

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* OURO PRETO
LICENCIATURA EM GEOGRAFIA

Bruna Santos Ribeiro

**QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS URBANOS DE OURO PRETO, MG: Uma Análise
Integrada de Parâmetros Físico-Químicos, Microbiológicos e Morfométricos**

Ouro Preto

2025

BRUNA SANTOS RIBEIRO

**QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS URBANOS DE OURO PRETO, MG: Uma Análise
Integrada de Parâmetros Físico-Químicos, Microbiológicos e Morfométricos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Licenciatura em Geografia do
Instituto Federal de Minas Gerais - Campus
Ouro Preto para obtenção do grau de licenciada
em Geografia.

Orientador: Dr. Alex de Carvalho

Ouro Preto

2025

R484q

Ribeiro, Bruna Santos.

Qualidade da água em rios urbanos de Ouro Preto, MG [manuscrito] :
uma análise integrada de parâmetros físico - químicos, microbiológicos e
morfométricos / Bruna Santos Ribeiro. – 2026.

55 f. : il.

Orientador: Alex de Carvalho.

Coorientadores: Elizene Veloso Ribeiro, Fabrício Antônio Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (licenciatura) – Instituto Federal de
Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto, 2026.

1. Rios urbanos. 2. Morfometria. 3. Água - Qualidade. I. Carvalho,
Alex de. II. Ribeiro, Elizene Veloso. III. Lopes, Fabrício Antônio. IV.
Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto. V. Título.

CDU: 911.2

Catálogo: Kelly Cristiane Santos Morais - CRB-6/3217



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Ouro Preto
Diretoria de Ensino
Docência de Área de Geografia
Rua Pandiá Calogeras, 898 - Bairro Bauxita - CEP 35400-000 - Ouro Preto - MG
- www.ifmg.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNA SANTOS RIBEIRO

QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS URBANOS DE OURO PRETO, MG: UMA ANÁLISE INTEGRADA DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS E MORFOMÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de LICENCIATURA EM GEOGRAFIA, ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do título de LICENCIADA EM GEOGRAFIA.

Aprovada em 04 de setembro de 2025, pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alex de Carvalho - IFMG *Campus* Ouro Preto - Orientador

Prof. Dra. Elizene Veloso Ribeiro - IFMG *Campus* Ouro Preto

Prof. Dr. Fabrício Antônio Lopes - Doutor em Evolução Crustal e Recursos Minerais

Ouro Preto, 08 de setembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Alex de Carvalho, Professor**, em 08/09/2025, às 14:02, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Elizene Veloso Ribeiro, Professora**, em 08/09/2025, às 14:05, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Fabrício Antonio Lopes, Usuário Externo**, em 08/09/2025, às 14:08, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2444251** e o código CRC **DC8BB67A**.

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente à minha mãe, minhas irmãs, minhas tias e avós, expresso minha eterna gratidão pelo apoio incondicional em todas as minhas conquistas e sonhos. Ao meu orientador Alex e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, deixo meus sinceros agradecimentos. Ao CAEFGEO, agradeço pela valiosa amizade e oportunidade de aprender sobre meus direitos, além de lutar por uma educação pública de qualidade. Finalmente, ao IFMG campus Ouro Preto, que se tornou meu segundo lar ao longo desses anos de graduação, sou profundamente grata por me acolherem e oferecerem o suporte necessário nos momentos mais desafiadores. Agradeço a todos os professores, funcionários e colegas que tornaram essa jornada inesquecível.

“O homem nunca pode parar de sonhar.
O sonho é o alimento da alma, como a
comida é o alimento do corpo.”

Paulo Coelho

RESUMO

Este estudo investigou a inter-relação entre as características físicas e a condição ambiental dos cursos d'água urbanos na bacia do Rio do Carmo, em Ouro Preto/MG. A pesquisa quantificou a dinâmica de escoamento de 189 canais através da análise de parâmetros morfométricos lineares (relação de bifurcação, comprimento do canal, extensão do percurso superficial, gradiente de canais), areais (área da bacia, comprimento da bacia, forma da bacia, densidade de rios e de drenagem, coeficiente de manutenção) e de relevo (relação de relevo, índice de rugosidade, índice de sinuosidade), fundamentais para caracterizar o comportamento hidrológico regional (CHRISTOFOLETTI, 1980; CHEREM, 2008). Complementarmente, foram elaborados perfis longitudinais integrados à análise de litologia, correlacionando as rupturas de declive (knickpoints) com a resistência das formações geológicas locais. Para avaliar a qualidade da água, utilizou-se o Índice de Qualidade da Água (IQA) a partir de uma campanha de amostragem em quatro pontos selecionados pela hierarquia de Strahler e o gradiente de ocupação urbana. As coletas ocorreram após um evento de precipitação para capturar o impacto do escoamento superficial sobre os parâmetros de turbidez, pH, condutividade, temperatura e coliformes. Os resultados demonstram que a rede de drenagem é fortemente condicionada pela litologia resistente e pelas altas declividades, resultando em resposta hidrológica rápida e alto potencial de transporte de sedimentos. A análise de campo revelou que a precipitação atuou de forma ambígua: enquanto promoveu a diluição de *E. coli* em pontos de lançamento direto, elevou criticamente a turbidez devido ao carreamento de material particulado das superfícies urbanas. O monitoramento confirmou o agravamento dos índices de contaminação a jusante, evidenciando o efeito cumulativo da degradação antrópica. Conclui-se que a vulnerabilidade dos sistemas fluviais em Ouro Preto é potencializada pela combinação de fatores geológicos naturais e carência de infraestrutura de saneamento, demandando estratégias integradas de gestão hídrica.

Palavras-chave: Rios urbanos, Morfometria, Qualidade da água.

