DA e DBO no período de estudo com suas variações	83
	Apêndice E - Variações dos usos do solo no período de estudo	84
	Apêndice F - Valores do IDH de Pelotas-RS no período de estudo.....	85

Apêndice G - Cálculos para aplicação do Índice de Falkenmark	86
Apêndice H - Valores dos elementos nos sedimentos, com a média e os escores	87
Apêndice I - Tabulação das respostas das entrevistas feitas para o estudo....	88

1 Introdução

O ser humano e o meio ambiente se apresentam, no nosso tempo, através dos meios de comunicação, como dois elementos conflitantes, por exemplo, Souza e Soares (2019) abordam o tema enfatizando que existe uma íntima relação entre o “mundo humano” e o “mundo natural”. No caso, o ser humano não se vê como um elemento pertencente ao mundo natural, sendo assim, ao prejudicar a natureza o homem não se sente intimamente atingido. É evidente que esta percepção da natureza está errada, deve-se entender que somos parte do mundo natural, e caso ele venha ser destruído, também o mundo humano será destruído, já que na realidade é um mundo só.

A conscientização dos indivíduos que formam a sociedade é crucial para compreender que a sobrevivência em um mundo depende intimamente da interconexão entre os elementos naturais e os seres vivos. O homem, nesse contexto, é apenas mais uma parte integrante desse delicado equilíbrio, pertencendo à natureza, em vez de reivindicar sua propriedade sobre ela. Reconhecer que a natureza é fundamental, torna-se essencial para assegurar um futuro sustentável e saudável para todos os habitantes deste planeta.

Esta interdependência se evidencia quando se leva os olhos para o setor agrícola, não há como dissociar um do outro, os fracassos ou sucessos no setor agrícola sempre estão associados a íntima relação homem/meio. Se faz necessário, então, ter uma gestão ambiental deste setor. As características da agricultura como atividade econômica são definidas por condicionantes de ordem ambiental e socioeconômica, que interagem no espaço agrícola. As atividades do agricultor não são isoladas, ele trabalha com sistemas de produção e sua propriedade está inserida num contexto mais amplo, que são as bacias hidrográficas (Santana, 2003).

A legislação brasileira é bem explícita em apresentar as bacias hidrográficas como uma unidade de gestão de recursos hídricos (Lei Federal n.º 9.433 de 8 de janeiro de 1997; Lei estadual do RS n.º 10.350 de 30 de dezembro de 1994). Percebe-se a preocupação legal que se deve ter à respeito da implementação da bacia hidrográfica como unidade básica de gestão ambiental (Bernardi *et al.*, 2013).

Tendo a bacia hidrográfica como uma unidade básica de Gestão Ambiental, a análise não pode se restringir somente aos recursos hídricos, tem que se levar em conta a íntima relação entre solo e o ciclo hidrológico, que tem na erosão, seu mais contundente efeito. O artigo 1º da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), ratificada em março de 2020, por 197 países, identifica a erosão do solo como a principal causa da degradação da terra, que por sua vez, contribui para a pobreza e a desigualdade por meio de seus efeitos (Borrelli *et al.*, 2020).

O ciclo hidrológico desempenha um papel significativo na erosão do solo, sendo as mudanças climáticas um possível catalisador desses processos. A análise das fontes de sedimentação em uma bacia hidrográfica é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação. O método *Fingerprinting*, baseado na utilização de traçadores geoquímicos, é uma ferramenta promissora para identificar a origem dos sedimentos e sua distribuição na bacia hidrográfica. Esta abordagem tem se mostrado eficaz na identificação das fontes de sedimentos que impactam os sistemas de drenagem e reservatórios em uma determinada bacia hidrográfica.

Com o conhecimento básico das características geoquímicas das fontes dos sedimentos, tais como, estradas, diferentes usos da terra em diferentes tipos de solos, canais fluviais, o método do *Fingerprinting* permite a identificação e quantificação destas diferentes fontes, medindo as propriedades, permitindo reconhecer sedimentos provenientes de diferentes áreas ou usos da terra.

A erosão e suas consequências são fatores que interagem na gestão ambiental de uma bacia hidrográfica. Um plano de gestão requer um conjunto de informações mais robusto para que venha ter os resultados esperados, com este propósito, e que se utiliza os indicadores de sustentabilidade como instrumento de gestão ambiental. E através das informações obtidas, mediante a utilização dos indicadores, que poderão ser subsidiadas nas etapas de planejamento, implantação e acompanhamento das políticas de gestão ambiental, voltadas ao uso racional dos recursos naturais e ao ordenamento das intervenções no meio ambiente.

O uso de indicadores vem se mostrando em constante evolução, organizações internacionais como as Nações Unidas (ONU), Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), já adotam modelos nas suas variáveis que permitem atender os objetivos de desenvolver estratégias para atingir um desenvolvimento sustentável de uma determinada região.

Considerando a bacia hidrográfica como uma unidade de gestão crucial, onde os recursos hídricos desempenham um papel fundamental na equação da sustentabilidade regional, o Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas (*Watershed Sustainability Index – WSI*) proposto por Chaves e Alipaz (2007) se apresenta como o mais indicado para a avaliação de sustentabilidade de uma bacia hidrográfica (Branchi, 2022).

A crescente urbanização no município de Pelotas (RS) tem causado um aumento da pressão sobre os recursos naturais. O uso inadequado das terras, provocando processos erosivos, causando redução da camada fértil do solo, além de comprometer a disponibilidade quantitativa e qualitativa de água nas bacias, devido ao transporte de sedimentos, agrotóxicos e nutrientes, especialmente, em regiões periurbanas, como é o caso da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAЕ), área deste estudo. Cientes da necessidade da utilização dessas informações e na procura de subsídios que ajudem na tomada de decisão ou na elaboração de políticas públicas, que esta pesquisa se apresenta.

Esse projeto está estruturado em dois capítulos, o primeiro visa utilizar a metodologia *Fingerprinting* para a identificação da contribuição das fontes de sedimentos aliando metodologias de obtenção de dados como variáveis geoquímicas. O segundo capítulo, trata da aplicação do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas no estudo da sustentabilidade ambiental da BHAЕ.

1.1 Hipóteses

Considerando os diferentes usos do solo na BHAЕ, podemos ter um ou mais elementos geoquímicos que podem se apresentar como traçadores das fontes de sedimentos da bacia.

A qualidade dos sedimentos da BHAЕ pode ser um importante indicador no Índice de Sustentabilidade dessa bacia.

1.2 Objetivos

Geral: correlacionar as fontes de produção de sedimentos com os processos de avaliação da sustentabilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAÉ).

Específicos:

- a) caracterizar quantitativamente o solo das fontes de produção de sedimentos e o próprio sedimento coletado em suspensão na calha das drenagens;
- b) determinar através de processamentos estatísticos, variáveis/elementos químicos mais estáveis, os quais possam ser usados como traçadores dos processos erosivos;
- c) aplicar o método *Fingerprinting* para determinar as proporções de contribuição de cada uma das fontes de produção de sedimentos que ocorrem na área de estudo;
- d) adaptar a metodologia do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas no estudo da sustentabilidade ambiental da BHAÉ;
- e) utilizar a qualidade dos sedimentos como mais um indicador do parâmetro hidrológico, aplicado no WSI.

2 Revisão da literatura

2.1 Políticas ambientais

As consequências da degradação dos recursos naturais promovida pelo acelerado processo de industrialização, crescimento populacional e aumento dos níveis de consumo desses recursos repercutiu, diretamente, na tomada de consciência pela sociedade mundial (Silva; Almeida, 2019). A distinção entre crescimento e desenvolvimento econômico foi um passo importante na gestão das políticas ambientais, já que, por muito tempo o crescimento econômico foi medido por um número, que é o Produto Interno Bruto (PIB). E este quando positivo indicaria uma melhoria na qualidade de vida da população daquela região. No caso do desenvolvimento econômico sua medida leva em consideração qualidade de vida, disponibilidade à saúde, educação, lazer e alimentação. Nele temos uma visão multidisciplinar da questão, envolvendo a sociedade de forma mais abrangente (Maia; Leite, 2022).

Desta forma, as políticas ambientais passam a ter uma maior relevância na procura de um maior desenvolvimento econômico. A trajetória da política ambiental no mundo pode ser analisada em quatro importantes momentos, sendo eles: a elaboração da Política Ambiental Americana, conhecida como NEPA (1969); a realização da Conferência das Nações Unidas, em Estocolmo (1972); a publicação do relatório de Brundtland “Nosso Futuro Comum” (1987) e a realização da Conferência das Nações Unidas, no Rio de Janeiro denominada ECO 92 (1992).

Historicamente, no Brasil, desde 1934, ano em que foi constituído o primeiro Código Florestal Brasileiro, vários instrumentos de gestão ambiental foram sendo estabelecidos como: Código das Águas, referente ao direito de propriedade de recursos hídricos; o Estatuto da Terra, referente à função social da terra; Código de

Pesca. Sendo que temos na Constituição Federal Brasileira de 1988 no seu art.225, onde estabelece que todos tem o direito “ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (Brasil, 1988), um marco balizador da política ambiental em nosso país.

Durante esta trajetória o desenvolvimento começa a ser compreendido como um processo caracterizado por suprir as necessidades básicas da humanidade, de perpetuar o direito à cidadania, em prol da construção de uma sociedade mais justa, igualitária e do crescimento econômico sustentado. surgindo assim, o conceito de Desenvolvimento Sustentável (DS) (Molina, 2019).

Mantendo esta linha de raciocínio, a Organização das Nações Unidas (ONU) propõe a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, na qual estabelece 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável, conhecido pela sigla ODS. O de número seis é específico da água potável e saneamento, colocando a Gestão dos Recursos Hídricos em foco.

2.2 Bacias Hidrográficas

Dentre os recursos naturais a água se apresenta como de maior importância para a manutenção da biodiversidade e se faz necessária em qualquer atividade humana. Considerando a importância da água e sua essencialidade para a manutenção das atividades das sociedades modernas, ressalta-se que, em virtude, principalmente, da sua dinâmica espacial e temporal, a mesma vem sendo cerne de conflitos (Marques *et al.*, 2021).

A utilização da água de forma desordenada pode desencadear a concorrência por sua disponibilidade, além de causar danos ao meio natural no que tange a qualidade e quantidade, gerando choque de interesses por seu uso, caso não seja gerenciada corretamente (Silva *et al.*, 2021a). Políticas bem desenhadas e estratégias de controle para proteger o solo e os recursos hídricos dependem de informações confiáveis e apropriadas em escala sobre as principais fontes do problema de sedimentos que se manifesta na forma de consequências tanto no local quanto regional.

No que diz respeito à escala, a bacia hidrográfica (BH) continua a ser vista como uma unidade paisagística fundamental para enquadrar tanto a exploração científica dos sistemas sedimentares como a elaboração de estratégias de gestão significativas no contexto das hierarquias hidrológicas naturais (Collins *et al.*, 2020).

A Agência Nacional das Águas (ANA), a partir da Lei nº 9.433/97, define a bacia hidrográfica como a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Assim, estudos com foco em bacias hidrográficas são importantes para subsidiar políticas públicas voltadas para o planejamento e gestão do ambiente (Oliveira *et al.*, 2022). Tal divisão se faz necessária devido a garantia oferecida de um planejamento integrado e coerente ao longo de todo o corpo d'água.

Considerando que o agravamento das disputas pelo uso da água pode aflorar em conflitos, o estabelecimento da bacia hidrográfica como unidade físico-territorial de gestão dos recursos hídricos permite equacionar problemas comuns e contribuir positivamente para a tomada de decisões (Marques *et al.*, 2021). O manejo de forma adequada e a aplicação das políticas correlacionadas favorecem a promoção dos usos múltiplos da água e o atendimento das necessidades oriundas da sociedade (Silva *et al.*, 2021b).

2.3 Indicadores de Sustentabilidade

O paradigma do desenvolvimento sustentável, que busca a harmonização entre o progresso econômico, a formulação de políticas governamentais e a promoção do bem-estar social, demanda uma abordagem quantitativa para avaliação e monitoramento. Nesse contexto, surgem os Indicadores de Sustentabilidade (IS), uma ferramenta concebida para mensurar os resultados alcançados pelo desenvolvimento sustentável. Esses indicadores visam fornecer uma estrutura analítica capaz de capturar e avaliar diversos aspectos interconectados do desenvolvimento sustentável, permitindo uma avaliação holística de seu progresso e impacto (Molina, 2019).

Os indicadores têm como função mensurar a distância entre a atual conjuntura de uma comunidade e os objetivos traçados para o seu desenvolvimento (Silva; Almeida, 2019).

A fim de promover uma gestão ambiental mais eficiente, foram elaboradas diversas metodologias de análise ambiental. Os métodos que buscam representar as relações de causa e efeito entre os fenômenos que ocorrem em determinado recorte

geográfico, vêm sendo objeto de evolução, junto aos gestores ambientais. O método conhecido como Pressão, Estado e Resposta (PER) desenvolvido pela OCDE; o FER (Força Motriz, Estado e Resposta) da Comissão de Desenvolvimento Sustentável da ONU e o FPEIR (Força Motriz, Pressão, Estado, Impacto e Resposta) desenvolvido pela *European Environment Agency* (EEA) refletem essa evolução.

Segundo a OCDE, os indicadores devem ter três critérios básicos: a pertinência política e a utilidade para os usuários; a exatidão da análise e a mensurabilidade. Salienta-se que não se faz necessário os três critérios estarem concomitantes num indicador, já que este indicador seria numa situação ideal (OCDE, 2002). No entanto, a escolha dos indicadores deve privilegiar os que forneçam uma imagem representativa das condições ambientais, a simplicidade e facilidades de interpretação; e a disponibilidade de dados de boa qualidade (Araújo, 2017).

Desta forma, é importante ressaltar o que Branchi salienta sobre os indicadores:

Os indicadores são abstrações da realidade. podendo ser representações incompletas ou parciais dela e são interpretados de acordo com um conjunto de hipótese que refletem os valores de quem está escolhendo os indicadores e que determinam o que deve ser medido (Branchi, 2022, p. 3).

Ao simplificar as informações incorporando a ciência física e social no processo de tomada de decisão fornecendo um diagnóstico com alternativas econômicas, sociais e ambientais, os indicadores auxiliarão os gestores públicos a tomarem as decisões em direção às metas do desenvolvimento sustentável.

Apesar de existirem diversos indicadores ambientais, como mencionados acima, eles não são específicos para uma bacia hidrográfica e não visam acessar a sustentabilidade da bacia no que diz respeito à gestão integrada dos recursos hídricos, nem abranger as diferentes variáveis do problema (Chaves; Alipaz, 2007).

2.4 Índice de Sustentabilidade de Bacia Hidrográfica - WSI

Com o objetivo de integrar as questões hidrológicas, ambientais, de vida e políticas, Chaves e Alipaz (2007), fizeram a proposta do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas - *Watershed Sustainability Index* (WSI).

A intenção dos autores é de que este índice venha ser simples, usando informações prontamente disponíveis, com características dinâmicas, permitindo

estimar as pressões e respostas humanas, ambientais e relacionadas ao clima e que podem afetar a sustentabilidade da bacia hidrográfica em estudo.

Na metodologia proposta por Chaves e Alipaz (2007), se utiliza de forma integrada o modelo conhecido como HELP: hidrologia (H), ambiente (*environment* – E), vida (*life* – L) e política (P), proposto pela Organização das Nações Unidas para a Educação a Ciência e a Cultura (UNESCO), para classificação dos indicadores, e o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2003) na definição dos parâmetros.

No modelo PER tem-se na seleção de indicadores de Pressão, aqueles que descrevem a influência da ação antrópica no meio ambiente. Tais atividades alteram a qualidade e quantidade de recursos naturais que serão medidos pelos indicadores de Estado e provocam reações que visam a limitar os efeitos das ações humanas resumidas pelos indicadores de Resposta. Já no modelo HELP a visão de desenvolvimento se apresenta de forma multidimensional (Branchi, 2022).

Observa-se que Chaves e Alipaz (2007) foram eficazes ao propor a aplicação conjunta dos modelos PER e HELP de forma matricial. Este procedimento leva a uma sistematização dos indicadores de sustentabilidade que, usualmente, requer múltiplas dimensões.

O WSI é um instrumento simples e adaptável para avaliar o estado atual da sustentabilidade de uma bacia hidrográfica, apropriado para embasar a tomada de decisão em relação à gestão integrada (Maynard; Cruz; Gomes, 2017).

2.5 Método Fingerprinting

O crescimento agrícola e urbano e a consequente ocupação das bacias hidrográficas, com a alteração do uso da terra, promovem um grande impacto negativo ambiental e socioeconômico à humanidade, que é a erosão e a presença de sedimentos nos rios (Minella; Merten, 2011). A produção de sedimentos é reconhecida como uma informação importante para a gestão adequada dos recursos hídricos. Os estudos de transporte de sedimentos em rios são importantes no que diz respeito à poluição, à navegabilidade, à vida útil dos reservatórios (Karolyna *et al.*, 2021).

Bacias hidrográficas que se apresentam importantes para regiões estuarinas, tem em seus sedimentos grande relevância, principalmente, quando estes se acumulam nas áreas portuárias desencadeando a necessidade de processos de

dragagem que venham a impactar ambientalmente e economicamente a região portuária. Entretanto, existem poucas informações no Brasil sobre os aspectos relacionados com o uso e manejo do solo e a produção de sedimentos. Dificuldades relacionadas com métodos capazes de mensurar esses efeitos tanto no Brasil, como em outros países, estão entre os principais fatores que explicam esse problema.

A erosão hídrica acelerada e a entrega de sedimentos nos corpos e reservatórios hídricos são amplamente reconhecidas como ameaças globais aos serviços ecossistêmicos essenciais para meios de subsistência e desenvolvimento sustentáveis. A governança e a gestão direcionadas do solo e dos recursos hídricos são como resultado prioridades políticas em todo o mundo (Collins *et al.*, 2020; Wu; He; Ma, 2020).

O manejo adequado aliado a aplicação de instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos e monitoramento limnológico, favorece o enfrentamento do atual cenário de degradação dos recursos hídricos encontrado no Brasil (Silva *et al.*, 2021b).

Os sedimentos que transitam em suspensão na calha fluvial têm origem em diferentes fontes. A proporção com que cada fonte contribui na mistura é variável no tempo e no espaço, consequência dos processos erosivos que estão em curso na bacia de contribuição (Minella; Merten; Clarke, 2009). O método. *Sediment Source Fingerprinting* (SSF), que doravante chamaremos de *Fingerprinting*, se apresenta como um procedimento eficiente na identificação destas fontes.

O método *Fingerprinting* vem sendo desenvolvido desde a década de 1970, trabalhos como os de Klages e Hsieh de 1975; Wall e Wilding de 1976; Walling *et al* de 1979 registram este fato (Collins *et al.*, 2020). O procedimento identifica a proveniência do sedimento e estima a contribuição relativa de cada fonte potencial, utilizando uma variedade de propriedades traçadoras selecionadas (Lizaga *et al.*, 2020).

Os primeiros estudos se concentraram na determinação das fontes de sedimentos transportados nos rios. O método *Fingerprinting* de identificação de fontes de produção de sedimentos foi desenvolvido como uma “ferramenta” para ajudar a responder perguntas de pesquisa sobre como as paisagens funcionam. As primeiras aplicações diziam respeito à avaliação da erosão da paisagem, como erosão do solo e das margens do canal, especialmente em áreas agrícolas. Outras aplicações como: determinar os impactos da colheita florestal e na erosão da paisagem; avaliar como o

desenvolvimento urbano forneceu fontes adicionais de sedimentos e contaminantes aos sistemas aquáticos; identificação de fontes em estuários e zonas costeiras e reconstruir as mudanças nas fontes ao longo do tempo usando lagos, planícies alimentares e depósitos sedimentares estuarinos.

Na área em estudo, a BHAÉ, temos a utilização da metodologia do *Fingerprinting* adotada por Cadoná (2021), em sua tese intitulada: Fontes de produção de sedimentos e índices ambientais de uso da terra como indicadores de vulnerabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica rural, especificamente no artigo I: O fracionamento químico da matéria orgânica do solo como variável na identificação de fontes discriminantes de perdas de solo em bacia hidrográfica rural no Sul do Rio Grande do Sul.

Outra aplicação, que é particularmente interessante, aborda a gestão de bacias hidrográficas, as consequências no local e fora do local na erosão da paisagem das BH. Como tal, o método *Fingerprinting* fornece um excelente meio para reunir informações importantes que podem ser usadas para desenvolver conselhos para mitigar tais problemas. O método *Fingerprinting* fornece a evidência científica para sustentar a tomada de decisão gerencial e o desenvolvimento de políticas públicas na área de uma bacia hidrográfica (Owens, 2022).

As concentrações geoquímicas dos sedimentos erodidos são principalmente condicionadas pelo tipo de solo e pelo substrato geológico de onde se originam. Inicialmente, os resultados eram principalmente qualitativos, na forma de gráficos e comparações simples, e usavam cores, mineralogia, geoquímica e propriedades magnéticas minerais dos materiais como propriedades do rastreador. O método tornou-se mais quantitativo, utilizando instrumentos de estatísticas e de modelagem cada vez mais avançadas, novas propriedades rastreadoras foram sendo incluídas como elementos de identificação e novos ambientes e aplicativos foram incluídos nos procedimentos (Owens, 2022).

Muitos trabalhos, nos últimos tempos, vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de aprimorar os procedimentos do método *Fingerprinting*. No entanto cabe aqui ressaltar a preocupação manifesta por Owens (2022), de que é importante reconhecer o fato de que essa técnica é, em última análise, uma ferramenta que deve ser usada para responder a questões fundamentais sobre como as paisagens, especialmente as modificadas, funcionam em um mundo em mudança, bem como para fornecer às

comunidades locais, gestores e reguladores as informações de que necessitam para a tomada de decisões e o desenvolvimento de políticas.

A fim de identificar quais são as variáveis que poderão ser utilizadas como traçadores dos processos erosivos e assim, aplicar a metodologia *Fingerprinting*. para identificação de fontes de produção de sedimentos utilizaremos traçadores geoquímicos para a obtenção de dados neste estudo.

2.5.1 A espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES)

A técnica de espectroscopia para determinação de metais e não metais em uma infinidade de tipos de amostras, desde a década de 80, envolve a medida da radiação emitida quando átomos e íons excitados por radiação de um plasma retornam ao estado fundamental. As vantagens inerentes a essa técnica, como: análise simultânea, detecção em ampla faixa de concentração, alta precisão, exatidão, sensibilidade e rapidez (Soares *et al.*, 2010), se apresentam como características muito relevantes para as análises de solo.

No equipamento, a amostra é inserida em um sistema de introdução de amostras na forma líquida, é convertida em aerossol por um nebulizador, sendo as gotículas maiores separadas das menores na câmara de nebulização. O aerossol é transportado para o plasma, onde sofre os processos de dissolvatação, vaporização, atomização e excitação e/ou ionização. Os átomos e íons excitados retornam ao seu estado fundamental emitindo linhas em múltiplos comprimentos de onda, que são separados por um policromador, cujas as intensidades são medidas por um sistema de detecção (Bianchi, 2011).

No ICP OES, os comprimentos de ondas são usados para a identificação dos elementos, enquanto a intensidade serve para a determinação de sua concentração. Uma vez que todos os elementos estão excitados para emitir luz, simultaneamente, eles podem ser determinados, simultaneamente, de uma forma muito rápida. (Santos, 2018).

3 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido no sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul (RS), em uma sub-bacia da bacia hidrográfica da Barragem do Arroio Santa Bárbara, denominada de Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAÉ), no município de Pelotas. Esta bacia (Figura 1) possui 33,03 km² e está localizada entre as coordenadas 31°37'51,19" S e 31°42'29,44" S de latitude e 52°22'58,80" O e 52°27'26,19" O de longitude.

O arroio Epaminondas é o afluente com maior área de contribuição para o reservatório da barragem Santa Bárbara. Neste reservatório é feita a captação de água para a Estação de Tratamento de Água Santa Bárbara, que, atualmente, é a principal fonte de água potável para o município de Pelotas, sendo responsável por 60% do abastecimento da área urbana.

O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cfa), conforme a classificação climática de Köppen (Kuinchtner; Buriol, 2001). com médias de 8,44 °C nos meses mais frios e de 28,63 °C nos meses mais quentes (Borges *et al.*, 2022).

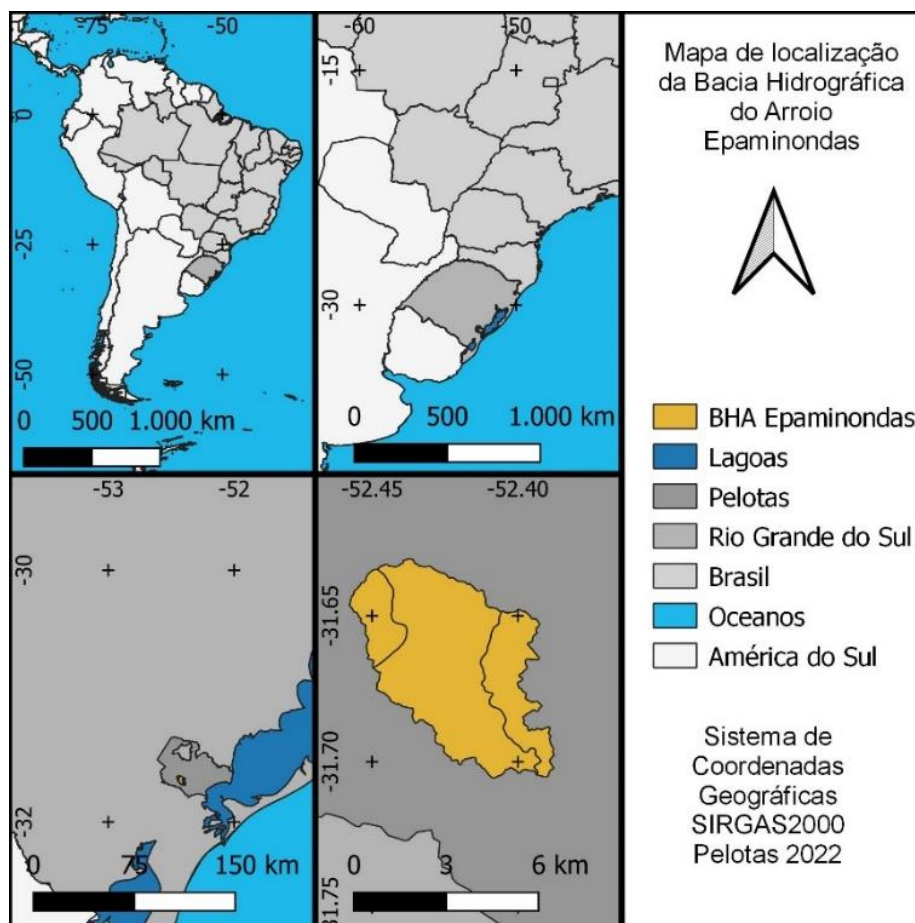


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Os solos que predominam na BHA E: CX, CAMBISSOLO HÁPLICO; RL, NEOSSOLO LITÓLICO; PA, ARGISSOLO AMARELO; PVA, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO; SX, PLANOSSOLO HÁPLICO; GX, GLEISSOLO HÁPLICO (Figura 2). A prevalência de Cambissolo e Neossolo ocorre na área mais declivosa da bacia, os Argissolos na porção mediana e Planossolos e Gleissolos na porção mais baixa da BHA E.

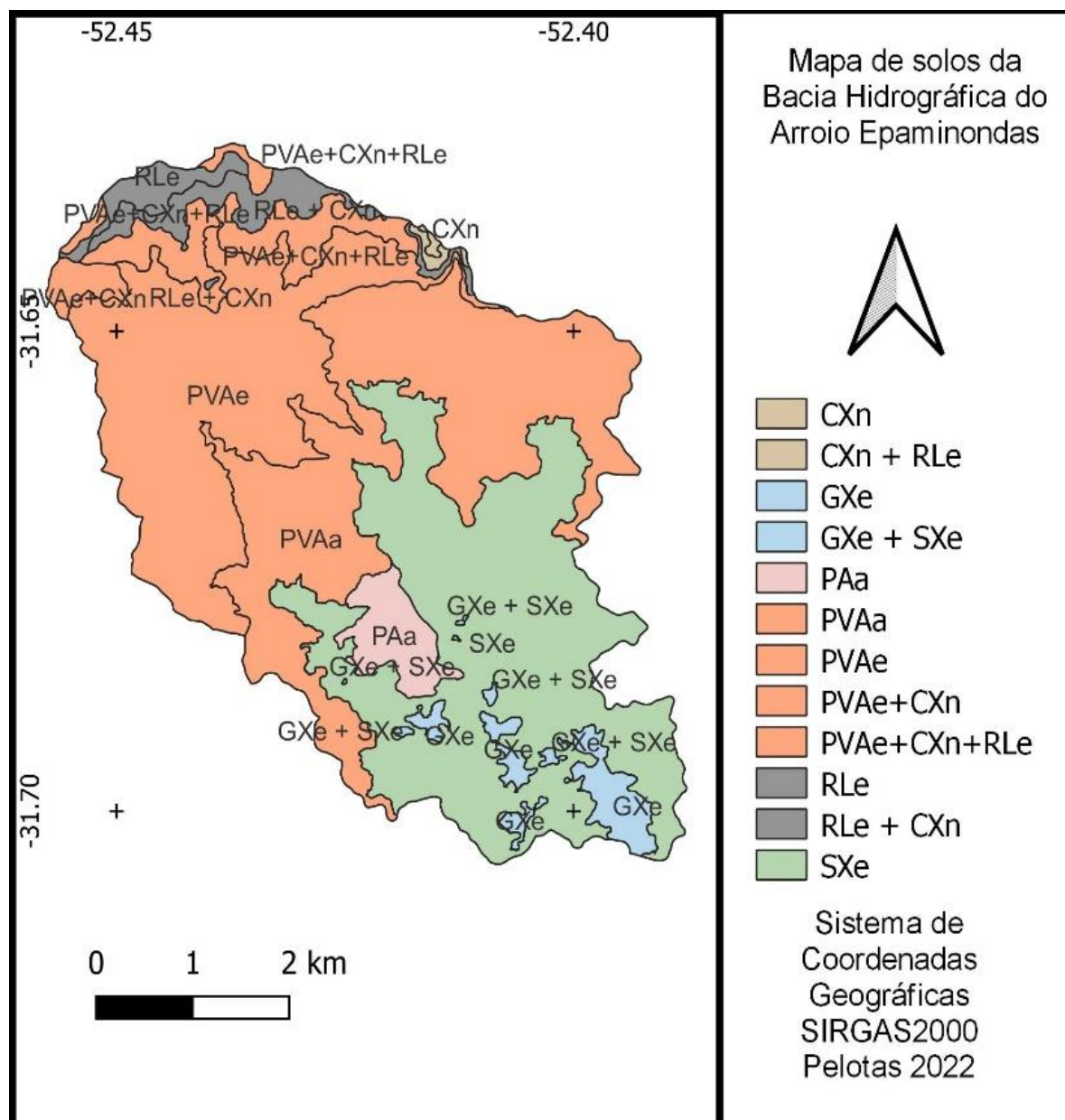


Figura 2 – Solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas. Fonte: adaptado de Cadoná (2021).

4 Capítulo 1 - Utilização da metodologia *Fingerprinting* na identificação dos traçadores, através do uso de variáveis geoquímicas, na bacia hidrográfica do arroio Epaminondas (BHAÉ)

4.1 Introdução

A responsabilidade socioambiental vem se apresentando como indispensável no desenvolvimento de qualquer região, sendo assim, os projetos de desenvolvimento de uma dada área devem passar por um processo de Gestão Ambiental. As bacias hidrográficas são reconhecidas como sendo ótimas unidades de Gestão Ambiental. A correlação entre a erosão do solo e os sedimentos encontrados nos corpos d'água de uma bacia hidrográfica se apresentam como um importante instrumento de gestão ambiental.

Numa calha fluvial encontra-se em suspensão sedimentos de diferentes fontes. O método do *Fingerprinting* tem se mostrado bastante eficiente na identificação das fontes desses sedimentos, na medida que se baseia no princípio de que os sedimentos em suspensão mantêm algumas de suas propriedades geoquímicas adquiridas nas fontes sendo essas propriedades utilizadas como traçadores (Minella; Merten; Clarke, 2009).

Neste estudo foi utilizado o método *Fingerprinting* para a identificação das fontes de produção de sedimentos através do uso de variáveis geoquímicas. na Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAÉ).

4.2 Metodologia

A área de estudo da BHAÉ, caracterizada no item 3, foi dividida em 3 subáreas identificadas como Área 1 (3,70 km²), Área 2 (22,39 km²), Área 3 (6,94 km²) (Figura 3). Essa divisão foi feita com base na malha hidrográfica da BHAÉ, em função do posicionamento dos coletores de sedimento em suspensão (torpedos): a área 1 se

apresenta inicialmente isolada até a posição do torpedo 1; a área 2, abrange a maior proporção da malha hidrográfica da bacia e recebe a contribuição da área 1, tendo o torpedo 2 como ponto de coleta, e a área 3 se apresenta como um ramo independente da malha hidrográfica da BHAEE, tendo sua coleta de sedimento na posição do torpedo 3.

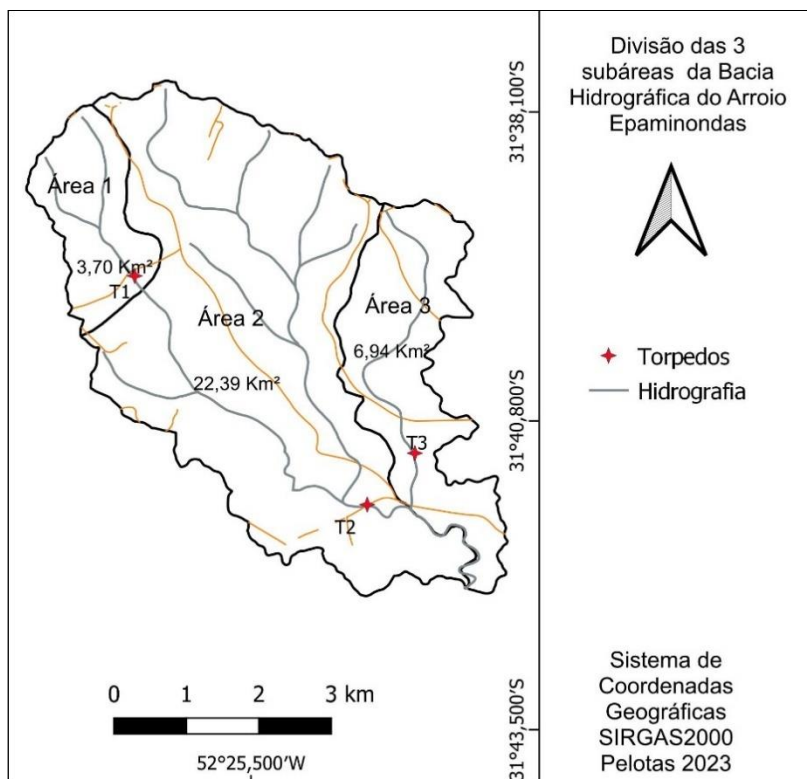


Figura 3 – Subáreas definidas na BHAEE. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

E em cada uma delas, as amostras de fonte foram divididas em três categorias: Calha (CA), que são as amostras de solo coletadas a montante dos coletores de sedimento nas margens do curso d'água; Lavoura (L), onde ocorre a produção através de monocultura de verão (soja e/ou milho); e Campo (C), estando as áreas identificadas como de revegetação com eucalipto e vegetação nativa; áreas de campo sem manejo, mas com utilização esporádica para criação de animais; áreas de campo nativo sem manejo, mais utilizadas sequencialmente para a criação de animais (Figura 4). Esta classificação seguiu a metodologia usada por Cadoná (2021).

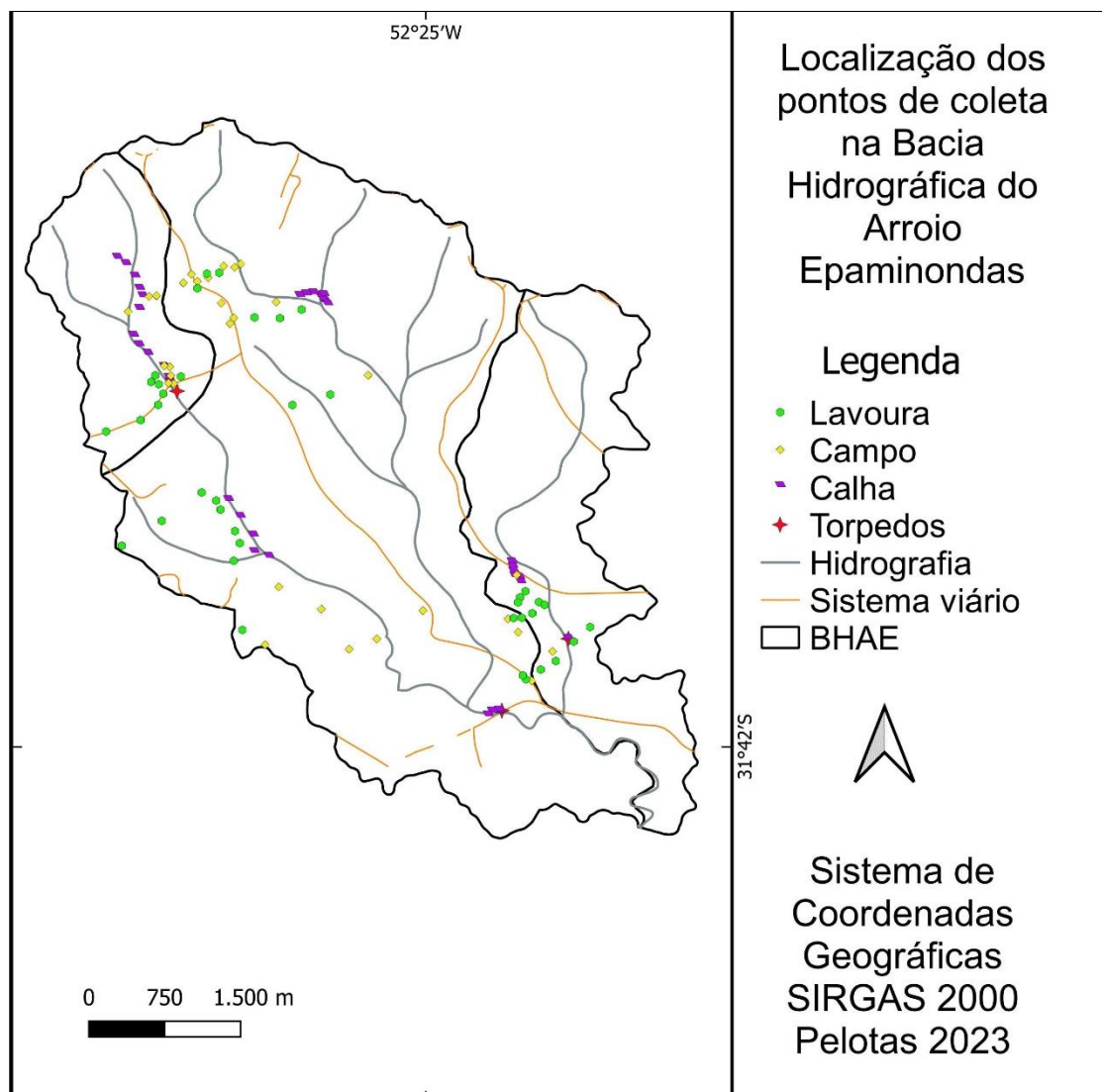


Figura 4 – Localização dos Pontos de coleta. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

As amostras de sedimentos em suspensão foram coletadas nas calhas de drenagens presentes na bacia através de coletores fixados no leito das drenagens, identificados como Torpedos (T) (Figura 5). O equipamento consiste em um cano de PVC de 75 mm/80 mm de diâmetro com +/- 1 metro de comprimento, fechados em ambas as extremidades e com um orifício (+/- 0.5cm de diâmetro) em cada ponta para a entrada de material (Figura 6).