ABSTRACT

This study investigated the interrelationship between physical characteristics and the environmental condition of urban watercourses in the Rio do Carmo basin, in Ouro Preto/MG. The research quantified the runoff dynamics of 189 channels through the analysis of linear morphometric parameters (bifurcation ratio, channel length, overland flow length, and channel gradient), aerial parameters (basin area, basin length, basin shape, stream and drainage density, and maintenance coefficient), and relief parameters (relief ratio, ruggedness index, and sinuosity index), which are fundamental for characterizing regional hydrological behavior (CHRISTOFOLETTI, 1980; CHEREM, 2008). Complementarily, longitudinal profiles integrated with lithological analysis were elaborated, correlating slope ruptures (knickpoints) with the resistance of local geological formations. To evaluate water quality, the Water Quality Index (WQI) was utilized based on a sampling campaign at four points selected by Strahler's hierarchy and the urban occupation gradient. Collections occurred after a precipitation event to capture the impact of surface runoff on parameters such as turbidity, pH, conductivity, temperature, and coliforms. The results demonstrate that the drainage network is strongly conditioned by resistant lithology and steep slopes, resulting in a fast hydrological response and high sediment transport potential. Field analysis revealed that precipitation acted ambiguously: while it promoted the dilution of *E. coli* at direct discharge points, it critically increased turbidity due to the wash-off of particulate matter from urban surfaces. Monitoring confirmed the worsening of contamination indices downstream, evidencing the cumulative effect of anthropogenic degradation. It is concluded that the vulnerability of fluvial systems in Ouro Preto is enhanced by the combination of natural geological factors and a lack of sanitation infrastructure, demanding integrated water management strategies.

Keywords: Urban rivers, Morphometry, Water quality.

LISTA DE FIGURAS E TABELA

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Hierarquia Fluvial e Delimitação das Bacias Hidrográficas Urbanas de Ouro Preto (MG) | 23 |
| Figura 2 - Declividade em porcentagem de Ouro Preto-MG | 24 |
| Figura 3 - Fita de monitoramento microbiológico (Alfakit) contendo nutrientes específicos para o crescimento e identificação de coliformes após incubação. | 26 |
| Figura 4 - Pontos de amostragem do trabalho de campo | 28 |
| Figura 5 - Formações geológicas de Ouro Preto - MG | 31 |
| Figura 6 – Perfil longitudinal do Córrego do Funil..... | 32 |
| Figura 7 – Perfil longitudinal do Córrego Tripuí | 33 |
| Figura 8 – Perfil longitudinal do Rio do Carmo | 34 |
| Figura 9 - Altimetria de Ouro Preto - MG | 36 |
| Figura 10 - Variação da turbidez nas amostras de água. Da esquerda para a direita: Ponto 2 (elevada turbidez) e Ponto 1 (baixa turbidez), evidenciando o carreamento de material particulado ao longo do gradiente urbano..... | 43 |
| Figura 11 - Ponto 2 - Saramenha..... | 43 |
| Figura 12 - Ponto 1 - Loteamento Jacobas..... | 44 |
| Figura 13 - Ponto 4 - Rio do Carmo – água com turbidez visivelmente elevada. | 46 |
| | |
| Tabela 1 - Parâmetros de qualidade da água e limites normativos para rios urbanos e descarte de efluentes. | 26 |
| Tabela 2 - Índice de sinuosidade por trechos das bacias hidrográficas..... | 39 |
| Tabela 3 – Resultados dos parâmetros de qualidade da água por ponto de coleta..... | 42 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 Objetivos | 11 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 11 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 11 |
| 1.2 Justificativa | 11 |
| 2. DESENVOLVIMENTO | 13 |
| 2.1 Metodologia | 13 |
| 2.2 Coleta e tratamentos de dados geoespaciais..... | 14 |
| 2.3 Definição dos cálculos morfométricos..... | 15 |
| 2.3.1 Análise linear da rede hidrográfica | 16 |
| 2.3.2 Análise areal das bacias hidrográficas | 18 |
| 2.3.3 Análise hipsométrica | 21 |
| 2.4 Caracterização da área de estudo | 23 |
| 2.5 Coleta de dados em campo..... | 25 |
| 3. DISCUSSÃO E RESULTADOS | 30 |
| 3.1 Perfis longitudinais e condicionamento litológico | 30 |
| 3.2 Análise morfométrica da bacia do rio Carmo em Ouro Preto..... | 36 |
| 3.3 Avaliação da qualidade da água | 42 |
| 3.4 Qualidade ambiental na bacia hidrográfica do rio do Carmo na sede de Ouro Preto | 45 |
| 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 48 |

1. INTRODUÇÃO

Os rios urbanos são veias vitais para as cidades, desempenhando funções cruciais no abastecimento de água e na regulação climática (TUNDISI, 2003), além da manutenção da biodiversidade e construção da identidade cultural (HOUGH, 1995). No entanto, a urbanização acelerada e desordenada tem exercido pressão intensa sobre esses ecossistemas (TUCCI, 2008).

A expansão urbana sem planejamento adequado muitas vezes resulta na impermeabilização do solo, na supressão de matas ciliares e, drasticamente, na precariedade da infraestrutura sanitária. Essa última transforma rios em meros receptores de efluentes domésticos e industriais, além de resíduos sólidos urbanos, intensificando drasticamente a contaminação e comprometendo severamente a sustentabilidade ambiental desses corpos hídricos (TEIXEIRA; MILLAN, 2024). A degradação desses sistemas não apenas afeta a biodiversidade local, mas também compromete a segurança hídrica e a saúde pública, criando um ciclo vicioso de impactos socioambientais negativos.

Paralelamente, a crescente frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, como chuvas torrenciais, representa um desafio crítico e global para a gestão urbana, afetando severamente centros urbanos em todo o mundo, incluindo cidades históricas como Ouro Preto, em Minas Gerais. A intensificação desses eventos, muitas vezes ligada diretamente às mudanças climáticas e ao aquecimento global, eleva significativamente os riscos de erosão do solo, deslizamentos de encostas e inundações urbanas generalizadas, com sérias implicações para a infraestrutura urbana e a segurança e bem-estar da população local (NETTO, 2005). Compreender a complexa interação entre o regime de precipitação, o escoamento superficial da água e a dinâmica da ocupação do solo é, portanto, não apenas essencial, mas urgente para o desenvolvimento e a implementação de políticas eficazes de adaptação e mitigação, visando reduzir a vulnerabilidade das cidades a esses fenômenos climáticos extremos.

Nesse contexto desafiador, a análise morfométrica das bacias hidrográficas emerge como uma ferramenta geoespacial e analítica de valor inestimável. Ela permite diagnosticar de forma quantitativa os padrões geomorfológicos, a densidade da rede de drenagem e, crucialmente, a suscetibilidade de áreas específicas a inundações e deslizamentos, por exemplo.

Estudos como os de Christofolletti (1969) e Cherem (2008) demonstram que os parâmetros morfométricos são indicadores eficazes da eficiência de drenagem de uma bacia e de sua propensão a riscos hidrológicos. Christofolletti (1969) introduziu e consolidou diversos índices que se tornaram pilares para os estudos hidrológicos e geomorfológicos.

Entre os principais índices apresentados por Christofolletti destacam-se o índice de compacidade (K_c), que mede a proximidade da forma da bacia a um círculo perfeito, indicando seu potencial de resposta hidrológica a chuvas intensas; o índice de circularidade (I_c), que fornece uma estimativa da eficiência da drenagem e da forma geral da bacia; e a densidade de drenagem (D_d), que reflete a quantidade de canais de drenagem por unidade de área, relacionando-se diretamente à capacidade de escoamento e à propensão à erosão do solo. A aplicação desses índices permite compreender como a água se comporta no arcabouço geológico, especialmente em eventos de alta precipitação.

Apesar de sua relevância metodológica, a avaliação da qualidade da água em Ouro Preto enfrenta limitações significativas decorrentes da escassez de dados e da ausência de um sistema de monitoramento robusto. Mesmo com a aplicação de um conjunto de parâmetros específicos, como turbidez, condutividade, pH, temperatura e coliformes fecais, atualmente é difícil alcançar uma análise holística e completa da saúde do ecossistema. A lacuna no monitoramento municipal, marcada pela ausência de equipamentos como estações fluviométricas para medição de vazão e sensores para análises contínuas, impede uma avaliação mais precisa e abrangente dos corpos d'água (OURO PRETO, 2015).

A carência técnica restringe a aplicabilidade de estudos mais avançados, como a matriz de indicadores de sustentabilidade de Barreto e Moraes (2018), que demandariam um volume de informações não disponível na região. Além disso, a falta de dados quantitativos de longo prazo compromete a capacidade de entender a dinâmica sazonal e os efeitos cumulativos da poluição, tornando o diagnóstico atual apenas um retrato momentâneo da complexa degradação hídrica. A dependência de dados pontuais e a ausência de um histórico consistente de monitoramento representam um desafio metodológico, pois limitam a capacidade de prever tendências e de correlacionar os impactos da poluição com a variabilidade natural do rio.

Assim, este trabalho se propõe a ir além de uma análise puramente técnica, buscando articular os aspectos físico-naturais e ambientais dos rios urbanos de Ouro

Preto. Com essa abordagem multifacetada, o estudo visa contribuir para a valorização, a preservação e a gestão integrada do seu valioso patrimônio hídrico, reconhecendo a complexidade e a interconexão das diferentes dimensões que influenciam a saúde dos rios urbanos e a resiliência da cidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar aspectos da qualidade da água e suas possíveis relações com índices morfométricos em cursos d'água urbanos da sede de Ouro Preto inseridos no contexto da bacia hidrográfica do rio do Carmo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar o perfil longitudinal dos principais cursos d'água da área urbana da sede de Ouro Preto e possíveis condicionamentos litológicos.
- Avaliar a eficiência da drenagem e suscetibilidade a riscos hidrológicos das bacias hidrográficas urbanas.
- Avaliar a qualidade hídrica dos cursos d'água urbanos por meio da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

1.2 Justificativa

Em Ouro Preto, a relação com os rios urbanos vai muito além da esfera ecológica, mergulhando profundamente nas dimensões históricas e culturais que moldaram a própria cidade. Desde o Período Colonial, a água foi um elemento fundamental e indissociável da economia local, especialmente para a extração do ouro. Ferreira (2017) ressalta, em seus estudos, que os complexos sistemas de aquedutos, construídos de forma engenhosa para desviar água de nascentes e córregos, eram incessantemente utilizados na lavagem de sedimentos ferruginosos ricos em ouro. Essa estratégia tecnológica, de suma importância para a produção aurífera, é atribuída a africanos escravizados vindos da Costa do Ouro, que traziam consigo um conhecimento ancestral e sofisticado de técnicas de mineração subterrânea e de manejo da água.

Essa interação ancestral e intensa reflete como a intervenção humana na dinâmica fluvial é um elemento presente desde o início da ocupação de Vila Rica. Atualmente, a urbanização que se processa sobre um relevo acidentado e montanhoso, aliada a uma alta incidência pluviométrica, intensifica significativamente os processos erosivos e altera de forma drástica a dinâmica hidrológica natural dos rios. A persistente ausência ou a precariedade do saneamento básico em várias áreas urbanas de Ouro Preto agrava ainda mais a degradação dos corpos d'água, transformando-os em canais de esgoto a céu aberto e comprometendo a segurança ambiental e a saúde das comunidades (OURO PRETO, 2015).

As características topográficas e geológicas peculiares da cidade de Ouro Preto exercem uma influência determinante sobre a rede de drenagem e o comportamento hidrológico dos rios urbanos. Inserida em uma paisagem predominantemente serrana, com litologia heterogêneas e muitas vezes intemperizadas, Ouro Preto apresenta áreas com alta suscetibilidade a processos erosivos, especialmente em regiões onde as rochas possuem baixa permeabilidade, o que facilita significativamente o escoamento superficial rápido da água. Tais condições naturais fazem da morfometria das bacias urbanas um elemento importante para a avaliação da vulnerabilidade da cidade a enchentes repentinas e deslizamentos de terra.