Figura 5 – Fixação de torpedos da área 3. Fonte: elaborada pelo autor (2024).



Figura 6 – Modelo de Torpedo utilizado nas coletas de sedimentos. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Os torpedos foram indicados como T1, T2 e T3 correspondentes as três subáreas já mencionadas, sendo que os números (1, 2, 3 e 4) correspondem ao período de coleta. As coletas foram realizadas nos meses de dezembro, abril e maio nos anos de 2019, 2021 e 2022. conforme explicitado na Tabela 1. Não foram feitas coletas no ano de 2020 em virtude dos procedimentos estabelecidos nas normas para o enfrentamento da pandemia do Covid-19.

Tabela 1 – Períodos de coletas dos sedimentos nos torpedos instalados.

Identificação	Data
T1.1	05/12/19
T2.1	19/12/19
T3.1	19/12/19
T1.2	29/04/21
T2.2	29/04/21
T3.2	06/05/21
T1.3	08/12/21
T2.3	08/12/21
T3.3	08/12/21
T1.4	09/05/22
T2.4	09/05/22
T3.4	09/05/22

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

O número e as fontes por áreas das amostras são apresentados na Tabela 2.

Todas as amostras de solo das fontes foram secas ao ar (TFSA) e de sedimentos foram secos em estufa a 60 °C, posteriormente, as amostras de solo foram moídas e passadas por uma peneira de abertura de 2mm antes das análises laboratoriais.

Tabela 2 – Número de amostras por área e por fonte.

Amostras	Área 1	Área 2	Área 3	Total/área
Calha (CA)	13	20	10	43
Lavoura (L)	10	17	13	40
Campo (C)	10	16	7	33
Torpedo 1(T1)	04			04
Torpedo 2(T2)		04		04
Torpedo 3(T3)			04	04
Total geral	37	57	34	128

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Todas as amostras foram armazenadas em recipientes e identificadas conforme planilha apresentada no apêndice A.

4.2.1 Análises químicas

As amostras de solo e sedimentos foram pesadas (0,5 g), em uma balança analítica (com precisão de 0.0001g) sobre um papel filtro, e em seguida, transferida para o tubo de digestão (Figura 7).



Figura 7 – Bancada de pesagem das amostras. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Em cada tubo de digestão, foi adicionado 6ml de ácido clorídrico concentrado (HCl) e 3 ml de ácido nítrico concentrado (HNO₃), inclusive no tubo do branco (Figura 8), com o objetivo de manter a proporção de 3:1 (água-régia) (USEPA, 1998). Em cada rodada, foi mantido um tubo controle(branco), no qual não era introduzida as amostras, apenas os ácidos (HCl e HNO₃), para monitorar possíveis contaminações do procedimento. Esta etapa foi realizada utilizando uma capela (Figura 9).



Figura 8 – Coleta dos ácidos. Fonte: elaborada pelo autor (2024).



Figura 9 – Adição do ácido nítrico e clorídrico nos tubos do micro-ondas. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

A digestão foi realizada num micro-ondas da marca Anton Paar modelo Multiwave Go, por 9.5 minutos a 182°C (Figura 10). Sendo que foram preparadas 11 amostras e 1 branco para cada ciclo de digestão em função da capacidade do micro-ondas (Figura 11).



Figura 10 – Processo de digestão no micro-ondas. Fonte: elaborada pelo autor (2024).



Figura 11 – Micro-ondas com o rotor de amostras. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Terminado o ciclo após resfriamento o digerido foi diluído a 25ml e acondicionado em recipientes de polipropileno para posterior análise (Figura12).



Figura 12 – Amostras acondicionadas em frascos de polipropileno para análise no ICP-OES.
Fonte: elaborada pelo autor (2024).



Figura 13 – ICP-OES utilizado para as análises. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

A concentração dos elementos Al, Ba, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, In, Li, Mn, Ni, P, V e Zn foram obtidas usando um espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) da marca Shimadzu modelo ICPE 9820 (Figura 13). Cálcio e Magnésio foram determinados num espectrômetro de absorção atômica com chama (FAAS) da marca GBC modelo SavantAA) e Sódio e Potássio foram determinados em um fotômetro de chama da marca Digimed modelo DM-62. Estas análises foram feitas na Central Analítica da Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus de Erechim.

A determinação do carbono orgânico total (COT), Fe, Mn e Al pelo ataque sulfúrico conforme Teixeira et al. (2017) e a análises dos óxidos de Fe e Mn a partir das metodologias preconizadas por Fey e Dixon (1983), Dick (1986), Mehra e Jackson (1958), Schwertmann (1964) e McKeague e Day (1966), sendo utilizados os extratores Ditionito-Citrato (DCB) e Oxalato de amônio.

Os valores brutos referentes as análises químicas estão no Apêndice B.

4.2.2 Método Fingerprinting

Tendo estabelecido as características químicas das amostras fontes e dos sedimentos, foram aplicadas algumas análises estatísticas a fim de quantificar a proporção com que cada fonte contribui para a produção de sedimentos em suspensão na calha das drenagens.

Primeiramente, foi realizado um pré-teste de conservação no qual, quando o valor do elemento no sedimento ficasse acima ou abaixo dos limites detectados nas amostras de solo (fonte), estes elementos eram previamente retirados das subseqüentes análises estatísticas. A seguir, com o objetivo de estabelecer um conjunto de variáveis que apresentem diferenças significativas na sua concentração entre as fontes a serem identificadas e que mantenham estas propriedades durante o caminho da fonte até o corpo d'água utilizamos dois testes estatísticos: o teste H não-paramétrico ou teste Kruskal-Wallis (Levin, 1999) e uma função discriminante multivariada.

O teste H permitiu testar a hipótese nula em que K amostras aleatórias independentes são provenientes de uma mesma população em nível de significância de 1 a 10%. Neste teste foram definidos quais elementos químicos apresentaram diferença estatística entre as fontes de sedimentos. os quais puderam ser utilizados

como variáveis traçadoras. O teste foi aplicado para cada variável, verificando sua capacidade individual em discriminar as fontes.

O próximo teste foi uma função discriminante multivariada, que determinou o número mínimo de elementos traçadores que maximiza a discriminação das fontes. O método é baseado no parâmetro *Wilks' Lambda* (Λ^*) da análise de variância e o critério utilizado pelo modelo estatístico é a minimização de Λ^* . Não existirá capacidade discriminante (as fontes são consideradas iguais) do conjunto de elementos traçadores (ET) selecionadas quando Λ^* é próximo de 1. Valores próximos de 0 ocorrem quando a variabilidade dentro do grupo é pequena em comparação com a variabilidade total, isto é, a maior parte da variabilidade total pode ser atribuída à diferença entre os grupos.

A próxima etapa estatística consiste na determinação da contribuição de cada fonte de sedimento (%) que compõe a produção total de sedimentos. Para isso, será comparado o conjunto de ET determinados nas fontes e nos sedimentos em suspensão a fim de encontrar a melhor proporção de cada fonte. Aplicaremos como índice validador o critério global de qualidade de ajuste (*Gof.* do inglês *goodness-of-fit*), que pode ser definido como a média geométrica entre a comunalidade média e o R^2 médio das regressões estruturais (Tenenhaus; Amato; Vinzi, 2004). Tal índice possui valor que varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais perto de 1, melhor o ajuste do modelo, este valor será representado por porcentagem em nosso estudo.

Os três últimos procedimentos estatísticos foram realizados utilizando os pacotes ggplot2, (Wickham, 2016) gridExtra (Auguie, 2016), Mass (Venables, 2002) e KLaR (Weihs *et al.*, 2014) implementados pelo *software* R (R Core Team, 2020).

4.3 Resultado e discussão

O pré-teste de conservação. selecionou as variáveis cujo valores nas amostras de sedimento ficaram entre os valores máximo e mínimos das amostras de solo das fontes. Os resultados obtidos para as Áreas 1, 2 e 3 estão apresentados na Figura 14.

Somente as amostras A1.1, A1.2, A2.1, A2.2 e A3.1 mantiveram todos os 23 ET para a próxima etapa estatísticas, sendo que o restante das áreas teve alguns dos ET retirados sendo a amostra A1.4 a que teve o maior número de elementos traçadores excluídos (5).

ET	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4
Al												
As												
Ba												
Ca												
Cd												
Co												
Cr												
Cu												
Fe												
Ga												
In												
K												
Li												
Mg												
Mn												
Na												
Ni												
P												
V												
Zn												
COT												
Fe DCB												
Mn DCB												

Figura 14 – Resultados do pré-teste de conservação. Os elementos em verde foram pré-selecionados e os elementos em vermelho foram descartados. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Com os resultados do pré-teste de conservação, se aplicou o teste estatístico não-paramétrico, denominado teste-H ou Kruskal-Wallis, cujo resultado selecionou mais algumas variáveis. As variáveis selecionadas são aquelas que, segundo o teste, apresentam uma capacidade discriminante que permita estabelecer uma diferença entre as fontes.

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os valores de p para as áreas 1, 2, e 3, respectivamente, sendo que as variáveis cujo p ficou abaixo de 0,1 foram selecionadas.

Tabela 3 – Valores de p da área 1 com a aplicação do teste Kruskal-Wallis (*) valores de $p < 0,1$ selecionando os Elementos Traçadores

ET	Área 1.1 p-value	Área 1.2 p-value	Área 1.3 p-value	Área 1.4 p-value
Al	0,489	0,3917	0,489	0,489
As	0,7786	0,638	0,7729	0,7729
Ba	0,2774	0,439	0,2774	0,2774
Ca	0,3778	0,2217	0,3778	
Cd	0,5273	0,6221	0,5428	0,5428
Co	0,3876	0,5502	0,3992	0,3992
Cr	0,02665 *	,003181 *	0,02665 *	0,02665 *
Cu	0,8725	0,7578	0,8725	
Fe	0,9313	0,8301	0,9313	0,9313
Ga	0,1587	0,2475	0,1587	0,1587
In	0,6017	0,332	0,6017	0,6017
K	0,829	0,8614	0,829	0,829
Li	0,9397	0,9003	0,9397	0,9397
Mg	0,1823	0,2436	0,1823	0,1823
Mn	0,1823	0,2384	0,1486	0,1486
Na	0,6915	0,6915		
Ni	0,699	0,6803	0,699	0,699
P	0,003112 *	0,006247 *	0,003112 *	
V	0,3559	0,4121	0,3559	0,3559
Zn	0,9621	0,6234		
COT	9,546e-05 *	0,0002249 *		9,546e-05 *
Fe DCB	0,035 *	0,04817 *	0,035 *	0,035 *
Mn DCB	0,05597 *	0,07965 *	0,05597 *	0,05597 *

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Tabela 4 – Valores de p da área 2. com a aplicação do teste de Kruskal-Wallis (*) valores de $p < 0,1$ selecionando os Elementos Traçadores

	Área 2.1	Área 2.2	Área 2.3	Área 2.4
Tracador	p-value	p-value	p-value	p-value
Al	0,128	0,128	0,2891	0,1646
As	0,3427	0,3427	0,3632	0,5655
Ba	0,00119 *	0,00119 *	0,001175 *	0,00232 *
Ca	0,01943 *	0,01943 *	0,009884 *	0,02574 *
Cd	0,1754	0,754	0,1455	0,2083
Co	0,002006 *	0,002006 *	0,001681 *	0,00391 *
Cr	0,1543	0,1543	0,4328	0,199
Cu	0,3889	0,3889	0,6219	0,4214
Fe	0,06391 *	0,06391 *	0,09753 *	0,05169 *
Ga	0,6845	0,6845	0,5162	0,5176
In	0,1516	0,1516	0,2198	0,2205
K	0,3068	0,3068	0,4946	0,4018
Li	0,1542	0,1542	0,3529	0,1792
Mg	0,0007879 *	0,0007879 *	0,001268 *	0,001651 *
Mn	4,96e-05 *	4,96e-05 *	2,019e-05 *	2,504e-05 *
Na	0,0001374 *	0,0001374 *		
Ni	0,1057	0,1057	0,1081	0,1655
P	0,3403	0,3403		0,5756
V	0,3723	0,3723	0,8528	0,4094
Zn	0,1096	0,1096	0,09233 *	0,2345
COT	0,001041 *	0,001041 *		0,00261 *
Fe DCB	0,2181	0,2181	0,2451	0,2098
Mn DCB	0,0001069 *	0,0001069 *	4,345e-05 *	0,0001129 *

Fonte :elaborada pelo autor (2024).

Tabela 5 – Valores de p da área 3 com a aplicação do teste Kruskal- Wallis (*) valores de $p < 0.1$ selecionando os Elementos Traçadores.

	Área 3.1	Área 3.2	Área 3.3	Área 3.4
elemento	p-value	p-value	p-value	p-value
Al	0,5009		0,2138	0,2138
As	0,02415*		0,0133*	0,0133*
Ba	0,005733 *	0,003165 *	0,003165 *	0,003165 *
Ca	0,4639	0,2239	0,2239	0,2239
Cd	0,009172*	0,004637*	0,005659*	0,005659*
Co	0,002338 *	0,001509 *	0,001707 *	0,001707 *
Cr	0,4167	0,2731	0,3633	0,5469
Cu	0,0769	0,09789*	0,1282	0,1029
Fe	0,8872	0,9428	0,9638	0,9816
Ga	0,003828*	0,003828*	0,003828*	0,003828*
In	0,009833*	0,009833*	0,009833*	0,01542*
K	0,8181	0,3777	0,4217	0,3777
Li	0,8178		0,491	0,5486
Mg	0,4147		0,1894	
Mn	0,0001178 *	0,0001126 *	0,0001178 *	0,0001126 *
Na	0,03882 *	0,03882 *		
Ni	0,06752*	0,03405*	0,03727*	0,03727*
P	0,2232	0,1062	0,1062	0,1062
V	0,6319	0,2809	0,3668	0,5339
Zn	0,3087	0,1289	0,1541	0,1541
COT	0,7035	0,666		0,4916
FeDCB	0,01116*	0,01135*	0,006897*	
MnDCB	0,0002569 *	0,0002079 *		

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

A Figura 15 sintetiza os resultados do teste-H para todas as áreas sendo que os Elementos Traçadores identificados pela cor amarela são aqueles que foram selecionados e que serão levados para a próxima etapa estatística.

Ao observarmos na Figura 15 o Alumínio (Al) não se apresentou como discriminante em nenhuma área seguido pelo Cobre (Cu) e o Zinco (Zn) que só se apresentam como discriminante nas amostras A3.2 e A2.3 respectivamente. O Fósforo (P) e o Arsênio (As) se apresentam discriminantes em 3 amostras. Cromo (Cr), cádmio (Cd), Ferro (Fe), Gálio (Ga), Índio (In), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Níquel (Ni) se apresentam como discriminantes em 4 amostras. O Carbono Orgânico Total (COT), Ferro e Manganês analisados por DCB, Manganês (Mn), Cobalto (Co) e o Bário (Ba) estão como discriminantes em mais de 5 amostras, sendo que o Manganês analisado por DCB foi elemento que se apresentou em 10 amostras como o mais discriminante de todos os ET.

Ao	A1. 1	A1. 2	A1. 3	A1. 4	A2. 1	A2. 2	A2. 3	A2. 4	A3. 1	A3. 2	A3. 3	A3. 4
Al												
As												
Ba												
Ca												
Cd												
Co												
Cr												
Cu												
Fe												
Ga												
In												
K												
Li												
Mg												
Mn												
Na												
Ni												
P												
V												
Zn												
COT												
Fe DCB												
Mn DCB												

Figura 15 – As variáveis selecionadas no Teste H foram assinaladas em amarelo em cada área.
Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Na próxima etapa foi feita a determinação do parâmetro Wilk's Lambda (Λ^*) para a análise de variância multivariada com os elementos traçadores selecionados no teste Kruskal-Wallis. Os elementos traçadores foram testados na análise de variância sendo selecionados para o modelo de classificação os que apresentaram os menores valores de Λ^* .

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os Elementos Traçadores selecionados nas áreas 1, 2 e 3 respectivamente.

Quando observamos os resultados na Tabela 6, mais especificamente, na Área 1.1, o conjunto de ET selecionados explica em torno de 74% das diferenças entre as fontes, já que na Área1.1 o conjunto de ET reduziu o erro para em torno de 26%. Observa-se que quanto maior for o número de Elementos Traçadores selecionados, menor é o erro, no entanto, um número grande de Elementos Traçadores selecionados pode dificultar a análise da contribuição de cada fonte (Minella *et al.*, 2007).

Todas as áreas se apresentaram mais restritivas na seleção dos ET em relação ao teste anterior a única exceção foi a área A2.3 que manteve todos os Elementos Traçadores selecionados no teste Kruskal-Wallis após a aplicação do teste Wilk's Lambda.