Estudos consolidados indicam que bacias hidrográficas com uma elevada densidade de drenagem (Dd) e baixos índices de compacidade tendem a responder de maneira mais rápida e explosiva a eventos de precipitação intensa, elevando consideravelmente o risco de inundações repentinas (CHRISTOFOLETTI, 1969). Dessa forma, a análise morfométrica das bacias urbanas em Ouro Preto transcende o âmbito estritamente acadêmico, configurando-se como um instrumento com potencial para contribuir para a gestão territorial e a mitigação de riscos.

A utilização de índices morfométricos, conforme as propostas de Christofolletti (1969), proporciona uma visão detalhada e quantificável da dinâmica das bacias, permitindo a identificação precisa de áreas críticas que demandam intervenções de engenharia urgentes, tais como obras de contenção de encostas, estabilização de taludes e a implementação de sistemas de drenagem urbana mais eficientes e resilientes. Além disso, esses estudos técnicos e científicos contribuem substancialmente para o planejamento de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento urbano sustentável da cidade e à promoção da segurança e bem-estar da população ouropretana.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em etapas sequenciais, permitindo uma análise integrada dos rios urbanos de Ouro Preto sob perspectivas quantitativas e qualitativas. Cada fase foi organizada de modo a atender aos objetivos da pesquisa e garantir a consistência da coleta e da análise dos dados, fundamentando-se em protocolos consolidados de análise de bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A etapa inicial consistiu no levantamento bibliográfico e documental, contemplando obras científicas sobre morfometria de bacias hidrográficas, sustentabilidade aplicada a ambientes fluviais e relações entre gestão hídrica e patrimônio histórico-cultural. Paralelamente, foram consultados documentos estratégicos do município, como o Plano de Saneamento Básico de Ouro Preto, bem como bases de dados ambientais de acesso público. Essa fase teve como finalidade construir um referencial teórico e contextualizar a investigação no âmbito local e nas políticas existentes, utilizando a revisão bibliográfica como base para a seleção de indicadores socioambientais (BARRETO; MORAES, 2018).

A coleta de dados constituiu um dos pilares da pesquisa, combinando informações geoespaciais e análises de campo. Imagens de satélite ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 metros, permitiram gerar Modelos Digitais de Elevação (MDE) e curvas de nível detalhadas, enquanto dados de cursos d'água e bacias foram obtidos em bases oficiais, como o IDE-SISEMA, garantindo confiabilidade. Com esses insumos, foram realizados cálculos morfométricos no ArcGIS, determinando parâmetros essenciais como densidade de canais, densidade de drenagem, fator de forma e relação de relevo, seguindo as premissas metodológicas de Christofolletti (1981) e as adaptações para bacias complexas propostas por Cherem (2008) e Santos et al. (2024). Tais parâmetros são fundamentais para uma análise precisa da dinâmica fluvial urbana e da vulnerabilidade ambiental de terrenos declivosos.

Paralelamente à análise morfométrica, foi realizada a definição de indicadores de sustentabilidade ambiental através da pesquisa de Barreto e Moraes (2018), que utilizou o Método Delphi para definir uma matriz. No entanto, cientes das limitações de dados e infraestrutura de monitoramento contínuo em Ouro Preto, a

pesquisa se concentrou na aplicação de um conjunto de parâmetros específicos e disponíveis, incluindo turbidez, condutividade, pH, temperatura e coliformes fecais. Tal abordagem, que utiliza índices simplificados para diagnósticos rápidos, encontra amparo em trabalhos que correlacionam a qualidade da água com o uso e ocupação do solo em áreas de relevo acidentado (CHEREM et al., 2017; SILVA et al., 2021). Isso permitiu, mesmo com as limitações locais, um diagnóstico mais abrangente da qualidade da água, articulando a análise técnica com o contexto das pressões urbanas e ambientais, fornecendo, assim, uma base sólida para a compreensão dos desafios enfrentados na gestão hídrica do município.

2.2 Coleta e tratamentos de dados geoespaciais

A coleta de dados geoespaciais constituiu um pilar fundamental desta pesquisa, fundamentando-se nos princípios da cartografia ambiental e da morfometria de bacias (CHRISTOFOLETTI, 1980). Utilizou-se imagens de satélite ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros, para a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e a subsequente elaboração de curvas de nível detalhadas. Adicionalmente, as informações referentes aos cursos d'água e à delimitação das bacias hidrográficas foram extraídas de fontes oficiais, como a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE SISEMA). O uso de bases oficiais e modelos de elevação de alta resolução é uma prática consolidada em estudos recentes de vulnerabilidade urbana e dinâmica fluvial em regiões de relevo acidentado (CHEREM et al., 2017; SOUZA; SANTOS, 2022).

Na sequência, iniciou-se a fase de cálculos morfométricos por meio de técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Empregando o software ArcGIS, foram determinados parâmetros essenciais para a caracterização do comportamento hidrológico da área. Esses cálculos seguiram as metodologias clássicas de Christofolletti (1981) e as sistematizações propostas por Cherem (2008) e Santos et al. (2024), que permitem a extração minuciosa de parâmetros topográficos e hidrológicos. A aplicação desses índices morfométricos é amplamente documentada na literatura como ferramenta eficaz para diagnosticar o potencial de escoamento superficial e a degradação ambiental em bacias urbanas (SILVA; ALMEIDA, 2020). Este processo assegurou a precisão dos dados quantitativos e

contribuiu para uma análise robusta dos fenômenos hidrológicos e geomorfológicos estudados.

2.3 Definição dos cálculos morfométricos

Conforme Cherem (2008), os parâmetros morfométricos são fundamentais para compreender as propriedades físicas das bacias hidrográficas e suas redes de drenagem. Esses parâmetros, agrupados em classes como lineares, zonais e hipsométricos, permitem uma análise quantitativa detalhada da forma, estrutura e dinâmica das bacias, sendo essenciais para avaliar a resposta hidrológica a eventos críticos, como chuvas intensas, e para o planejamento ambiental e urbano (CHRISTOFOLETTI, 1980). A utilização sistemática dessas métricas permite antecipar o comportamento do escoamento superficial em áreas com forte pressão antrópica, conforme demonstrado em estudos de zoneamento ambiental e gestão de riscos em bacias mineiras (CHEREM et al., 2017; SOUZA; SANTOS, 2022).