Tabela 6 – Variáveis selecionadas na área1

ÁREA1.1		ÁREA 1.2		ÁREA 1.3		ÁREA 1.4	
ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*
COT	0,4371242	COT	0,4371242	P	0,7148518	COT	0,4371242
Cr	0,3759623	Cr	0,3759623	Fe DCB	0,5327130	Cr	0,3759623
Fe DCB	0,2967220	Fe DCB	0,296722	Cr	0,3359300	Fe DCB	0,2967220
Mn DCB	0,2632915	Mn DCB	0,2632915			Mn DCB	0,2632915

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Tabela 7 – Variáveis selecionadas na área 2

ÁREA 2.1		ÁREA 2.2		ÁREA 2.3		ÁREA 2.4	
ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*
Na	0,7831768	Na	0,6953280	Zn	0,7653262	Mn	0,8468494
COT	0,5895939	Ba	0,5271646	Mg	0,5008943	Mn DCB	0,6056823
Ba	0,4962314	COT	0,4083159	Ba	0,3917965	Co	0,4364640
Fe	0,4258758	Mn DCB	0,3522954	Ca	0,3119643	Fe	0,3677702
Mg	0,3612740	Fe	0,3125559	Fe	0,2670732	Mg	0,3439561
Mn DCB	0,3308533	Mg	0,2634043	Mn DCB	0,2372032		
				Co	0,2049345		
				Mn	0,1895486		

. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Tabela 8 – Variáveis selecionadas na área 3.

ÁREA 3.1		ÁREA 3.2		ÁREA 3.3		ÁREA 3.4	
ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*	ET	Λ^*
Mn	0,4127535	Mn	0,32952185	Mn	0,3735241	Mn	0,30877070
Na	0,2846511	Mn DCB	0,07956049	As	0,2855492	As	0,24611612
Ba	0,2280937	Ba	0,06171918	In	0,2282812	Ni	0,19837897
In	0,1874580			Ba	0,1777355	Ba	0,11037294
				Ni	0,1268795	Cd	0,09010645
				Cd	0,1019870		

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Os três testes feitos até o momento tiveram como principal objetivo selecionar as variáveis que melhor se apresentam como Elementos Traçadores, com objetivo de se fazerem eficazes na discriminação das fontes dos sedimentos. As Figuras 16,17 e 18 sintetizam os resultados obtidos para as áreas 1, 2 e 3 respectivamente.

A1.1	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Cr; P; COT; Fe DCB; Mn DCB
	WI	COT; Cr; Fe DCB; Mn DCB
A1.2	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Cr; P; COT; Fe DCB; Mn DCB
	WI	COT; Cr; Fe DCB; Mn DCB
A1.3	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Ni; P; V; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Cr; P; Fe DCB; Mn DCB
	WI	P; Fe DCB; Cr
A1.4	TC	Al; As; Ba; Cd; Co; Cr; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Ni; V; COT; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Cr; COT; Fe DCB; Mn DCB
	WI	COT; Cr; Fe DCB; Mn DCB

Figura 16 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal-Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 1. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

A2.1	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Ba; Ca; Co; Fe; Mg; Mn; Na; COT; Mn DCB.
	WI	Na; COT; Ba; Fe; Mg; Mn DCB.
A2.2	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Ba; Ca; Co; Fe; Mg; Mn; Na; COT; Mn DCB.
	WI	Na; Ba; COT; Mn DCB; Fe; Mg.
A2.3	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Ni; V; Zn; Fe DCB; Mn DCB
	Kw	Ba; Ca; Co; Fe; Mg; Mn; Zn; Mn DCB.
	WI	Zn; Mg; Ba; Ca; Fe; Mn DCB; Co; Mn.
A2.4	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB.
	Kw	Ba; Ca; Co; Fe; Mg; Mn; COT; Mn DCB
	WI	Mn; Mn DCB; Co; Fe; Mg.

Figura 17 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal-Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 2. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

A3.1	T C	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB.
	Kw	As; Ba; Cd; Co; Ga; In; Mn; Na; Ni; Fe DCB; Mn DCB
	WI	Mn; Na; Ba; In.
A3.2	TC	Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Mn; Na; Ni; P; V; Zn; COT; Fe DCB; Mn DCB.
	Kw	Ba; Cd; Co; Cu; Ga; In; Mn; Na; Ni; Fe DCB; Mn DCB
	WI	Mn; Mn DCB; Ba.
A3.3	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mg; Mn; Ni; P; V; Zn; Fe DCB.
	Kw	As; Ba; Cd; Co; Ga; In; Mn; Ni; Fe DCB.
	WI	Mn; As; In; Ba; Ni; Cd.
A3.4	TC	Al; As; Ba; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; Ga; In; K; Li; Mn; Ni; P; V; Zn; COT.
	Kw	As; Ba; Cd; Co; Ga; In; Mn; Ni.
	WI	Mn; As; Ni; Ba; Cd.

Figura 18 – Síntese dos resultados do Teste de Conservação (TC), Kruskal-Wallis (KW) e Wilks Lambda (WI) da área 3. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Observa-se que a área 2 (Figura 17) é a que apresenta o maior número de Elementos Traçadores para a etapa final de classificação. Isso poderá estar associado ao número de amostras utilizadas, já que nas áreas 1 e 3 tivemos 33 e 30 amostras analisadas respectivamente e na área 2 utilizamos 86 amostras nas análises.

A determinação da contribuição de cada fonte de sedimento (%). está exposta na Tabela 9, para as três áreas. O critério global de qualidade de ajuste (*Gof.* do inglês *goodness-of-fit*) se apresentou satisfatório (>50%) em 7 das 12 avaliações feitas e das 5 restantes somente a área 2.3 apresentou um valor crítico (30%).

A área 1 foi a que no todo apresentou a maior consistência frente aos valores do GOF, sendo que as contribuições das fontes não apresentaram valores inconsistentes. Na área 2 encontramos os valores mais baixos do GOF, no estudo, e é nesta área que obtivemos dois valores de contribuição de 0% (A 2.3 LAVOURA e A 2.1 CAMPO) sendo que a hipótese de contribuição zero de uma fonte ser muito improvável de acontecer. Nossa constatação é que apesar de a área 2 ser a área de maiores números de amostras (66) a malha amostral não se mostrou eficaz para a representação das fontes de sedimento. Na área 3 tivemos dois valores de GOF acima de 50% (A3.1 63% e A3.2 60%) e dois valores abaixo de 50% (A3.3 42% e A3.4 43%).

Tabela 9 – Resultados das contribuições das fontes. Calha (CAL), Lavoura (LAV) e Campo (CAM), para os sedimentos com os valores do Critério Global de Qualidade de Ajuste (GOF) para cada subárea

	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4	A3.1	A3.2	A3.3	A3.4
GOF	57%	61%	74%	74%	45%	46%	30%	51%	63%	60%	42%	43%
CAL	46%	1%	18%	18%	7%	51%	99%	9%	25%	81%	74%	84%
LAV	12%	20%	47%	47%	93%	29%	0%	41%	5%	11%	1%	4%
CAM	42%	79%	35%	35%	0%	20%	1%	51%	70%	8%	25%	12%

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Outra observação é que as amostras que apresentaram maior GOF (74%) foram as amostras A1.3 e A1.4. e apesar de terem sido selecionados Elementos Traçadores diferentes (P; Fe DCB; Cr / COT; Cr; Fe DCB; Mn DCB respectivamente) apresentaram as mesmas contribuições das fontes, onde a lavoura se apresentou como a principal contribuinte (47%), coerente com a proporção entre as áreas de lavoura e campo das subáreas apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Proporção entre lavoura e campo nas subáreas

	Área 1	Área 2	Área3	Total
Campo	30,0%	56,2%	57,0%	53,4%
Lavoura	65,8%	40,3%	42,9%	43,7%

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

O estudo se apresenta com uma proposta de análise das contribuições das fontes de forma temporal. sendo que fatores como quantidade de chuva e calendário agrícola podem explicar os resultados obtidos nas contribuições das fontes junto aos sedimentos. A Tabela 11 sintetiza os dados para balizar essa discussão.

Tabela 11 – Dados de precipitação pluviométrica e calendários agrícola para soja e milho referente ao período de estudo

Data da coleta	Intervalo entre as coletas	Calendário agrícola para soja e milho	Dias entre as coletas	Volume chuva no período (mm)	Média / mês (mm)	Média /dia (mm)	Média de dias de chuva
05/12/2019	set a dez de 2019	Plantio/preparo	95	738,9	147,8	7,7	7,2
29/04/2021	jan. /20 a abril/21	Ciclo completo	539	1987,5	124,2	3,7	6,8
08/12/2021	maio/21 a dez/21	Plantio/preparo	219	898,1	112,3	4,1	6,3
09/05/2022	jan./22 a maio /22	Colheita	151	551,2	110,2	3,6	6,0

Fonte :elaborada pelo autor (2024).

O período que antecede a coleta de 05/12/2019 corresponde ao maior média de chuvas tanto no mês (147,8mm) como em dia (7,7mm) e este período também compreende a época de preparo do solo e do plantio das duas principais culturas da BHAÉ que são o milho e a soja. Seria esperado ter nesse período uma maior desagregação do solo, mesmo tendo técnicas conservacionistas, sendo aplicada pelos produtores. Com maior intensidade de chuvas e solo mais desagregado seria esperado ter uma contribuição da fonte LAVOURA mais marcante, isso só se manifestou na amostra A 2.1 com 93%, sendo que, nas outras duas subáreas de estudo, foi o contrário obteve-se 12% de contribuição da LAVOURA na amostra A 1.1 e 5% na amostra A 3.1.

A outra coleta de sedimento que foi posterior ao período de preparo e plantio foi a de 08/12/2021, neste caso, a média de chuvas no período, tanto no mês(112,3mm) como dia (4,1mm) se apresentaram como as segundas de menor valor, novamente os resultados da área 1 se apresentaram mais coerentes com o esperado tendo a LAVOURA com sua principal fonte. (A 1.3 LAVOURA 47%). Área 3 com 1% de contribuição da LAVOURA (A 3.3) e a área 2 com 0% de contribuição da LAVOURA (A 2.3).

A coleta feita em 29/04/2021, foi a que teve o maior intervalo, como já mencionado, em virtude das restrições protocolares relativas à Covid-19 (539 dias), é evidente que teríamos o maior volume de chuvas no período (1987,5mm), mas teve a segunda maior média mensal (124,2mm) e a terceira maior média diária (3,7mm), sendo que neste período tivemos quase dois ciclos completo agrícolas (preparo, plantio e colheita). Neste caso, a fonte CALHA foi o principal contribuinte tanto na

área 2 (A 2.2 51%) como na área 3 (A 3.2 81%). Na área 1 a fonte CAMPO foi quem mais contribuiu para os sedimentos (79%).

A última coleta de sedimentos foi em 09/05/2022, com um período entre coletas de 151 dias, tendo o menor volume de chuvas de todo o estudo (551,2 mm) e com as menores médias mês (110,2 mm) e dia (3,6 mm). Não tendo a chuva como um fator muito significativo, neste período, a análise se voltou para relação campo e lavoura. Desta forma, na área 1 tem-se a lavoura com 65,8% sendo que sua contribuição para os sedimentos foi a maior entre as fontes estudadas (47%). Na área 2 o campo tem a maior proporção (56%), refletindo na contribuição da fonte CAMPO com 51% a maior entre as 3 fontes. Na área 3 foi a CALHA que se apresentou como sendo a principal contribuinte (84%).

4.4 Conclusão

O método “*Fingerprinting*” mostrou ser adequado para a identificação das fontes de produção de sedimentos na bacia analisada. O número de variáveis selecionadas se mostrou suficiente para permitir uma avaliação das contribuições das fontes para o sedimento.

A área 1 foi a que apresentou os melhores resultados. Tendo, P; Fe DCB; Cr, COT, Mn DCB como os elementos traçadores principais e as fontes CAMPO E LAVOURA como as que mais contribuíram para a formação dos sedimentos. Estes resultados se devem a malha amostral se apresentar proporcionalmente mais bem distribuída na área 1. A relação contrária se deu nos resultados obtidos na área 2.

A abordagem promovida pelo método “*Fingerprinting*” é capaz de fornecer informações úteis sobre os processos de transporte de elementos químicos presentes no solo da região que são transportados pelo escoamento superficial até a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica com potencial de ser usado na tomada de decisões, junto à Gestão Ambiental de Bacias Hidrográficas.

5 Capítulo 2 - Estimativa do índice de sustentabilidade de bacias hidrográficas (Watershed Sustainability Index-WSI) adaptado para a bacia hidrográfica do arroio Epaminondas

5.1 Introdução

Quando se fala em desenvolvimento, tem-se um conjunto de processos dinâmicos, oriundos de mercado, que contemplam a geração de renda, empreendimento de financiamentos e acumulação de capital, que ao longo do tempo, teve as dimensões sociais, ambientais e políticas atreladas a sua contextualização (Molina, 2019).

Nas últimas décadas, as dimensões sociais e ambientais atreladas ao desenvolvimento de uma região vêm se apresentando como preponderantes nas tomadas de decisões, rumo a um processo de desenvolvimento de uma região.

Sendo assim, este processo se identifica como “Desenvolvimento Sustentável”, proposta que se apresenta norteadora para diversas organizações mundiais (ONU, AEA, EU, OCDE, BM, FMI entre outros). No entanto se faz necessário estabelecer onde e como mensurar este desenvolvimento sustentável.

Segundo Bernardi *et al.* (2012), a bacia hidrográfica possui características essenciais, que permitem a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividade ambiental, especialmente por ser um processo descentralizado de conservação e proteção do ambiente. Para o planejamento e a gestão de bacias hidrográficas, rumo ao desenvolvimento sustentável, é necessário um sistema de informações coerentes a partir do qual os indicadores são derivados (Branchi; Ferreira, 2020).

A partir de indicadores é possível compartilhar diversas informações que facilitarão o processo decisório e a comparação e mensuração dos resultados entre o que foi planejado e realizado (Molina, 2019). Entre os diversos modelos que visam identificar a interação entre sociedade e meio ambiente, levando em consideração a

especificidade de uma bacia hidrográfica, aplicar-se-á o Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas - *Watershed Sustainability Index* (WSI) neste estudo.

5.2 Metodologia

Esta pesquisa se desenvolveu na Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas, conforme caracterização feita no item 3.

O desenvolvimento do Índice de Sustentabilidade de Bacias-WSI (Chaves; Alipaz, 2007) teve o propósito de atender aos seguintes critérios:

- a) estrutura simples e aplicação universal;
- b) incorporar relações causa-efeito, facilitando seu entendimento e aplicação;
- c) parâmetros preferencialmente quantitativos e de fácil obtenção;
- d) incorporar os efeitos de variabilidade ou mudança climática;
- e) matematicamente robusto.

No cálculo do índice de sustentabilidade primeiramente estabelecemos os subíndices das dimensões HELP composto por quatro dimensões: hidrológica (H – *hydrology*), ambiental (E – *environment*), social (L – *life*) e política (P – *policy*), utilizando os indicadores de Pressão-Estado-Resposta PER de cada dimensão aplicando a equação 1

$$\text{Subíndice} = \frac{Pi+Ei+Ri}{3} \quad (1)$$

Sendo que o subíndice será H se a dimensão for hidrologia, e se a dimensão for a ambiental, L se for social e P se a dimensão for política.

Uma vez calculados os subíndices o WSI foi calculado como a média aritmética dos subíndices conforme a equação 2.

$$\text{WSI} = \frac{H+E+L+P}{4} \quad (2)$$

Os parâmetros quantitativos ou qualitativos dos indicadores que compõem o WSI receberam uma pontuação que se enquadra em cinco níveis (0 – muito ruim; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00 – excelente). Observa-se, pelo exposto acima, que os

indicadores têm o mesmo peso, uma vez que não há evidências de que algum parâmetro deva ser superior (Chaves; Alipaz, 2007).

Após atribuir pontuação a todos os parâmetros distribuídos nas dimensões do HELP, foi realizado o cálculo global do WSI, no qual o nível de sustentabilidade da bacia é classificado em baixo ($WSI < 0,5$), intermediário ($0,5 \leq WSI \leq 0,8$) ou alto ($WSI > 0,8$) (Souza; Paula, 2019).

Sendo assim, para cada dimensão do modelo HELP foram adotados os indicadores do modelo PER indicados na Figura 19. O período de 2019-2022 é a referência para análises e cálculos efetuados.

	Pressão(P)	Estado(E)	Resposta(R)
Dimensão	Indicadores		
Hidrológicos H	Variação da disponibilidade de água per capita na bacia no período (2019 e 2022)	Disponibilidade de água per capita da bacia (2019)	Evolução na eficiência do uso da água (2019 e 2022)
	Variação do índice de qualidade de água (DBO5) da bacia	Média anual do índice de qualidade de água da bacia (DBO5) (2019)	Evolução da relação entre o esgoto tratado e a água consumida (2019 e 2022)
	Variação da qualidade do sedimento da bacia no período de tendo como referência a resolução do CONAMA. nº454 (2019/2022)	Média anual da variação nos padrões de qualidade do sedimento (2019)	Evolução da qualidade do sedimento no período (2019 e 2022)
Ambientais E	Índice de pressão antrópica na bacia	% da área da bacia com vegetação natural (2019)	Evolução das áreas de conservação na bacia (2019 e 2022)
Sociais L	Variação do Índice de desenvolvimento humano-renda	Índice de desenvolvimento humana (IDH) na bacia (2019)	Evolução do IDH da bacia (2019 e 2022)
Políticos P	Variação do Índice de desenvolvimento da Educação básica (IDEB)	Capacidade institucional e legal em Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos na bacia	Evolução dos gastos com Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos na bacia

Figura 19 – Estrutura dos indicadores que compõem o Índice de Sustentabilidade para Bacias Hidrográficas (WSI) da BHAÉ. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Com o intuito de melhor expor os indicadores e parâmetros do WSI, as três colunas da Figura 19, foram subdivididas em 3 tabelas, correspondendo aos parâmetros de Pressão (Tabela 12), Estado (Tabela 13), e Resposta (Tabela 14) e seus respectivos indicadores.

5.2.1 Parâmetro Pressão

No indicador PRESSÃO-HIDROLÓGICO foi feita a abordagem da quantidade e qualidade da água, e de forma original, estamos introduzindo no indicador hidrológico a qualidade química dos sedimentos da BHAE. Tomando como base a resolução nº 454 de 2012 do CONAMA, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, que vem a ser a única legislação que aborda qualidade do sedimento no Brasil.

Os elementos selecionados foram: Arsenio (As); Cadmio (Cd); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Níquel (Ni) e Zinco (Zn). A escolha recaiu nestes elementos, pois estão contemplados na Resolução do CONAMA e estão contemplados nas análises químicas feitas para o trabalho.

Salientamos que foram utilizados os dados do torpedo 2 coletados no período do estudo, cujo, local de coleta das amostras de sedimento coincide com a posição de coleta de amostras de água para as análises feitas pelo Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP) e que foram utilizadas para avaliar a qualidade da água. Foi calculada a variação de cada elemento selecionado o que levou ao escore individual, e se fez a média deste escore (Apêndice C).

Na quantidade de água aplicou-se a variação da disponibilidade de água per capita, no período ($m^3/(\text{hab. ano})$), enquanto na qualidade da água o parâmetro utilizado foi a variação da DBO5 (demanda biológica de oxigênio por 5 dias) no período, sendo este um parâmetro amplamente usado nos monitoramentos de qualidade de água das bacias hidrográficas (Apêndice D).

No indicador PRESSÃO-AMBIENTAL foi utilizado o Índice de Pressão Ambiental (EPI). Que vem a ser a média entre o percentual de variação da área agrícola e o percentual de variação da área urbana. Tanto a variação da área agrícola como a variação da área urbana são responsáveis por impactos ambientais numa bacia hidrográfica, impactos esses que atuam como elementos de pressão junto ao ecossistema da BH. O valor de EPI ao ser positivo indica um aumento do impacto ambiental e quando negativo indica uma diminuição do impacto (Chaves, 2009) (Apêndice E).

Para o indicador PRESSÃO-SOCIAL foi utilizado a variação do IDH – renda, partindo da premissa que uma população com maiores recursos estará em condições de visualizar a necessidades de investir na sustentabilidade da BH (Apêndice F).

No indicador PRESSÃO-POLÍTICO o ‘IDH – educação’. implica que uma população mais educada e esclarecida vê a necessidades de agir na sustentabilidade da BH em que vive. (Apêndice F)

Tabela 12 – Apresentação dos subíndices do parâmetro PRESSÃO com seus níveis e respectivos escores

INDICADOR	PARAMETRO	NIVEL	ESCORE
H (Hidrológicos)	$\Delta 1$ - Variação da disponibilidade de água per capita. no período (m3/(hab-ano))	$\Delta 1 < -20\%$	0,00
		$-20\% \leq \Delta 1 < -10\%$	0,25
		$-10\% \leq \Delta 1 < 0\%$	0,50
		$0 \leq \Delta 1 < +10\%$	0,75
		$\Delta 1 \geq +10\%$	1,00
	$\Delta 2$ - Variação da DBO5 da bacia no período (média)	$\Delta 2 > 20\%$	0,00
		$20\% \leq \Delta 2 < 10\%$	0,25
		$10\% \leq \Delta 2 < 0\%$	0,50
		$0 \leq \Delta 2 < -10\%$	0,75
		$\Delta 2 \geq -10\%$	1,00
	$\Delta 3$ Variação da qualidade do sedimento no período	$\Delta 3 > +10\%$	0,00
		$+10\% \leq \Delta 3 < 0$	0,25
		$0\% \leq \Delta 3 < -10\%$	0,50
		$-10\% \leq \Delta 3 < -20\%$	0,75
		$\Delta 3 \leq -20\%$	1,00
E (Ambientais)	EPI da bacia no período	$EPI > 20\%$	0,00
		$20\% \geq EPI > 10\%$	0,25
		$10\% \leq EPI < 5\%$	0,50
		$5\% \leq EPI < 0\%$	0,75
		$EPI \leq 0\%$	1,00
L (Sociais)	Variação no IDHM-renda per capita na bacia. no período	$\Delta < -20\%$	0,00
		$-20\% \leq \Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% \leq \Delta < 0\%$	0,50
		$0 \leq \Delta < +10\%$	0,75
		$\Delta \geq +10\%$	1,00
P (Políticas)	Variação do IDHM-educação no período	$\Delta < -20\%$	0,00
		$-20\% \leq \Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% \leq \Delta < 0\%$	0,50
		$0 \leq \Delta < +10\%$	0,75
		$\Delta \geq +10\%$	1,00

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

5.2.2 Parâmetro Estado

No parâmetro ESTADO – HIDROLOGIA, observou-se a quantidade e qualidade da água na BH no momento, tomamos como base o ano de 2022, por ser o fim do período estudado. Para a quantidade adotamos o Índice de Falkenmark (Conejo *et al.*,

2009) que indica a disponibilidade hídrica. A disponibilidade hídrica foi calculada através da equação 3 (Apêndice G).

$$DH = (P - ET) \cdot Ab / Pop \quad (3)$$

Onde:

DH = Disponibilidade Hídrica ($m^3/(hab \cdot ano)$);

P = precipitação anual na área da bacia hidrográfica (m);

ET = evapotranspiração anual na área da bacia hidrográfica (m);

Ab = área da BHAE (m^2);

Pop = população da BHAE.

Temos no Índice de Falkenmark cinco classes de situação hídrica, apresentadas na Figura 20.

Classe hídrica	Descrição	Água disponível ($m^3/(hab \cdot ano)$)
Além da barreira hídrica	Problemas crônicos e em grande escala de suprimento de água, que se tornam catastróficos durante as secas. Limite da capacidade de gerenciamento dos recursos hídricos	<500
Escassez crônica de água	Problemas crônicos de suprimento de água que se tornam piores durante a estação seca; secas severas são frequentes	500 a 1.000
Tensão hídrica	Frequentes problemas sazonais de suprimento e de qualidade de água, acentuados por secas ocasionais	1.000 a 1.666
Problemas moderados	Alguns problemas sazonais de suprimento e de qualidade de água, com alguns efeitos adversos durante secas severas	1.666 a 10.000
Dotação adequada	Raros problemas de suprimento e qualidade de água, exceto durante condições de secas extremas	> 10.000

Figura 20 – Classe de disponibilidade hídrica segundo Índice de Falkenmark. Fonte: Falkenmark e Winstrand (1992), adaptado por Maranhão (2007).

Na qualidade usamos a média do DBO5 no ano de 2022 (Apêndice D). Para os sedimentos foi feita a média dos valores das quatro coletas feitas no período de estudo sendo a variação obtida com base no valor da última coleta no ano de 2022 (Coleta 4), no entanto como são diferentes elementos levamos as médias para os escores individuais para depois obter a média final (Apêndice H).

No parâmetro ESTADO-MEIO AMBIENTE estimou-se a porcentagem da área da bacia que é coberta por vegetação nativa (AV) (Apêndice E). Para o parâmetro ESTADO-SOCIAL usamos o IDHM da bacia para quantificar o nível de qualidade de vida na bacia (Apêndice F). O parâmetro ESTADO-POLÍTICAS faz uma análise quantitativa da capacidade institucional da bacia na gestão integrada de recursos hídricos através da aplicação de um questionário proposto pela UNESCO, para avaliar

a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) de seus membros que foi adaptado a dimensão da BHAÉ, visa a comunicação de informações locais, no caso específico a BHAÉ, sobre o grau de implementação de gestão integrada de recursos hídricos.

O Indicador é medido numa escala de 0 a 100, calculado com base nas pontuações dadas as perguntas presentes no questionário que abrangem diferentes aspectos da GIRH. Responderam este questionário a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), a Secretária de Qualidade Ambiental de Pelotas (SQA) e o Comitê da Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e São Gonçalo. Escolhemos estes entes políticos devido sua importância na GIRH da BHAÉ. O escore foi dado pela média das respostas dos entrevistados (Apêndice J)

Tabela 13 – Apresentação dos subíndices do parâmetro ESTADO com seus níveis e respectivos escores

INDICADOR	PARAMETRO	NIVEL	ESCORE
H (Hidrológicos)	Índice de disponibilidade hídrica de Falkenmark m ³ /hab/ano	<500	0,00
		500 a 1.000	0,25
		1.000 a 1.666	0,50
		1.666 a 10.000	0,75
		> 10.000	1,00
	Média da DBO5 da bacia (2022) em mg/l	DBO > 10	0,00
		10 ≤ DBO < 5	0,25
		5 ≤ DBO < 3	0,50
		3 ≤ DBO < 1	0,75
		DBO ≤ 1	1,00
	Média da variação nos padrões de qualidade do sedimento no período	Δ>20	0,00
		20≤ Δ<0	0,25
		0≤Δ<-10	0,46
		-10≤ Δ<-20	0,75
		Δ≥ -20	1,00
E (Ambientais)	Av:% de vegetação natural remanescente na bacia (2022)	Av < 5	0,00
		5 ≤ Av < 10	0,25
		10 ≤ Av < 25	0,50
		25 ≤ Av < 40	0,75
		Av ≥ 40	1,00
L (Sociais)	IDHM da bacia	IDH<0.5	0,00
		0.5 ≤ IDH < 0.6	0,25
		0.6 ≤ IDH < 0.75	0,50
		0.75 ≤ IDH < 0.9	0,75
		IDH ≥ 0.9	1,00
P (Políticas)	Capacidade legal e institucional na GIRH na BHAÉ	0 – 20	0,00
		21 – 40	0,25
		41 – 60	0,50
		61 – 80	0,75
		81 - 100	1,00

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

5.2.3 Parâmetro Resposta

O parâmetro RESPOSTA-HIDROLOGIA representa os esforços da sociedade, governo e entidades na melhoria da eficiência no uso da água da bacia, de forma quantitativa. A avaliação deste esforço foi feita por meio da variação do Índice Bruto de Perdas Lineares (IBPL) obtido no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Na qualidade da água adotamos a variação do Índice de esgoto tratado referido à água consumida no período do estudo, também obtido no SNIS. O uso destes dois indicadores permitiu diminuir a subjetividade da avaliação (Apêndice D). Nos sedimentos a evolução na qualidade dos sedimentos tendo como referência os valores estabelecidos pela resolução nº454 de 2012, do CONAMA. Foi utilizado para o parâmetro RESPOSTA. Como são diferentes elementos foi levado as variações para os escores individuais, para depois obter a média final (Apêndice H).

No parâmetro RESPOSTA-MEIO AMBIENTE a evolução nas áreas de mata nativa na BHAEE, tendem a refletir uma preocupação com os recursos hídricos e ambientais (Apêndice I). A melhoria na qualidade de vida refletida por uma evolução do IDH faz com que preocupações com a melhor gestão dos recursos hídricos venha ser uma preocupação da sociedade e autoridades, sendo um bom indicador social (L) (Apêndice F). A evolução dos gastos com a gestão integrada de recursos hídricos na bacia. acompanha essa ideia e é usada no parâmetro RESPOSTA-POLÍTICAS através da utilização de um Indicador de Investimento Total por Arrecadação no percentual (%) no período, obtido através do SNIS (Apêndice D).

Tabela 14 – Apresentação dos subíndices do parâmetro RESPOSTA com seus níveis e respectivos escores.

INDICADOR	PARAMETRO	NIVEL	ESCORE
H (Hidrológicos)	Variação da perda no período (2019-2022) através do IBPL	$\Delta < 10\%$	0,00
		$10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% \leq \Delta < -20\%$	0,75
		$\Delta \geq -20\%$	1,00
	Variação na relação entre o esgoto tratado e a água consumida (%)	$\Delta < 10\%$	0,00
		$10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% \leq \Delta < -20\%$	0,75
		$\Delta \geq -20\%$	1,00
	Evolução da qualidade do sedimento no período (2019 / 2022)	$\Delta < 10\%$	0,00
		$10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% \leq \Delta < -20\%$	0,75
		$\Delta \geq -20\%$	1,00
E (Ambientais)	Evolução nas áreas de mata nativa na bacia. no período estudado	$\Delta < -10\%$	0,00
		$-10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < 10\%$	0,50
		$10\% \leq \Delta < 20\%$	0,75
		$\Delta \geq 20\%$	1,00
L (Sociais)	Evolução do IDH da bacia. no período estudado	$\Delta < -10\%$	0,00
		$-10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < 10\%$	0,50
		$10\% \leq \Delta < 20\%$	0,75
		$\Delta \geq 20\%$	1,00
P (Políticas)	Evolução do Indicador de investimento total por arrecadação (%)	$\Delta < -10\%$	0,00
		$-10\% \leq \Delta < 0\%$	0,25
		$0\% \leq \Delta < 10\%$	0,50
		$10\% \leq \Delta < 20\%$	0,75
		$\Delta \geq 20\%$	1,00

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

5.3 Resultados e discussão

Na bacia em estudo identificou-se os usos do solo em 2019 (Figura 21) e 2022 (Figura 22). Observa-se que neste período houve uma diminuição da área de mata nativa, de 7,3 Km² para 5,5 Km². Também houve uma diminuição da área agropecuária, de 21,3 Km² para 20,5 Km². A mata plantada teve um aumento muito pequeno de 2,5 Km² para 2,6 Km². Já as áreas alagadas apresentaram um aumento significativo, de 0,4 Km² para 3,0 Km².

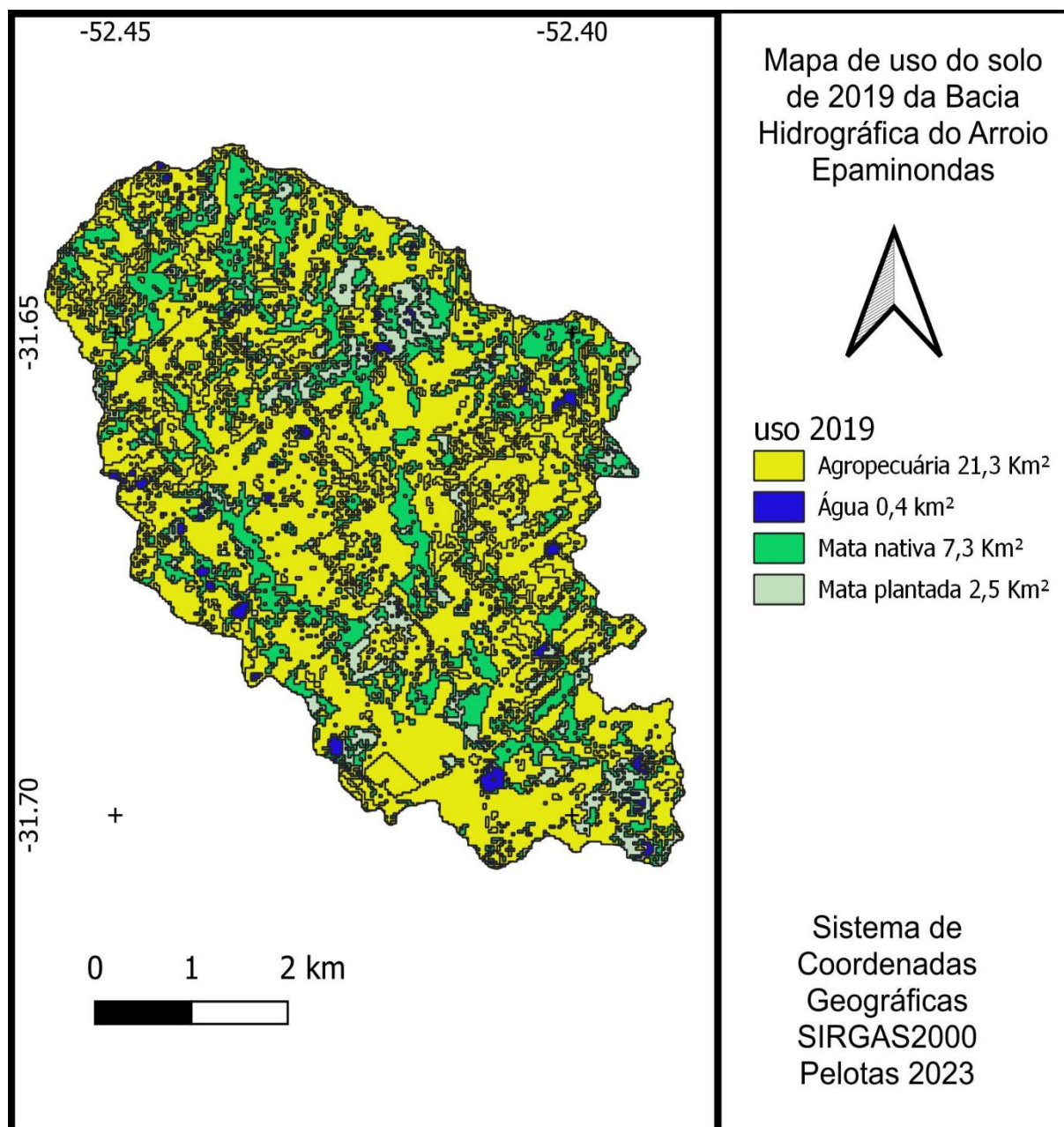


Figura 21 – Uso do solo na BHAEE em 2019. Fonte: elaborada pelo autor (2024).

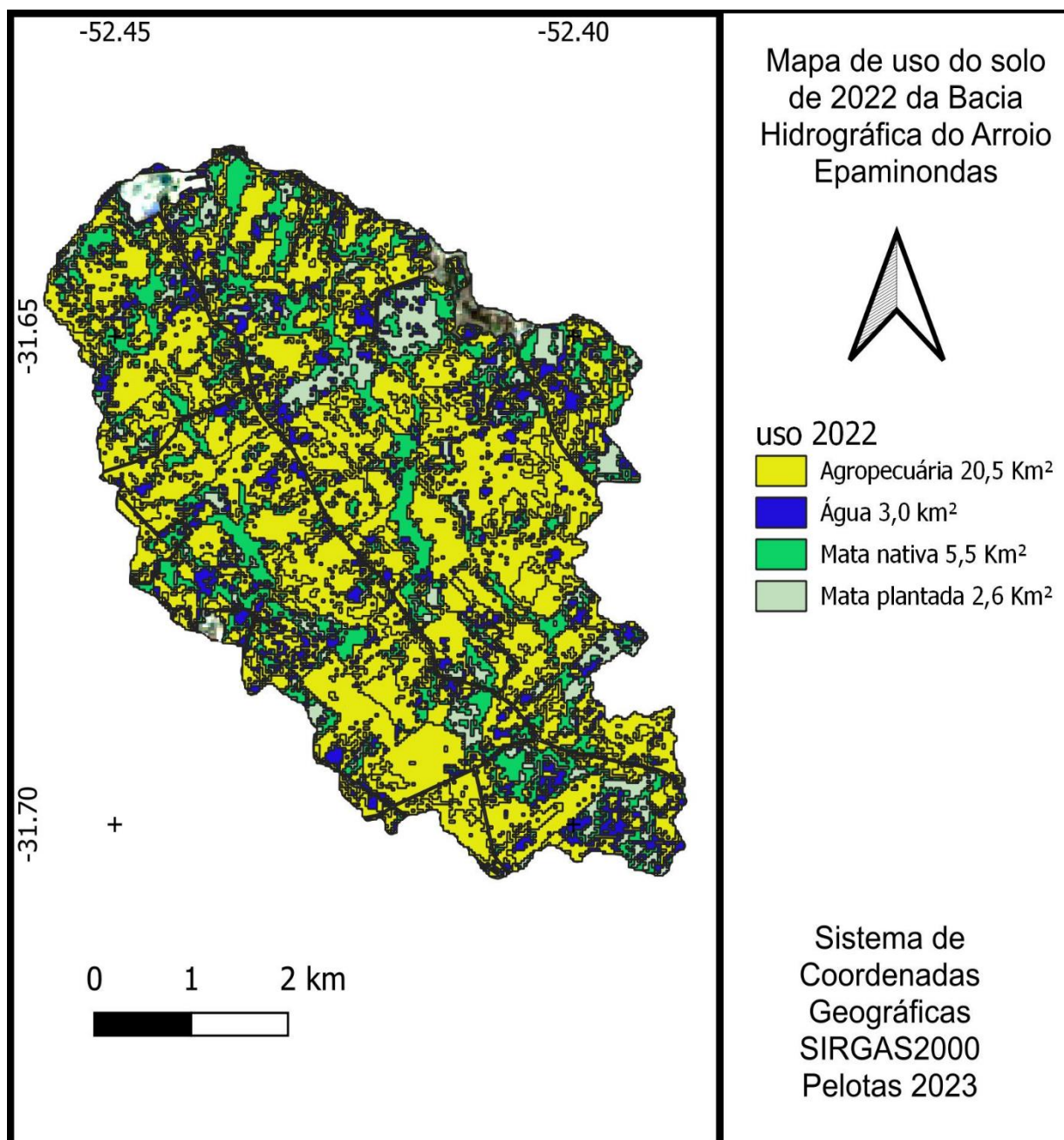


Figura 22 – Uso do solo da BHAEE em 2022. Fonte :elaborada pelo autor (2024).