Nesse sentido, Cherem (2008) destaca que os atributos da bacia hidrográfica utilizados na composição dos parâmetros morfométricos incluem: área da bacia, perímetro, comprimento da bacia, comprimento dos canais fluviais, número de canais, declividade da bacia e dos canais, além de altimetria. Esses atributos, quando correlacionados através das equações clássicas da geomorfologia fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981), geram os parâmetros morfométricos que auxiliam na compreensão da dinâmica hidrológica e geomorfológica. A análise desses dados permite identificar padrões na organização espacial das sub-bacias, contribuindo para a compartimentação morfométrica e para a proposição de medidas de gestão e mitigação de riscos ambientais em cenários de urbanização acelerada.

Com o uso do software ArcGIS, os indicadores foram determinados em três classes distintas, seguindo a sistematização de Christofolletti (1969), Cherem (2008) e Santos et al. (2024), permitindo uma comparação direta com outros índices de sustentabilidade e qualidade ambiental aplicados em bacias hidrográficas brasileiras (SILVA; ALMEIDA, 2020).

2.3.1 Análise linear da rede hidrográfica

A análise linear examina a estrutura intrínseca da rede de drenagem de uma bacia, dedicando-se ao estudo de parâmetros como o número, o comprimento e a hierarquização dos canais fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1980). A partir desses dados, é possível determinar a densidade de drenagem e a capacidade de escoamento do sistema. A relevância dessa análise reside na quantificação da eficiência de drenagem da bacia e na previsão de sua resposta hidrológica a eventos de precipitação, atuando como um indicador de sua suscetibilidade a fenômenos de escoamento rápido. Estudos aplicados em bacias urbanas mineiras demonstram que a análise linear é crucial para identificar áreas propensas a inundações repentinas devido à rápida conectividade dos canais (CHEREM et al., 2017; SILVA; ALMEIDA, 2020).

Relação de bifurcação (Rb)

A relação de bifurcação (Rb) estabelece a razão entre a quantidade de canais de uma ordem específica e os da ordem imediatamente superior (STRAHLER, 1957). Esta relação demonstra a eficácia na drenagem da água precipitada, sendo influenciada pela topografia, litologia e propriedades tectônicas do local (CHRISTOFOLETTI, 1981).

De acordo com Christofolletti (1969), valores reduzidos de Rb (próximos de 2) são característicos de bacias mais unificadas, comumente encontradas em terrenos uniformes, onde a drenagem é eficaz e a fragmentação é reduzida. Em contrapartida, valores elevados de Rb (superiores a 4) sinalizam uma rede de drenagem altamente ramificada, característica comum em regiões de relevo acidentado ou com solos de alta resistência. No contexto de Ouro Preto, este índice é fundamental para compreender como o relevo serrano condiciona a organização da rede fluvial (CHEREM, 2008).

Comprimento do rio principal (L)

O comprimento do rio principal é a extensão linear desde a nascente até a foz do curso d'água de maior magnitude na bacia. Este parâmetro é fundamental para determinar a escala da bacia e sua capacidade de conduzir o escoamento superficial. Segundo Christofolletti (1981), rios principais mais longos tendem a indicar bacias com

tempo de concentração mais prolongado, retardando o pico de vazão. Em contrapartida, rios mais curtos, comuns em sub-bacias de cabeceira como as observadas na região central de Ouro Preto, possuem tempos de resposta mais rápidos a eventos de precipitação intensa, o que eleva o risco de enxurradas (CHEREM et al., 2017).

Extensão do percurso superficial (*Eps*)

A extensão do percurso superficial corresponde à distância média percorrida pelo escoamento superficial (enxurradas) desde o interflúvio até o canal fluvial mais próximo. Segundo Christofolletti (1981), este parâmetro atua como um indicador do comprimento médio das vertentes, representando a trajetória percorrida pelas águas pluviais antes de serem canalizadas. O cálculo do *Eps* é inversamente proporcional à densidade de drenagem (*Dd*), sendo expresso pela fórmula:

$$Eps = \frac{1}{2 \times Dd}$$

Em áreas urbanas com relevo acidentado, como Ouro Preto, este índice é fundamental para estimar o tempo de resposta das encostas frente a chuvas intensas. Valores baixos de *Eps* indicam que a água alcança rapidamente a rede de drenagem, aumentando o potencial de picos de vazão e inundações a jusante (CHEREM et al., 2017).

Gradiente de canais (*Gc*)

O gradiente dos canais é um indicador geomorfológico que avalia a relação entre a variação altimétrica e a extensão dos cursos de água. De acordo com Christofolletti (1981), o *Gc* representa a energia potencial disponível em variados segmentos do canal, sendo determinante na dinâmica de erosão e transporte de sedimentos. Canais com gradientes acentuados possuem elevada energia hidráulica, o que favorece processos de erosão vertical e transporte de detritos. Por outro lado, gradientes suaves estão associados a áreas de deposição e formação de planícies aluviais.

Christofolletti (1981) ressalta que o gradiente é influenciado por fatores como a litologia, o regime hidrológico e a atividade tectônica. Alterações bruscas no *Gc*, como rupturas no perfil longitudinal (knickpoints), podem sinalizar mudanças no

equilíbrio fluvial ou variações na resistência geológica das rochas locais (CHEREM, 2008). Ademais, a avaliação do gradiente é empregada para identificar o estágio evolutivo da bacia, diferenciando trechos em fase juvenil (altas declividades e forte incisão) de regiões em equilíbrio ou senescência.

O cálculo é realizado a partir da relação entre a variação altimétrica e a extensão do trecho, expresso pela fórmula:

$$G = \frac{\Delta H}{L}$$

Onde ΔH representa a diferença de nível entre dois pontos e L é a distância percorrida pelo canal entre eles. Em cidades históricas e serranas, o monitoramento do G_c auxilia na identificação de trechos de rios com maior risco de degradação das margens e infraestruturas urbanas (SILVA; ALMEIDA, 2020).

2.3.2 Análise areal das bacias hidrográficas

A análise areal investiga a morfologia da bacia em sua dimensão bidimensional, focando na geometria da bacia e sua influência sobre a concentração do fluxo hídrico em um ponto específico (CHRISTOFOLETTI, 1980). Sua metodologia abrange parâmetros como área, perímetro, fator de forma e índice de compactidade, que são fundamentais para determinar a eficiência do escoamento e a vulnerabilidade ambiental (CHEREM, 2008). Bacias com morfologia mais compacta tendem a manifestar uma resposta hidrológica mais rápida e intensa, apresentando maior suscetibilidade a inundações em curtos intervalos após precipitações, uma característica crítica em bacias urbanas de relevo acidentado (SILVA; ALMEIDA, 2020).

Área da bacia (A)

A área da bacia é a superfície total de captação, delimitada pelos divisores de água, que contribui para o escoamento em direção ao exutório. Segundo Christofolletti (1981), esta é a medida fundamental para a estimativa do volume de escoamento superficial, uma vez que a magnitude do fluxo e a capacidade de armazenamento hídrico são diretamente proporcionais à superfície de coleta de águas pluviais. No contexto de Ouro Preto, a análise da área de contribuição é essencial para

o dimensionamento de obras de drenagem e gestão do risco de inundação (CHEREM et al., 2017).

Comprimento da bacia (L)

O comprimento da bacia refere-se à maior distância linear entre a nascente mais remota e a foz, acompanhando o eixo principal do curso d'água. Este parâmetro está intrinsecamente relacionado ao tempo de concentração, que é o tempo necessário para que toda a bacia contribua simultaneamente para o fluxo no exutório (CHRISTOFOLETTI, 1981). Conforme as observações de Cherem (2008), bacias com comprimentos mais extensos e formas alongadas geralmente apresentam tempos de resposta hidrológica prolongados, o que tende a suavizar os picos de vazão, ao contrário de bacias curtas e circulares que concentram o escoamento rapidamente.

Forma da bacia (Ic)

O Índice de Circularidade (Ic) é uma medida adimensional que avalia a forma da bacia hidrográfica, comparando-a a um círculo perfeito. Ele é um indicador crucial para a gestão de riscos, pois a geometria da bacia influencia diretamente a concentração do fluxo hídrico. O Ic é calculado pela razão entre a área da bacia (A) e a área de um círculo (A_c) de perímetro idêntico ao da bacia (CHRISTOFOLETTI, 1969).

Valores próximos a 1 indicam uma forma mais circular e compacta. Esse formato faz com que a água de toda a bacia atinja o canal principal em tempos similares, resultando em picos de vazão rápidos e acentuados. Bacias nessa categoria, especialmente com Ic entre 0,75 e 1,0, são altamente suscetíveis a inundações repentinas. Já valores próximos a 0 representam formas alongadas e irregulares. Nesses casos, o escoamento é distribuído ao longo do tempo, atenuando o pico de vazão, o que torna a bacia menos propensa a cheias violentas (CHEREM, 2008). Conforme a classificação adaptada por Cherem et al. (2017), bacias com Ic inferior a 0,50 são consideradas pouco propensas a enchentes, enquanto valores entre 0,50 e 0,75 indicam uma tendência mediana.

Densidade de rios (*Dr*) e Densidade de Drenagem (*Dd*)

A densidade de rios (*Dr*) refere-se à quantidade de canais em relação à área total da bacia, enquanto a densidade de drenagem (*Dd*) expressa a extensão total dos canais por unidade de área. Esses indicadores, fundamentados em Schumm (1956) e amplamente difundidos por Christofolletti (1980), mensuram a capacidade de drenagem da bacia e o grau de dissecação do relevo.

Uma maior densidade de drenagem está associada a uma maior suscetibilidade a processos erosivos e escoamento superficial rápido, características comuns em áreas urbanas impermeabilizadas ou em terrenos de baixa permeabilidade (CHEREM, 2008). Valores menores podem indicar áreas com maior potencial de infiltração e menor risco imediato de enchentes. Em estudos de bacias mineiras, esses índices são utilizados para correlacionar o adensamento urbano com a degradação dos canais (SILVA; ALMEIDA, 2020).

Coefficiente de manutenção (*Cm*)

O coeficiente de manutenção representa a área mínima necessária para manter em funcionamento um metro linear de canal de escoamento. Este índice, definido por Schumm (1956) e adaptado por Christofolletti (1981), é calculado pela expressão:

$$Cm = \left(\frac{1}{Dd} \right) \times 1.000$$

Onde *Cm* é o coeficiente de manutenção (m^2/m) e *Dd* é o valor da densidade de drenagem. Conforme a adaptação de Tolentino, Gandolfi e Paraguassu (1968), o resultado é multiplicado por 1.000 para expressar a quantidade de área necessária para cada metro de canal.

Segundo Christofolletti (1981), este é um dos valores numéricos mais importantes para a caracterização do sistema de drenagem, pois limita a área requerida para o desenvolvimento dos cursos d'água. Há uma correlação inversa entre o *Cm* e a densidade de drenagem: conforme ocorre a dissecação do relevo e o aumento da rede de canais, diminui-se a área disponível para manutenção individual de cada trecho. Em bacias urbanas, valores baixos de *Cm* sugerem sistemas de drenagem extremamente

denso e pressionados, exigindo maior atenção da gestão pública quanto à conservação das margens e controle de sedimentos (CHEREM et al., 2017).

2.3.3 Análise hipsométrica

A análise altimétrica e hipsométrica investiga as propriedades verticais da bacia e a distribuição espacial de sua massa de relevo. Ela se dedica ao estudo da declividade média, da relação de relevo e da curva hipsométrica, tendo como propósito mensurar a energia do relevo e o potencial erosivo do sistema (CHRISTOFOLETTI, 1980). Essas informações são fundamentais para compreender a dinâmica do transporte de sedimentos e o estágio evolutivo da bacia. Conforme destacado por Cherem (2008), bacias com relevo mais acentuado apresentam um escoamento com maior energia potencial, o que resulta em maior capacidade de incisão vertical e alteração da paisagem geomorfológica, especialmente em contextos de urbanização em encostas, como em Ouro Preto.