A originalidade desta proposta de estudo está na utilização do parâmetro, qualidade do sedimento, tendo como referência de qualidade a Resolução nº 454 do CONAMA. Sendo assim, é importante salientar que, apesar do escore obtido para este parâmetro ser igual a zero (0), indicando um aumento dos valores dos elementos no sedimento, os valores obtidos nas análises dos sedimentos ficaram abaixo do Nível 1 estabelecidos pela resolução, que define como sendo o limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota, e o Nível 2 como o limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota, conforme expressados na

Tabela 15. Isto implica que os sedimentos estudados não apresentam a probabilidade de efeitos adversos à biota da bacia em estudo.

Tabela 15 – Valores dos sedimentos coletados no período relacionados como os níveis da Resolução do CONAMA nº454. Os valores são apresentados em mg/Kg

Elementos	Nível 1	Nível 2	T2-1 2019	T2-4 2022
As	5,9	17	1,02	1,88
Cd	0,6	3,5	0,2	0,3
Cu	35,7	197	0,72	8,43
Cr	37,1	90	1,79	2,86
Ni.	18	35,9	1,46	2,96
Zn	123	315	4,7	20,9

Fonte: elaborada pelo autor (2024).

Observando a Tabela 15, tem-se o Zinco (Zn) e o Cobre (Cu) como sendo os elementos que apresentaram maior aumento, apesar que todos os elementos estudados, também, aumentaram sua concentração nos sedimentos no período, a associação destes elementos nos produtos fitossanitários e em fertilizantes pode indicar uma explicação para esse aumento.

Ao analisarmos os valores obtidos nos subíndices do WSI da BHAÉ (Tabela 16) constatamos a presença de 10 parâmetros considerados limitantes, definidos como sendo aqueles que tem valor menor ou igual a 0,50 entre os 18 parâmetros calculados. Os parâmetros identificados como “gargalos”, aqueles que apresentam valores entre 0 e 0,25 (Chaves, 2009), somaram 4.

Tabela 16 – Resultados dos escores (Esc.) dos parâmetros do WSI da BHAÉ

Indicador	Pressão		Estado		Resposta		Esc. médio	Esc. final
	Parâmetro	Esc.	Parâmetro	Esc.	Parâmetro	Esc.		
H	Δ1- Variação da disponibilidade de água per capita. no período (m3/hab/ano)	0,75	Índice de Falkenmark para 2022	1,00	Variação da perda no período (2019-2022) através do IBPL	0,50	0,75	0,47
	Δ2- Variação da DBO5 da bacia no período (média)	0,75	Média da DBO5 da bacia no período estudado em mg/l	0,25	Variação na relação entre o esgoto tratado e a água consumida (%)	0,50	0,50	
	Δ3 Variação da qualidade do sedimento no período	0,00	Média anual da variação nos padrões de qualidade do sedimento	0,50	Evolução da qualidade do sedimento no período (2019-2022)	0,00	0,16	
E	EPI da bacia no período	0,75	% de vegetação natural remanescente na bacia (Av)	0,50	Evolução nas áreas de mata nativa na bacia. no período estudado	0,00		0,41
L	Variação no IDHM-renda per capita na bacia. no período	0,75	IDHM da bacia	0,75	Evolução do IDH da bacia. no período estudado	0,50		0,66
P	Variação do IDHM- educação no período	0,75	Capacidade legal e institucional na GIRH na BHAÉ	0,50	Evol.do Indicador de investimento total por arrecadação (%)	1,00		0,75
Índice de Sustentabilidade da BHAÉ - WSI							0,57	

Fonte: adaptado de Souza; Paula (2019).

A dimensão Hidrológico (H), no que diz respeito a quantidade os valores ficaram no nível considerado muito bom (0,75), não indicando uma situação de estresse hídrico na bacia. Na qualidade o índice se apresentou no valor intermediário (0,50).

Quanto à qualidade do sedimento, o valor obtido se coloca como muito baixo (0,16) sendo o menor entre todos os subíndices. Entretanto isso não indica que o sedimento analisado se apresenta com uma qualidade crítica, pelo contrário, como já explicitado na Tabela 15, os valores estão bem abaixo dos padrões considerados preocupantes da resolução nº454 do CONAMA. O padrão determinado pela resolução se apresenta muito restritivo, forçando o indicador para valores baixos. Para a

avaliação de sedimentos pouco impactados antropogenicamente o ideal seria ter os valores basais da região.

Na dimensão Ambiental (E) o parâmetro evolução das áreas de mata nativa (0,00), foi identificado uma redução da área de mata nativa no período de 24,6% determinando que a dimensão Ambiental se estabeleça no nível baixo. A dimensão Social (L) tem parâmetros associados ao IDHM e ao IDH-Renda que permaneceram constantes no período do estudo, no entanto como os valores são classificados como bons (IDHM 0,769; IDHM-Renda 0,636) tem-se a classificação desta dimensão com um valor intermediário (0,66).

Por último, a dimensão Política (P) apresentou o maior valor entre os subíndices (0,75). O IDHM-Educação se manteve constante no período, logo sua variação foi 0. O fato de não piorar o índice é visto como um critério positivo, na escala apresentada, determinando um valor alto (0,75). A capacidade legal e institucional na GIRH na BHAIE, que foi aferida pelo questionário proposto pela UNESCO, para avaliar a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) de seus membros adaptado à dimensão da BHAIE, se apresentou com um valor intermediário (0,50). Já a evolução do indicador de investimento total por arrecadação no sistema de abastecimento de Pelotas (63%), usado neste estudo para avaliar a resposta da sociedade na GIRH obteve o maior valor entre todos os subíndices (1,00).

5.4 Conclusão

O WSI da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas obtido nessa pesquisa foi de 0,57, considerado intermediário. Os indicadores Hidrológico (H) e do Meio Ambiente(E), foram os que mais contribuíram para este enquadramento.

A utilização da qualidade do sedimento como um novo componente do indicador Hidrológico, não afetou de forma determinante o WSI da bacia, já que sem computar este novo elemento o WSI da BHAIE continuaria intermediário (0,61). Isso se deve ao fato da resolução nº 454 do CONAMA, ser muito restritiva principalmente em áreas de pouco impacto antropogênico, para esta áreas valores basais do sedimento se apresentam mais adequados. No entanto a utilização deste parâmetro apresentou o potencial de ser mais representativo na mensuração da qualidade do ambiente das bacias a serem estudadas no futuro, já que, a qualidade do sedimento

tende a ter um comportamento mais persistente no ambiente, possibilitando um registro mais temporal, principalmente nas bacias com maior impacto antropogênico.

O Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográfica – WSI, com a utilização de indicadores objetivos, permitiu uma análise conjunta das quatro dimensões que o compõem, mas com a possibilidade de identificar as questões críticas na gestão de uma bacia.

Sendo assim, uma vez estabelecidos os indicadores que possam ser acessados em séries históricas consistentes, o WSI se posiciona como um bom instrumento para mensurar a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, a ser usado pelos entes responsáveis pela gestão ambiental de uma bacia hidrográfica.

6 Conclusão geral

Foi possível através do nosso estudo: correlacionar as fontes de produção de sedimentos com os processos de avaliação da sustentabilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAÉ) e confirmar a hipótese de que diferentes usos de solo na BHAÉ podem ter mais de um elemento com características de traçadores das fontes de sedimento presentes em seus cursos d'água.

A aplicação da técnica *Fingerprinting* mostrou-se adequada para identificação das fontes de sedimentos na bacia, obtendo-se a partir de um número de variáveis, informações úteis sobre os processos erosivos e conseqüentemente, sendo um potencial apoio para as tomadas de decisões na gestão de uma bacia.

Ao adaptar a metodologia do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas no estudo da sustentabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Epaminondas (BHAÉ), usando a qualidade do sedimento como novo elemento do indicador Hidrológico, não houve variação na classificação do WSI da referida bacia, que se manteve no índice intermediário, mas o uso deste parâmetro apresentou-se com um potencial mais representativo para mensuração da qualidade do ambiente das bacias, principalmente nas bacias que tem maior impacto antropogênico.

Saliente-se que o Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas – WSI, com a utilização de indicadores objetivos, permitiu uma análise conjunta das quatro dimensões que o compõem, mas com a possibilidade de identificar as questões críticas na gestão de uma bacia.

Quando se fala na gestão integrada de recursos hídricos, a palavra integrada, nos remete a interagir com fatores como solo, água e seus componentes bióticos e abióticos, mais também, com recursos financeiros e componentes sociais que se

interrelacionam de forma que uma visão holística do problema se apresenta como imperativo na solução dos conflitos advindos desta gestão.

A visão da gestão ambiental, não se apresenta como um elemento pontual no gerencialmente de bacias hidrográficas e sim como gestora de um processo que se for bem mensurado leva este processo de gestão para uma crescente de sucesso. Para tanto se faz necessários utilizar de instrumentos que tenham o potencial de medir e avaliar este processo.

A técnica do *Fingerprinting*, bem como Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas, se apresentaram, neste trabalho, como capazes de colaborar com a gestão ambiental de bacias hidrográficas, fazendo com que a visão de que o manejo e a conservação do solo e da água, são atributos indispensáveis na gestão ambiental de bacias hidrográficas.

Referências

ARAÚJO, M. D. de. **Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil**. Orientadora: Márcia Maria Rios Ribeiro. Coorientadora: Cybelle Frazão Costa Braga. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/19473>. Acesso em: 12 mar. 2020.

AUGUIE, B. **gridExtra: miscellaneous functions for “Grid” graphics**, R Package Version 221. (2016). Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>. Acesso em: 20 jan. 2020.

BERNARDI, E. C. S.; PANZIERA, A. G.; BURIOL, G. A.; SWAROWSKY, A. Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental. **Ciências Naturais e Tecnológicas**, v. 13, p. 159–168, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/1303>. Acesso em: 25 jan. 2020.

BIANCHI, S. R. **Avaliação de estratégias analíticas para reduzir interferências em ICP-MS e ICP OES**. Orientadora: Ana Rita de Araujo Nogueira. 2011. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas da Terra) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/6203?show=full>. Acesso em: 12 mar. 2020.

BORGES, R. D. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; LORO, M. V. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas e máximas mensais do ar prejudiciais e favoráveis aos cultivos agrícolas no Rio Grande do Sul. **Boletim de Geografia**, v. 40, p. 154–169, 2022. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/62979>. Acesso em: 01 jan. 2023.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C.; WUEPPER, D.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 36, p. 21994–22001, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7486701/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

BRANCHI, B. A. Sustentabilidade de bacias hidrográficas e índices compostos: aplicação e desafios. **Sociedade e Natureza**, p. 1–14, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/SPCt6MVnjCcZHNHTJRFg5xb/?format=pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022.

BRANCHI, B. A.; FERREIRA, D. H. L. A contribuição do modelo FPEIR nos estudos das bacias hidrográficas brasileiras. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/1980082716420202442>. Acesso em: 14 mai. 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília: Presidência da República, [2020]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 01 set. 2021.

CADONÁ, E. A. **Fontes de produção de sedimentos e índices ambientais de uso da terra como indicadores de vulnerabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica rural**. Orientador: Pablo Miguel. 2021. 125 f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

CHAVES, H. M. L. Avaliação integrada da sustentabilidade de quatro bacias hidrográficas latinoamericanas. *In*: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais eletrônicos** [...]. Campo Grande: ABRHidro, 2009. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10202>. Acesso em: 15 mar. 2020.

CHAVES H.;ALIPAZ S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. **Water Resources Management**, v. 21, n. 5, p. 883-895, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-006-9107-2>. Acesso em: 12 mai. 2021.

COLLINS, A. L., BLACKWELL, M., BOECKX, P. *et al.* Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 4160–4193, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4>. Acesso em: 12 dez. 2021.

CONEJO, J. G. L.; MARANHÃO, N.; BURNETT, J. A. B.; ANTUNES, B. Sobre um índice de disponibilidade hídrica aplicável à gestão dos recursos hídricos. *In*: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2009, Campo Grande. **Anais eletrônicos** [...] Campo Grande: ABRHidro, 2009. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10857>. Acesso em: 20 out. 2020.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos**. Orientador: Nestor Kampf, 1986. 196p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1986. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/agronomia/materiais/DeboraPinheiroDick1986.pdf>. Acesso em: 22 set. 2021.

FALKENMARK, M.; WIDSTRAND, C. Population and Water Resources: A delicate balance. **Population Bulletin**, v. 47, n. 3, p.1-36, 1992. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12344702/>. Acesso em: 25 ago. 2021.

FEY, M. U.; DIXON, J. B. Rapid estimation of iron oxides in soils and clays by spectrophotometric analysis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 47, p. 1261-1263, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700060038x>. Acesso em: 15 ago 2021.

KAROLYNA, A.; AMARAL, N.; TEODOMIRO, K.; FORMIGA, M. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte – GO. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 15, n. 2, p. 94–113, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/66498>. Acesso em: 25 nov. 2021.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite . **Disciplinarum Scientia / Naturais e Tecnológicas** , v. 2, n. 1, p. 171–182, 2001. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/1136/1077>. Acesso em: 18 set. 2020.

LEVIN, I. P. **Relating statistics and experimental desing**. Thousand Oaks: Sage. 1999. 90 p.

LIZAGA, I.; LATORRE, B.; GASPAR, L.; NAVAS, A. Consensus ranking as a method to identify non-conservative and dissenting tracers in fingerprinting studies. **Science of The Total Environment**. v. 720, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137537>. Acesso em: 26 set. 2021.

MAIA, A. F. da S.; LEITE, B. F. W. Financiamento ao desenvolvimento alinhado aos ODS da ONU: a reorientação estratégica do BDGM. **Revista Tempo do Mundo**, n. 29, p. 271–293, 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/revistas/index.php/rtm/article/view/381>. Acesso em: 25 ago. 2023.

MARANHÃO, N. **Sistema de indicadores para planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas** Orientador: Jose Paulo Soares de Azevedo. 2007. 397 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/39786535/sistema-de-indicadores-para-planejamento-e-gestao-dos-recursos->. Acesso em: 26 jul. 2020.

MARQUES, H. F. M.; REIS, B. C.; FEITOZA, V. S.; SILVA, J. G. da; MONTE-MOR, R. C. de A. Conflicts in the management of water resources in the State of Minas Gerais: Case sstudy of the Quatis stream, Itueta – Minas Gerais, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e27910111967, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/11967>. Acesso em: 26 ago. 2022.

MAYNARD, I. F. N.; CRUZ, M. A. S.; GOMES, L. J. Aplicação de um índice de sustentabilidade na bacia hidrográfica do rio Japaratuba em Sergipe. **Ambiente & Sociedade**, v. 20, n. 2, p. 207–226, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0057r1v2022017>. Acesso em: 05 mai. 2020.

McKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal Soil Science**, v. 46, p. 13-22, 1966. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss66-003>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from solils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays. Clay Miner**, v 7, p. 317-327, 1958. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1346/CCMN.1958.0070122>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 424–432, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/yZSxkVDGmy84V3pF498zrzj/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 mai. 2020.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; CLARKE, R. T. Método "fingerprinting" para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 633–638, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500017>. Acesso em: 14 ago. 2020.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R. dos. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1637–1646, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600039>. Acesso em: 12 mai. 2020.

MOLINA, M. C. G. Desenvolvimento sustentável: do conceito de desenvolvimento aos indicadores de sustentabilidade. **Revista Metropolitana de Governança Corporativa**, v. 4, n. 1, p. 75–93, 2019. Disponível em: <http://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/RMGC/article/view/1889/1432>. Acesso em: 15 ago. 2020.

OLIVEIRA, J. D. de; SOUZA, C. A. de; GALBIATI, C.; SOUSA, J. B. de. Componentes ambientais e hidrodinâmica na bacia hidrográfica do rio Branco, contribuinte do pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 1, p. 465–486, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p465-486>. Acesso em: 12 set. 2022.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Rumo a um desenvolvimento sustentável: indicadores ambientais**. Tradução de Ana Maria S. F. Teles. Salvador: CRA. 2002. 224 p. (Série Cadernos de Referência, 9).

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Environmental indicators: development, measurement and use**. Paris: OCDE; 2003.

OWENS, P. N. Sediment source fingerprinting: are we going in the right direction? **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 6, p. 1643–1647, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03231-x>. Acesso em: 26 jan. 2023.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 mar. 2021.

WEIHS, C.; LIGGES, U.; LUEBKE, K.; RAABE, N. **klaR analyzing german business cycles**. In BAIER, D; DECKER, R.; SCHMIDT-THIEME, L. (eds.) *Data Analysis and Decision Support*, 2014. p. 335-343.

SANTANA, D. P. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 62 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486784>. Acesso em: 14 set. 2020.

SANTOS, L. D. S. **Otimização dos procedimentos de extração e desempenho analítico da espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente na análise de amostras de solos**. Orientador: Clesio Gianello. 2018. 129 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/178329>. Acesso em: 28 set. 2021.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch photochemische extraktion mit saurer ammoniumoxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung-Düngund Bodenkunde**, v. 105, n. 5, p. 94-202, 1964. Disponível em: <https://garfield.library.upenn.edu/classics1984/A1984SR69400001.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2020.

SILVA, F. B. da; QUEIROZ, T. R.; BURKERT, D.; MANZIONE, R. L. Multiple uses of water by users granted in the hydrographic basins of the aguapeí and peixe rivers. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2172–2185, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2172-2185>. Acesso em: 16 out. 2021.

SILVA, F. L. da; FUSHITA, Â. T.; CUNHA-SANTINO, M. B da.; JÚNIOR, I. B.; JÚNIOR, J. C. T. V. Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1626–1653, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1626-1653>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SILVA, G. S. da; ALMEIDA, L. D. A. Indicadores de sustentabilidade para instituições de ensino superior: uma proposta baseada na revisão de literatura. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, p. 123–144, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/geas.v8i1.13767>. Acesso em: 23 set. 2020.

SOARES, R.; ESCALEIRA, V.; MONTEIRO, M. I. C.; PONTES, F. V. M.; SANTELLI, R. E.; BERNARDI, A. C. de C. Uso de ICP OES e titrimetria para a determinação de cálcio, magnésio e alumínio em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1553–1559, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500008>. Acesso em: 23 out. 2021.

SOUZA, A. P. de; PAULA, E. C. de. Aplicação do Índice de Sustentabilidade de Bacias Hidrográficas WSI na sub-bacia do Ribeirão Onça / MG . *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz de Iguaçu. **Anais eletrônicos** [...].Foz de Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=191>. Acesso em: 28 set. 2020.

SOUZA, M. C. da S. A. de; SOARES, J. S. A superação da distinção ontológica entre o homem e a natureza como desafio ético no enfrentamento da crise ecológica global. **Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo**, v. 7, n. 2, p. 22–42, 2021. Disponível em: <https://www.indexlaw.org/index.php/Socioambientalismo/article/view/8243/pdf>. Acesso em: 10 fev. 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. rev. ampl., Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

TENENHAUS, M.; AMATO, S.; VINZI, V. E. **A global goodness-of-fit index for PLS structural equation modelling**. *In*: SIS Scientific Meeting, 42. Padova: CLEUP, p. 739-742, 2004. Disponível em: <https://www.sis-statistica.org/old/htdocs/files/pdf/atti/RSBa2004p739-742.pdf>. Acesso em: 27 set. 2021.

VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. **Modern applied statistics with S**, 4 ed.. New York: Springer. E-boock. 2002. 495 p. Disponível em: <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>. Acesso em: 10 ago. 2020.

WICKHAM, H. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. New York: Springer-Verlag. 2016. Disponível em: <https://ggplot2.tidyverse.org>. Acesso em: 10 ago. 2020.

WU, L.; HE, Y.; MA, X. Can soil conservation practices reshape the relationship between sediment yield and slope gradient? **Ecological Engineering**, v. 142, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105630>. Acesso em: 30 dez. 2021.

Apêndices

Apêndice A - Identificação dos frascos das amostras com as suas respectivas fontes

potes	Fonte	potes	Fonte	potes	Fonte	potes	Fonte
1	1CA1	35	2CA2	70	2L17	105	3L9
2	1CA2	36	2CA3	71	2C1	106	3L10
3	1CA3	37	2CA4	72	2C2	107	3L11
4	1CA4	38	2CA5	73	2C3	108	3L12
5	1CA5	39	2CA6	74	2C4	109	3L13
6	1CA6	40	2CA7	75	2C5	110	3C1
7	1CA7	41	2CA8	76	2C6	111	3C2
8	1CA8	42	2CA9	77	2C7	112	3C3
9	1CA9	43	2CA10	78	2C8	113	3C4
10	1CA10	44	2CA11	79	2C9	114	3C5
11	1CA11	45	2CA12	80	2C10	115	3C6
12	1CA12	46	2CA13	81	2C11	116	3C7
13	1CA13	47	2CA14	82	2C12	117	T1.1
14	1L1	48	2CA15	83	2C13	118	T2.1
15	1L2	49	2CA16	84	2C14	119	T3.1
16	1L3	50	2CA17	85	2C15	120	T1.2
17	1L4	51	2CA18	86	2C16	121	T2.2
18	1L5	52	2CA19	87	3CA1	122	T3.2
19	1L6	53	2CA20	88	3CA2	123	T1.2
20	1L7	54	2L1	89	3CA3	124	T2.3
21	1L8	55	2L2	90	3CA4	125	T3.3
22	1L9	56	2L3	91	3CA5	126	T1.4
23	1L10	57	2L4	92	3CA6	127	T2.4
24	1C1	58	2L5	93	3CA7	128	T3.4
25	1C2	59	2L6	94	3CA8		
26	1C3	60	2L7	95	3CA9		
27	1C4	61	2L8	96	3CA10		
28	1C5	62	2L9	97	3L1		
29	1C6	63	2L10	98	3L2		
30	1C7	64	2L11	99	3L3		
31	1C8	65	2L12	100	3L4		
32	1C9	66	2L13	101	3L5		
33	1C10	67	2L14	102	3L6		
34	2CA1	68	2L15	103	3L7		
35	2CA2	69	2L16	104	3L8		

Apêndice B - Valores brutos das análises químicas de solo e sedimento

Valores em mg/Kg

potes	COT	Fe-DCB	Mn DCB	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	In	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	V	Zn
1	4582,80	11357,28	1370,82	22861,36	6,71	342,46	393,68	1,52	14,84	10,81	2,23	2174,15	9,71	38,03	0,29	13,60	1036,90	1788,62	2100,00	8,14	50,30	34,60	20,62
2	15287,40	4181,76	2279,20	14491,37	3,09	205,63	481,41	0,60	0,15	8,22	4,41	879,11	1,77	67,90	0,29	11,97	921,65	1594,49	2100,00	5,39	44,50	0,13	2,14
3	12654,00	8820,50	56,36	12493,13	3,04	53,14	481,93	0,56	4,14	7,78	3,98	907,92	0,22	0,77	95,81	9,60	446,65	137,87	1800,00	4,10	44,77	27,62	10,06
4	3351,60	9736,32	259,60	19129,35	3,01	70,59	354,39	0,56	4,19	5,82	3,12	1019,19	4,81	64,51	114,61	12,56	804,50	217,56	1800,00	5,06	34,52	19,13	13,25
5	11012,40	10833,59	611,95	18800,76	4,76	91,16	722,90	0,85	8,42	7,34	6,61	1507,70	5,19	0,77	0,29	13,79	902,36	476,98	2300,00	6,47	32,85	26,74	15,42
6	7489,80	5786,88	184,80	13498,98	2,40	38,61	674,50	0,47	4,38	4,37	2,82	803,08	0,22	81,89	112,82	8,67	1138,49	259,58	1700,00	4,02	91,44	16,97	12,47
7	12551,40	12114,43	368,28	28767,63	6,13	172,01	1186,34	1,18	10,13	11,86	6,03	2135,02	8,45	115,50	333,20	22,97	1373,65	493,38	2300,00	9,25	269,02	0,13	29,90
8	16860,60	6727,95	144,94	21474,10	3,60	98,68	988,29	0,67	6,04	7,83	3,88	1278,08	2,14	86,43	174,83	14,02	1124,19	254,75	1900,00	6,20	201,39	26,92	19,02
9	16723,80	6357,12	198,00	17650,78	2,76	50,60	1087,07	0,54	5,27	5,26	2,12	889,94	0,22	95,31	108,27	9,93	1249,82	271,17	1900,00	4,65	128,84	19,22	15,60
10	11901,60	4540,80	110,00	9993,64	2,35	52,14	716,57	0,28	4,29	4,25	2,26	741,80	0,22	102,77	78,80	8,59	1244,62	181,15	1700,00	3,88	108,98	16,58	13,46
11	7147,80	3867,25	152,99	9633,19	2,38	43,88	990,92	0,45	4,54	4,62	1,94	756,03	0,22	81,36	117,48	7,75	1036,75	247,91	1700,00	3,95	98,66	16,93	12,64
12	14124,60	4211,59	281,82	11706,61	2,66	70,94	1127,09	0,52	5,06	4,85	2,30	858,83	0,22	96,29	77,81	10,10	1265,70	342,40	1800,00	4,63	109,76	18,41	15,92
13	17578,80	8290,74	620,00	23419,11	4,19	94,76	1257,07	0,81	8,31	8,69	3,39	1541,04	0,77	134,09	129,30	16,34	1593,71	595,78	1900,00	7,12	141,33	30,88	20,93
14	16723,80	1156,76	156,86	6422,73	1,48	22,63	328,62	0,18	2,52	4,06	1,69	364,63	0,24	19,38	47,11	3,67	218,88	243,51	1200,00	2,23	173,74	12,08	7,03
15	25308,00	2376,62	13,64	19820,26	2,47	99,20	642,14	0,24	3,85	8,71	4,35	756,49	3,37	46,14	92,35	12,48	624,94	97,83	1900,00	5,04	152,01	26,50	14,49
16	22127,40	2902,42	518,32	14511,41	2,56	92,04	792,18	0,26	4,87	9,59	3,46	744,05	1,94	41,97	14,57	9,13	516,32	537,88	1900,00	4,53	227,77	25,25	13,36
17	22401,00	5994,12	150,04	26995,81	3,98	76,91	514,37	0,72	4,94	13,54	5,01	1309,67	5,51	61,07	135,99	14,22	718,00	287,87	1600,00	7,85	151,47	33,15	18,51
18	22914,00	3344,09	13,64	20450,17	3,21	49,58	786,94	0,56	4,12	9,97	2,99	1115,97	3,67	53,97	0,29	9,42	652,48	153,16	1600,00	5,69	186,35	27,52	13,93
19	15492,60	4657,92	20,46	33651,35	4,85	54,72	810,11	0,87	4,15	10,26	4,06	1634,78	8,08	69,22	139,61	14,89	876,86	188,47	2000,00	7,84	293,77	34,40	22,38
20	21375,00	2522,31	13,64	28990,46	4,31	56,38	1027,82	0,79	4,19	12,58	9,41	1486,28	7,93	75,25	175,46	14,45	948,96	114,00	2000,00	8,58	324,73	33,70	22,54
21	17852,40	10934,00	14,08	63944,42	7,24	61,53	843,20	1,33	5,65	16,98	5,64	3196,80	22,03	142,70	272,78	28,26	2215,54	113,91	2400,00	13,35	230,91	0,13	29,42
22	21894,84	5896,00	84,48	13079,88	3,12	24,25	241,99	0,56	4,33	16,02	2,01	964,20	3,11	35,87	89,19	5,62	446,78	155,81	1200,00	4,85	145,42	24,62	9,53
23	20374,08	5478,00	373,12	14181,39	3,71	64,11	1028,15	0,65	5,44	6,93	2,31	1367,99	1,36	86,13	150,85	12,42	1112,20	453,55	2000,00	5,40	136,45	26,87	15,83
24	21717,00	2650,03	13,64	14031,78	1,87	33,84	493,80	0,17	2,40	6,42	2,16	565,73	0,22	31,33	13,30	8,62	394,89	48,19	1700,00	3,98	73,70	17,82	9,22
25	19254,60	4816,33	225,06	16475,81	2,38	66,10	805,21	0,23	3,49	7,13	2,20	745,47	0,22	47,56	106,87	9,07	614,58	230,72	1700,00	4,24	142,42	20,78	12,23
26	18228,60	4311,56	129,58	14363,43	2,72	51,11	361,45	0,45	5,10	8,61	3,10	907,02	7,58	44,51	75,51	8,70	508,63	224,93	1700,00	5,66	130,89	23,53	12,77
27	24966,00	2082,17	13,64	21752,92	2,63	120,66	821,31	0,20	4,46	9,36	3,62	896,16	0,22	56,73	191,33	10,67	765,61	81,34	2200,00	4,77	138,92	26,79	14,51
28	23940,00	3617,50	40,92	22637,51	3,17	85,90	987,92	0,56	3,95	8,10	8,90	1047,42	4,22	55,29	6,97	9,62	715,16	158,20	1800,00	5,74	200,80	23,19	21,74
29	19254,60	6477,86	347,82	29082,71	6,51	174,00	3139,70	1,19	13,08	12,87	5,12	2400,92	3,22	205,67	183,97	24,49	3064,16	755,77	2500,00	11,25	321,79	43,36	36,34
30	13987,80	8665,18	313,72	19310,82	5,04	108,78	1313,50	0,91	9,08	8,53	3,01	1636,42	6,89	139,57	116,79	15,45	1937,83	470,15	2000,00	7,94	224,19	29,35	26,00
31	24384,60	6667,14	381,92	20153,73	4,54	123,49	1390,97	0,81	9,29	8,98	3,07	1708,86	4,64	151,00	148,22	15,69	1752,29	690,71	2100,00	7,57	193,27	29,94	24,00
32	15971,40	5005,62	497,86	11237,14	3,19	108,41	1178,13	0,58	11,24	11,68	6,17	1014,09	1,35	2,52	78,69	10,53	1438,83	625,75	1700,00	5,73	135,39	20,69	20,49
33	19494,00	1682,56	13,64	10982,40	2,04	44,72	496,38	0,16	2,89	6,18	2,20	600,64	0,22	31,28	8,04	6,37	386,85	62,23	1500,00	3,71	104,96	16,98	9,88
34	5061,60	4317,54	144,94	12990,38	3,29	58,95	1379,31	0,62	6,40	7,89	3,28	1308,84	0,22	152,76	172,93	11,73	2066,49	377,85	2200,00	6,16	218,00	21,19	22,23

potes	COT	Fe-DCB	Mn DCB	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	In	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	V	Zn
35	17202,60	6526,08	352,00	15614,38	4,26	75,18	1692,36	0,80	7,71	8,99	4,63	1780,10	2,24	157,00	183,05	14,26	2247,63	547,15	2100,00	7,32	233,87	27,71	25,46
36	17955,00	8448,00	400,40	17570,98	4,72	82,56	1965,91	0,88	8,09	8,88	3,16	1996,57	3,51	171,58	185,74	16,26	2232,19	579,19	2100,00	7,65	268,71	30,46	25,41
37	13509,00	7877,76	228,80	16023,14	3,70	68,58	1177,68	0,66	7,39	7,13	3,59	1457,32	0,22	129,64	145,80	11,06	1648,67	372,48	1900,00	6,65	153,88	23,27	19,42
38	17784,00	4370,52	136,88	10784,79	3,35	64,71	1044,43	0,60	6,34	7,43	2,56	1138,22	0,95	167,65	170,83	12,47	2245,07	329,67	1900,00	6,25	159,43	21,33	21,92
39	20520,00	6082,56	237,60	10860,82	3,22	67,46	1388,62	0,62	6,83	8,27	2,60	1175,60	0,22	156,32	139,55	9,65	2084,64	355,86	1400,00	6,34	224,37	22,93	18,78
40	18981,00	5321,10	34,10	21743,37	3,28	64,13	2139,19	0,76	7,25	8,78	5,31	1995,39	0,60	0,77	295,93	14,98	2380,65	364,45	2100,00	7,56	229,98	33,86	26,61
41	14535,00	7898,88	2142,80	17422,40	2,03	111,51	651,04	0,40	9,56	6,41	3,23	938,42	8,56	65,74	84,15	7,15	609,75	1424,02	2000,00	4,77	168,38	17,03	16,42
42	7866,00	2145,26	456,94	7833,04	0,80	53,19	351,52	0,19	3,44	2,38	1,94	378,76	2,87	25,38	338,46	2,35	192,01	568,09	1300,00	1,83	74,97	6,84	6,63
43	15903,00	3843,84	1095,60	9482,31	1,03	54,57	401,85	0,19	4,07	2,84	1,51	2480,00	3,78	28,84	34,55	3,16	263,88	594,27	1300,00	2,27	90,91	8,00	7,84
44	6703,20	1955,98	54,56	8307,58	0,59	27,72	308,02	0,19	2,35	1,92	2,03	338,96	2,36	7,42	42,79	2,88	329,72	175,72	1300,00	1,66	49,94	6,47	6,01
45	3556,80	3323,06	13,64	18052,25	1,46	33,40	473,94	0,17	2,91	6,38	2,20	694,69	5,94	77,93	108,74	7,26	769,47	56,66	1700,00	3,82	52,46	20,50	11,27
46	4822,20	2198,50	16,10	19788,72	1,68	53,79	596,26	0,22	3,37	10,29	3,93	683,67	4,58	79,39	89,32	11,77	749,27	50,73	1700,00	4,88	55,79	32,62	16,16
47	20793,60	11890,56	382,80	21414,20	3,41	111,55	756,30	0,68	8,97	10,30	4,71	1274,52	9,12	7,54	109,58	12,53	1270,49	290,89	1700,00	7,33	169,94	33,27	20,86
48	7045,20	14678,40	1082,40	28761,06	7,04	256,67	1722,09	1,41	21,42	12,48	3,03	2935,84	21,27	58,75	108,87	22,15	1426,60	1498,20	2900,00	0,80	57,02	37,70	36,65
49	15732,00	12808,49	4787,64	25999,19	4,83	230,35	1729,44	0,97	19,58	14,33	5,04	1976,83	10,68	141,21	135,46	19,56	1240,18	3732,45	2300,00	0,80	231,45	39,10	30,00
50	29780,00	1431,42	197,78	82945,81	4,98	404,73	3183,75	1,12	9,24	26,58	5,74	2517,85	34,18	2,41	485,71	69,94	3571,17	332,80	5000,00	20,95	96,53	63,26	68,10
51	17340,00	7108,82	225,06	17549,95	3,09	92,54	1047,94	0,62	7,18	8,07	3,04	1186,28	6,33	14,48	180,53	14,84	1616,11	398,96	2200,00	6,39	175,14	25,48	22,04
52	15250,00	12587,52	440,00	22886,42	4,60	107,93	1023,07	0,70	10,50	10,89	4,74	1758,66	6,77	10,76	156,94	15,72	1145,86	412,83	2300,00	8,80	217,00	33,49	22,58
53	15450,00	6414,76	252,34	14606,37	3,00	73,91	938,10	0,47	5,44	7,40	2,27	1048,60	3,75	6,78	112,77	10,42	1074,05	255,93	2100,00	5,74	225,62	22,26	16,32
54	13782,60	12240,62	40,92	42929,91	6,58	56,70	656,60	1,06	4,96	23,05	4,53	2207,42	8,24	126,42	261,04	19,46	1222,09	106,97	2100,00	0,80	192,43	53,19	24,38
55	17054,40	15544,32	22,00	29389,92	4,61	43,33	663,08	0,76	4,17	11,22	3,84	1563,11	6,14	98,10	120,74	16,56	965,28	128,66	2000,00	9,31	159,93	35,73	24,59
56	18536,40	9990,20	13,64	28730,15	4,12	49,67	860,14	0,66	4,60	11,51	4,36	1416,42	8,76	98,23	188,94	17,10	986,34	106,28	1900,00	8,86	160,49	34,74	18,84
57	9131,40	4458,78	13,64	10287,35	2,02	32,65	897,66	0,19	2,42	6,34	0,72	575,90	1,43	2,38	91,93	6,27	452,95	120,90	1500,00	4,05	403,27	18,69	14,28
58	16929,00	5300,06	225,06	38614,29	2,85	55,19	602,73	0,45	4,29	7,72	2,49	2615,47	0,22	69,18	116,60	9,35	649,11	294,00	1800,00	5,39	104,24	24,72	13,25
59	20109,60	5236,97	34,10	18018,99	2,64	80,98	349,85	0,40	4,36	8,76	3,20	908,46	0,22	1,50	69,12	9,98	609,34	160,43	1600,00	5,60	147,15	25,85	14,55
60	22230,00	10750,08	83,60	17158,78	3,46	39,53	595,17	0,56	3,74	13,95	2,44	1133,72	0,22	62,85	120,34	9,70	583,27	127,24	1700,00	6,27	249,15	29,35	12,32
61	23940,00	8812,41	13,64	28635,22	4,30	54,17	1002,46	0,72	3,95	10,38	5,32	1481,07	4,74	94,49	159,11	14,50	954,97	123,31	2200,00	8,41	225,83	33,06	17,64
62	22640,40	10391,04	149,60	18680,63	2,98	49,54	614,89	0,48	5,25	8,78	4,37	1028,54	0,22	71,66	146,88	12,22	734,73	159,87	1900,00	6,45	142,48	26,08	14,23
63	22572,00	7760,81	13,64	15860,68	3,20	28,21	335,24	0,51	3,02	24,19	3,47	2480,00	0,22	46,51	120,73	8,66	494,23	84,41	1800,00	5,75	84,40	26,54	10,32
64	23256,00	4477,44	382,80	7243,28	1,69	28,03	192,03	0,19	2,88	5,05	1,72	2480,00	0,22	4,83	0,29	4,34	244,21	153,68	1300,00	3,00	108,66	14,53	6,24
65	24624,00	1745,66	13,64	11465,77	1,57	27,70	446,02	0,19	1,86	4,37	2,08	2480,00	0,22	43,70	70,32	5,91	431,19	58,25	1700,00	3,33	113,79	13,37	9,27
66	4685,40	7129,85	109,12	49465,90	2,80	39,05	764,12	0,41	4,57	7,69	3,41	1078,71	0,54	2,59	128,92	9,92	698,89	212,87	1800,00	5,75	126,51	23,14	12,34
67	6190,20	10412,16	44,00	24160,68	3,66	50,27	627,98	0,59	3,60	8,05	5,40	1325,50	4,70	0,77	138,51	13,49	981,64	78,68	2100,00	6,88	66,40	26,67	16,69
68	6258,60	3112,74	13,64	8935,54	1,68	28,42	350,02	0,19	3,20	4,52	1,64	2480,00	0,22	0,99	72,10	5,30	376,21	87,71	800,00	3,24	90,58	15,21	8,15
69	6156,00	559,98	13,64	7862,11	1,31	19,24	144,99	0,19	1,56	3,92	1,32	2480,00	0,22	0,77	0,29	4,63	286,37	35,16	800,00	2,64	28,75	13,81	6,05
70	27160,00	1261,92	40,92	25497,00	1,44	42,02	402,86	0,19	1,32	3,08	1,91	2480,00	0,22	25,66	30,32	2,89	212,04	100,40	800,00	2,91	32,89	15,51	3,71
71	15663,60	5544,00	112,64	12609,83	3,20	49,64	743,52	0,51	2,92	6,60	2,76	887,33	0,50	1,38	105,28	7,93	602,22	151,97	800,00	5,22	211,15	26,77	15,93
72	15834,60	1188,00	14,08	6267,97	1,19	21,15	191,43	0,19	1,32	2,79	4,92	2480,00	0,22	20,79	0,29	3,59	203,59	33,20	1300,00	2,21	38,36	11,98	7,00
73	8481,60	9460,00	168,96	28427,35	3,30	48,06	449,80	0,51	5,29	9,92	4,00	1106,71	0,22	2,10	159,62	11,80	772,46	256,88	800,00	7,09	140,25	28,13	16,70