Relação de relevo (Rr)

A relação de relevo (Rr) é um indicador utilizado para avaliar o gradiente altimétrico médio de uma bacia hidrográfica, determinado pela razão entre a amplitude altimétrica (diferença entre a altitude máxima e mínima) e o comprimento do rio principal. É expressa pela equação:

$$Rr = \frac{H}{L}$$

Segundo Christofolletti (1981), este indicador representa a energia potencial disponível para o fluxo hídrico, sendo crucial para entender a velocidade do escoamento e a competência do rio no transporte de carga sedimentar. Em áreas com elevada Rr , como as zonas de cabeceira da Serra do Espinhaço, espera-se um fluxo mais veloz e processos erosivos mais intensos, impactando diretamente a estabilidade dos canais a jusante (CHEREM et al., 2017).

Índice de rugosidade (*Ir*)

O Índice de Rugosidade (*Ir*) quantifica a complexidade e a irregularidade da superfície de uma bacia, relacionando a variação altimétrica com o desenvolvimento da rede de drenagem. O cálculo é realizado pelo produto entre a amplitude de relevo (*H*) e a densidade de drenagem (*Dd*), conforme a fórmula estabelecida por Schumm (1956) e difundida por Christofolletti (1980):

$$Ir = H \times Dd$$

Este parâmetro é essencial para compreender a dinâmica do fluxo superficial: um alto valor de *Ir* sugere superfícies acidentadas e densamente drenadas, típicas de áreas com forte dissecação do relevo. Por outro lado, valores baixos indicam relevos mais suaves e uniformes. No planejamento urbano, o *Ir* auxilia na identificação de áreas de alta fragilidade ambiental onde a declividade e a densidade fluvial potencializam riscos geológicos (SILVA; ALMEIDA, 2020).

Índice de Sinuosidade (*Is*)

O Índice de Sinuosidade (*Is*) avalia a geometria do canal fluvial, sendo determinado pela relação entre o comprimento real do canal (*Lc*) e a distância vetorial entre sua nascente e foz (*Lv*):

$$Is = \frac{Lc}{Lv}$$

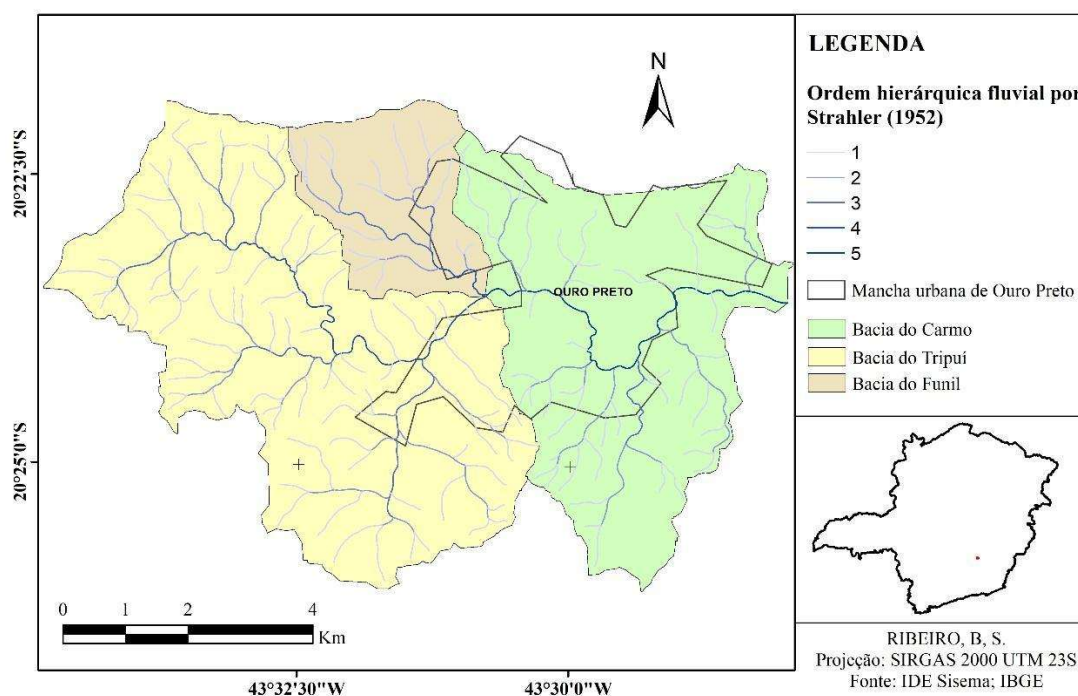
De acordo com Christofolletti (1981), essa métrica demonstra a interação entre a dinâmica do fluxo e as margens. Valores de *Is* próximos a 1 sinalizam canais retilíneos, geralmente controlados por estruturas geológicas ou situados em terrenos de alta declividade. Valores acima de 1,5 caracterizam canais meandrantés, onde a erosão lateral predomina sobre a vertical, comum em planícies aluviais.

A sinuosidade também está ligada à estabilidade e ao ajuste do canal. Rios de grande sinuosidade dissipam energia através de curvas, intensificando a deposição alternada. Em contrapartida, em regiões montanhosas, a sinuosidade pode ser baixa devido à resistência do embasamento rochoso ou falhas tectônicas (CHEREM, 2008). Portanto, a avaliação do *Is* é essencial para antecipar mudanças no percurso fluvial e planejar ações de mitigação em regiões propensas a inundações e assoreamento.

2.4 Caracterização da área de estudo

A hierarquização da rede de drenagem de Ouro Preto, estruturada segundo o método de Strahler (1952) e apresentada na Figura 1, evidencia o predomínio das sub-bacias pertencentes à Região Hidrográfica do Rio Doce. Observa-se que, para o perímetro urbano em questão, as contribuições da bacia do Rio São Francisco possuem menor expressão territorial e representatividade no sistema de drenagem analisado, sendo então desconsiderada nesta análise.