potes	COT	Fe-DCB	Mn DCB	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	In	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	V	Zn
74	16210,80	3850,00	49,28	11350,18	2,15	35,04	651,07	0,31	3,19	6,52	2,51	566,10	0,22	1,76	102,59	7,45	511,27	124,50	1000,00	4,20	112,14	18,82	10,90
75	13030,20	10582,00	211,20	20182,55	3,44	47,71	436,34	0,53	5,92	10,18	4,05	1182,74	0,22	2,75	161,10	12,26	767,02	220,76	1000,00	7,37	169,14	29,09	16,50
76	14261,40	20988,00	0,00	52186,83	6,82	61,93	258,05	1,34	6,42	18,47	5,87	3007,33	33,52	147,23	369,52	32,65	1365,85	66,93	1300,00	15,70	113,14	0,13	30,12
77	20691,00	14124,00	147,84	31357,60	5,38	82,61	830,03	1,03	7,37	13,28	3,83	2339,07	6,27	130,24	134,41	15,66	1180,12	279,77	1200,00	0,80	115,08	49,48	22,54
78	23358,60	3366,00	0,00	10684,46	1,77	26,60	544,71	0,22	2,03	5,44	1,92	574,39	4,38	48,12	86,60	5,72	442,71	55,03	900,00	3,71	85,70	18,66	10,14
79	21888,00	1562,00	211,20	4202,88	1,01	20,56	1053,17	0,19	1,93	3,58	1,99	298,75	1,00	58,10	31,28	2,59	570,24	176,05	800,00	1,94	105,52	10,00	5,56
80	24624,00	4928,00	239,36	6755,59	1,64	24,41	399,96	0,20	4,14	7,83	1,88	520,66	2,48	9,53	67,01	4,33	360,97	262,12	800,00	3,24	160,71	16,90	8,52
81	22640,40	3124,00	267,52	10991,14	1,79	39,25	434,30	0,19	2,57	6,62	2,40	525,59	3,63	9,00	59,59	5,77	415,58	229,73	800,00	3,78	102,19	19,73	9,47
82	6703,20	440,00	28,16	3606,92	0,73	19,13	215,16	0,19	1,05	2,96	1,18	224,82	7,33	3,96	17,81	2,24	75,13	120,71	800,00	1,48	23,18	8,58	2,80
83	6498,00	242,00	14,08	3393,14	0,76	14,41	162,39	0,19	1,16	2,87	0,92	229,15	7,56	1,57	22,00	1,90	115,19	53,32	800,00	1,55	24,54	8,00	3,41
84	4104,00	1166,00	14,08	2453,86	0,88	20,04	218,27	0,19	1,43	2,44	1,16	286,49	7,57	1,74	17,85	1,81	115,35	66,27	800,00	1,80	27,08	7,52	9,63
85	31570,00	15026,00	711,04	52556,37	5,43	193,28	2193,26	1,17	11,91	16,03	8,32	2849,10	6,58	16,86	315,86	41,73	4337,70	742,33	1700,00	0,80	380,72	57,79	51,46
86	27170,00	18656,06	1892,00	37384,35	5,09	197,80	4634,80	1,10	12,17	12,80	8,06	2719,45	0,22	46,51	363,01	35,79	5148,68	1295,75	1500,00	0,80	410,08	47,38	50,59
87	5266,80	5747,90	1151,44	12726,85	2,38	76,16	717,80	0,48	6,27	6,06	4,21	889,56	0,22	40,60	79,07	6,64	728,38	860,35	1200,00	5,03	219,90	16,76	13,82
88	10089,00	3390,46	322,08	11267,13	1,82	44,77	446,49	0,29	3,92	4,89	1,72	654,90	0,22	12,13	67,23	5,22	534,22	334,19	1000,00	3,96	146,92	14,44	16,85
89	5061,60	1880,65	185,20	6008,37	0,98	32,04	161,19	0,19	2,81	2,85	0,73	2480,00	9,09	26,09	0,29	2,75	231,04	211,75	700,00	2,30	73,00	8,54	6,24
90	4446,00	2728,26	273,77	6773,07	2,18	42,37	320,44	0,44	3,09	5,47	1,71	925,92	0,22	38,23	0,29	3,34	385,46	260,75	700,00	4,75	103,59	9,80	77,27
91	4206,60	4185,10	764,94	9165,58	1,67	55,58	459,98	0,25	4,36	4,52	1,37	592,36	0,22	22,22	57,50	4,97	546,31	477,00	1100,00	3,81	120,59	13,65	10,94
92	4446,00	3787,78	523,38	9889,64	1,55	55,74	697,16	0,26	4,33	4,64	1,66	625,99	0,22	16,76	64,46	4,89	722,88	388,77	1000,00	4,00	132,51	14,29	13,83
93	20240,00	3575,88	523,38	11810,54	1,83	54,58	500,77	0,26	4,13	5,15	1,95	654,65	0,22	16,99	0,29	6,09	661,55	408,06	1100,00	4,11	116,75	14,99	12,60
94	13660,00	5005,62	143,22	14469,53	4,19	937,29	826,59	0,75	7,19	5,13	2,64	1037,49	1,76	4,22	76,86	7,52	967,57	213,62	1400,00	6,60	89,93	18,67	12,72
95	19030,00	4079,15	426,76	14252,82	2,14	74,35	711,74	0,41	4,79	5,67	2,55	830,87	0,22	13,83	85,74	7,06	798,92	384,85	1700,00	4,72	113,75	17,25	12,70
96	20440,00	4502,96	837,41	10665,46	1,67	54,41	421,04	0,23	4,05	4,50	1,41	663,27	0,22	24,67	56,31	4,92	507,13	597,71	1300,00	3,59	125,06	13,24	9,63
97	19562,40	4290,53	13,64	12370,43	1,69	64,01	765,74	0,33	9,62	14,48	7,36	744,81	2,12	99,01	62,27	9,61	1084,58	149,28	1000,00	4,65	46,35	20,43	15,22
98	14364,00	9127,89	34,10	21653,45	2,85	48,71	1069,36	0,64	4,03	11,51	0,72	1151,17	4,11	74,05	156,53	10,61	862,68	158,50	1000,00	7,88	609,95	28,94	27,02
99	20964,60	1451,21	129,58	6688,62	0,15	38,48	625,15	0,19	0,34	0,39	0,72	330,07	0,95	27,56	0,29	0,37	269,81	174,73	800,00	0,80	4,73	0,90	2,14
100	6669,00	1072,63	13,64	8664,13	0,96	27,72	776,28	0,16	1,22	5,64	3,67	2480,00	9,71	2,84	57,96	4,10	368,85	106,00	800,00	2,48	633,63	10,01	12,33
101	12790,80	483,74	13,64	7870,39	0,91	31,57	505,46	0,19	1,63	4,88	1,86	2480,00	0,80	2,34	53,83	3,87	404,02	84,33	800,00	2,38	163,57	11,06	7,37
102	6429,60	1642,26	241,56	5079,07	0,85	14,60	574,56	0,19	1,54	3,47	2,90	288,87	7,95	8,65	35,67	2,59	368,32	191,36	700,00	2,06	263,58	8,00	7,79
103	4035,60	841,28	27,28	5079,07	0,85	14,60	574,56	0,19	1,54	3,47	2,90	288,87	7,95	8,65	35,67	2,59	368,32	191,36	700,00	2,06	263,58	8,00	7,79
104	6327,00	1261,92	27,28	8456,74	1,26	23,66	771,21	0,16	1,57	5,45	2,46	2480,00	0,45	4,73	62,89	4,82	542,76	136,60	900,00	3,05	226,11	12,19	10,65
105	14022,00	1703,59	13,64	11591,56	1,41	29,65	678,04	0,20	1,85	5,84	2,22	487,78	1,83	0,68	69,77	6,56	598,78	83,82	900,00	3,38	160,76	15,63	9,43
106	3933,00	1451,21	13,64	10453,41	1,49	29,57	1264,66	0,20	1,81	5,71	2,04	2480,00	2,50	73,02	73,50	6,00	944,47	54,36	1200,00	3,35	124,89	15,83	9,32
107	22030,00	1451,21	54,56	9141,88	1,21	35,60	355,72	0,19	2,10	4,10	3,00	2480,00	2,04	4,46	46,66	5,48	353,60	127,58	800,00	2,54	151,22	11,19	10,05
108	18890,00	630,96	13,64	5849,73	0,93	26,65	464,61	0,19	1,64	3,29	1,43	297,06	1,12	2,58	26,17	3,57	195,12	72,33	800,00	1,87	117,47	8,99	5,99
109	20480,00	904,38	81,84	9828,15	1,46	49,24	492,39	0,19	2,46	5,76	7,04	2480,00	2,67	6,57	60,10	5,89	343,17	167,49	800,00	2,97	204,52	13,35	13,74
110	17784,00	4769,86	26,40	10719,77	2,13	18,57	432,88	0,17	2,38	7,27	8,02	582,80	2,22	0,77	84,61	4,81	357,45	97,99	800,00	4,03	278,03	17,51	13,47
111	9234,00	366,91	96,80	7888,25	1,25	25,32	757,43	0,19	1,73	4,96	2,65	367,16	0,22	6,28	58,15	4,49	429,74	157,06	800,00	2,66	256,05	10,83	12,42
112	5506,20	620,93	215,60	4341,71	0,94	13,67	527,96	0,19	4,31	6,69	2,66	2480,00	0,22	9,00	37,76	2,57	289,06	192,50	800,00	2,10	232,28	8,63	8,13

potes	COT	Fe-DCB	Mn DCB	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	In	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	P	V	Zn
113	3180,60	1919,23	88,00	14824,42	1,89	39,49	953,09	0,16	2,58	6,66	2,85	637,30	1,22	0,59	80,12	8,19	687,02	112,46	1000,00	4,13	164,80	17,76	18,90
114	7113,60	931,39	44,00	13796,57	1,35	25,40	273,86	0,19	2,04	4,58	3,11	2480,00	0,22	1,79	43,63	4,58	252,59	91,21	900,00	2,25	40,35	13,85	7,46
115	9576,00	2568,38	17,60	15393,86	2,15	65,00	810,88	0,33	3,68	7,25	2,68	653,55	1,23	0,77	107,89	11,50	1033,07	86,50	900,00	4,86	87,38	21,72	13,87
116	18600,00	197,57	8,80	7087,99	1,10	23,65	241,87	0,19	1,92	3,60	1,87	2480,00	0,26	4,02	37,82	4,26	230,17	111,98	900,00	2,11	160,70	10,17	7,85
117	6857,40	4753,23	238,70	12171,23	2,83	59,96	1234,59	0,56	5,04	5,18	3,43	897,57	0,22	0,77	120,76	9,56	1377,56	321,36	2200,00	4,79	140,81	18,86	18,90
118	3428,70	1619,46	252,34	2999,58	1,02	23,93	362,95	0,20	2,31	1,79	0,72	2480,00	5,69	5,91	16,27	2,39	129,06	249,50	1100,00	1,46	46,80	5,04	4,73
119	9631,53	1829,80	201,30	10339,74	2,02	48,81	715,32	0,31	3,31	3,71	1,26	594,15	0,22	0,77	63,16	4,68	612,01	236,72	1600,00	3,27	129,39	11,54	12,67
120	22650,00	2671,06	34,10	11222,75	2,38	53,95	2180,70	0,46	4,22	4,53	2,21	792,16	0,69	0,77	128,03	9,14	1323,93	211,74	3800,00	4,33	127,13	17,43	23,58
121	15540,00	9064,79	920,70	7840,34	1,71	73,91	555,58	0,29	4,38	3,19	2,10	517,12	8,92	16,88	43,34	3,72	391,56	599,14	3800,00	3,01	97,17	9,27	12,15
122	14220,00	1703,59	381,92	23500,28	4,34	146,00	1067,07	0,72	9,05	8,69	3,61	1499,66	0,22	0,77	135,03	13,83	1458,61	716,14	1600,00	7,81	368,16	26,01	30,45
123	22650,00	2671,06	34,10	11222,75	2,38	53,95	2180,70	0,46	4,22	4,53	2,21	792,16	0,69	0,77	128,03	9,14	1323,93	211,74	3800,00	4,33	127,13	17,43	23,58
124	32800,00	11693,79	2359,72	24567,51	5,50	178,06	3556,13	0,90	11,87	9,43	5,40	1858,08	0,22	47,31	143,05	13,60	1693,57	1800,31	17500,00	9,11	443,84	24,43	67,77
125	27950,00	6020,21	2216,50	17083,33	3,13	105,35	970,63	0,55	5,89	6,30	2,82	1072,11	0,22	0,77	95,88	9,43	1068,27	541,10	1800,00	5,61	300,54	19,08	21,92
126	19470,00	6820,00	457,60	14306,87	2,73	72,92	5984,67	0,73	4,09	5,66	0,72	921,65	0,22	0,77	160,01	8,13	1744,50	467,10	31900,00	6,52	448,81	13,42	137,29
127	20500,00	1535,34	102,30	6723,76	1,88	78,57	959,92	0,30	4,41	2,86	8,43	513,09	7,57	42,23	51,27	2,96	483,34	1054,25	7600,00	2,96	171,16	6,90	20,93
128	19220,00	11783,52	1925,00	16635,87	3,11	86,25	1066,03	0,56	4,90	5,59	3,09	1029,48	0,22	12,74	116,88	8,05	1138,39	792,39	7300,00	5,36	312,59	16,74	22,23

Apêndice C - Variação dos valores dos elementos no período de estudos do torpedo 2

Valores em mg/Kg

	T2-1 2019(130)	T2-4 2022(139)	variação	Escore
As	1,02	1,88	84%	0
Cd	0,2	0,3	50%	0
Cu	0,72	8,43	1070%	0
Cr	1,79	2,86	59%	0
Ni.	1,46	2,96	102%	0
Zn	4,7	20,9	344%	0

Apêndice D - Valores de IBPL. IETRAC. IITA, população, volume de água produzida, DA e DBO no período de estudo com suas variações

IBPL2019	56,94 m³/dia/Km
IBPL2022	53,39 m³/dia/Km
variação	-6.23463
IETRAC 2019	16,68
IETRAC 2022	15,12
variação	-9.35252
IITA 2019	5,12%
IITA 2022	8,39%
variação	63.8%
População 2019	341.389 hab.
População 2022	325.689 hab.
Vol. de água produzido 2019	38.600.000 m³
Vol. de água produzido 2022	39.481.900m³
DBO Média 2019	7,17
DBO Média 2022	6,8
Variação	-5.16%

IBPL – Índice bruto de perdas lineares

IETEAC - Índice de esgoto tratado referido à água consumida

IITA - Indicador de investimento total por arrecadação (%)

Apêndice E - Variações dos usos do solo no período de estudo

Usos (Km²)	2019	2022	Diferença
Mata nativa	7,308	5,516	-1,792
Mata plantada	2,582	2,628	-0,046
Agropecuária	21,329	20,553	-0,776
Urbano	1,336	1,336	Sem alteração
água	0,492	3,016	2,524
total	33,049	33,049	
EPI	$EPI = (\%Va + \%Vu) / 2$	%Va= -3,6	EPI= -1,8
		%Vu= 0	
AV	% da vegetação nativa (2022)	AV= 16,7	
Evolução nas áreas de mata nativa (2019-2022)		-24,5	

Apêndice F - Valores do IDH de Pelotas-RS no período de estudo

	2019	2021	variação
IDHM-EDUCAÇÃO	0,721	0,721	0
IDHM-RENDAS	0,636	0,636	0
IDHM	0,769	0,769	0

Apêndice G - Cálculos para aplicação do Índice de Falkenmark

P= precipitação em 2022 em mm	1456,8
ET = evapotranspiração em 2022 em mm	1150,4
P - ET em mm	306,4
P - ET em metros	0,3064
Área da BHAE em metros ²	33.000.000
V = DH * Área da BHAE em m ³ de água	10.111.200
Pop = Número aproximado de habitantes na BHAE	486
DH da BHAE no ano de 2022 em m ³ /(hab·ano)	20.805

Apêndice H - Valores dos elementos nos sedimentos, com a média e os escores

Valores em mg/Kg

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
coleta 1	1,02	0,20	1,79	0,72	1,46	4,73
coleta 2	1,71	0,29	3,19	2,10	3,01	12,15
coleta 3	5,50	0,90	9,43	5,40	9,11	67,77
coleta 4	1,88	0,30	2,86	8,43	2,96	20,93
média	2,53	0,42	4,32	4,16	4,13	26,40
variação	-0,65	-0,12	-1,46	4,27	-1,17	-5,46
ESCORE	0,5	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5
média dos escores			0,46			

Apêndice I - Tabulação das respostas das entrevistas feitas para o estudo

Ambiente propício		Instituições e participação		Instrumentos de gestão		Financiamento	
1.1 a	23,3	2.1^a	26,6	3.1 a	36,6	4.1 a	6,6
1.1 b	33,3	2.1 b	40	3.1 b	13,3	4.1 b	0
1.1 c	13,3	2.1 c	66,6	3.1 c	20	4.2^a	0
1.2 a	0	2.1 d	53,3	3.1 d	20	4.2b	0
1.2 b	0	2.1 e	26,6	3.1 e	13,3	4.3^a	0
1.2 c	0	2.2 a	6,6	3.2 a	20	4.3 b	0
1.3 a	0	2.2 b	20	3.2 b	13,3	4.3 c	0
1.3 b	6,6	2.2 c	33,3	3.2 c	6,6	Média	0,9
1.3 c	6,6	2.2 d	33,3	3.2 d	13,3		
Média	9,2	2.2 e	20	3.2 e	6,6		
		2.3 a	16,6	3.3 a	6,6		
		2.3 b	13,3	3.3 b	6,6		
		2.3 c	6,6	3.3 c	13,3		
		2.3 d	0	Média	14,5		
		Média	25,9				
Soma das médias		50,5	Escore	0,50			