Figura 1 - Hierarquia Fluvial e Delimitação das Bacias Hidrográficas Urbanas de Ouro Preto (MG)



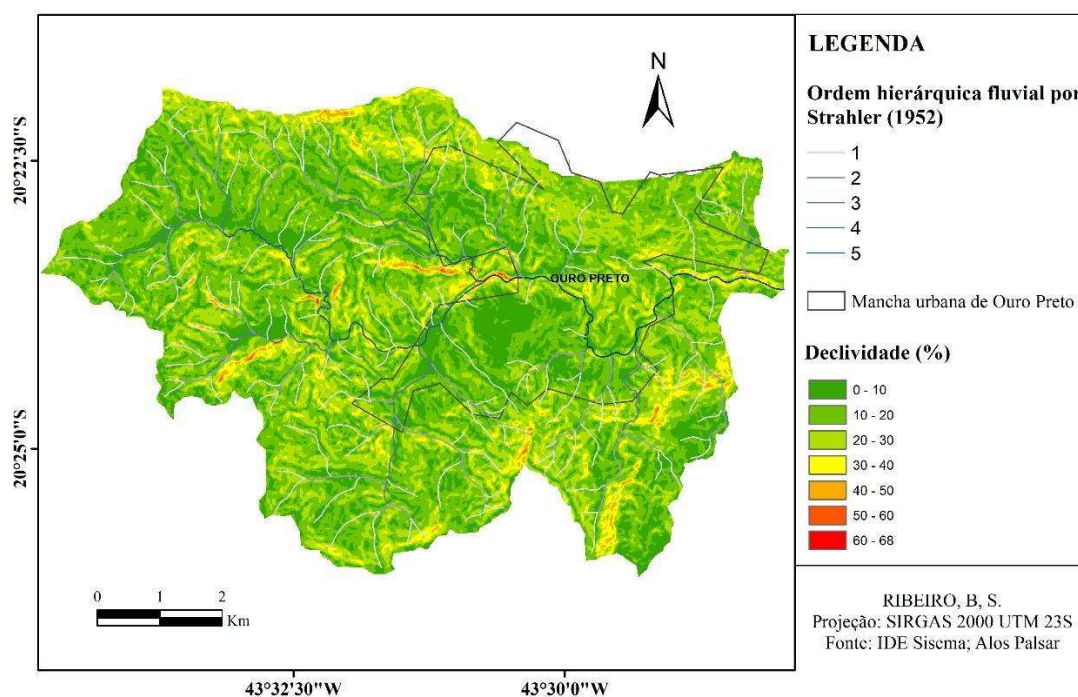
Fonte: IDE Sisema. IBGE.

A bacia do Funil, com seus 7,022 km² e perímetro de 12,053 km, exibe uma rede de drenagem total de 18,219 km, dominada por ordens menores e intermediárias, indicando um sistema de captação de água concentrado em uma área relativamente restrita. Em contraste, a bacia do Tripuí, com 30,226 km² de área e um perímetro de 29,638 km, apresenta uma rede mais extensa, totalizando 79,5 km de cursos d'água, o que sugere um padrão de drenagem mais ramificado e uma maior capacidade de captação hídrica distribuída em um território mais amplo. A bacia do Carmo, por sua vez, atua como um sistema integrador, englobando o Funil e o Tripuí e expandindo-se

para uma área total de 59,229 km². Sua extensa rede hidrográfica de 145,659 km, hierarquizada em até cinco ordens, demonstra a complexidade de sua dinâmica de escoamento superficial. A sobreposição dessas bacias com a mancha urbana de Ouro Preto, visível no mapa, ressalta a interação entre a paisagem natural e a ocupação humana, o que exerce uma influência direta nos processos erosivos, na suscetibilidade a enchentes e na gestão dos recursos hídricos.

Além disso, através da Figura 2, é possível visualizar a declividade do terreno na área das bacias hidrográficas urbanas de Ouro Preto. A declividade é expressa em porcentagem e categorizada em diferentes faixas, variando de áreas relativamente planas (0 a 10%) a regiões de inclinação muito acentuada (60 a 68%). As áreas de menor declividade, representadas em tons de verde, predominam no mapa, indicando setores mais planos, principalmente ao longo dos cursos d'água de menor ordem. Essas regiões tendem a ter maior capacidade de infiltração de água, o que pode influenciar na recarga dos aquíferos. No entanto, as zonas em amarelo, laranja e vermelho representam inclinações mais elevadas, concentrando-se principalmente nas áreas montanhosas e próximas às margens dos canais de maior ordem. Essas regiões são mais suscetíveis a processos erosivos e instabilidade de encostas, o que pode impactar tanto a qualidade dos recursos hídricos quanto à ocupação urbana (LIMA et al., 2021).

Figura 2 - Declividade em porcentagem de Ouro Preto-MG



Fonte: IDE Sisema; Alos Palsar.

A sobreposição da mancha urbana de Ouro Preto permite visualizar a relação entre o relevo e a ocupação do solo. A cidade está inserida em uma área de relevo acidentado, o que impõe desafios para a infraestrutura e o manejo ambiental (LIMA et al., 2021). A presença de cursos d'água hierarquizados sugere um sistema de drenagem bem definido, onde os rios de maior ordem coletam o fluxo das áreas mais elevadas, podendo estar associados a riscos de enxurradas e assoreamento (CHRISTOFOLETTI, 1981; GUERRA; JORGE, 2014)

A morfologia, a dinâmica hídrica e a qualidade ambiental dos sistemas fluviais nas bacias do Tripuí, Funil e Carmo são intrinsecamente influenciadas pela complexa geologia local. A área de estudo é caracterizada por uma variedade de rochas, incluindo litotipos ferruginosos, quartzíticos, carbonáticos e metapelíticos, que moldaram a paisagem ao longo de milhões de anos (ALKMIM; MARSHAK, 1998). A análise dessas formações geológicas é crucial para compreender os processos de erosão, a estabilidade do solo e, conseqüentemente, a qualidade da água nos cursos fluviais.

2.5 Coleta de dados em campo

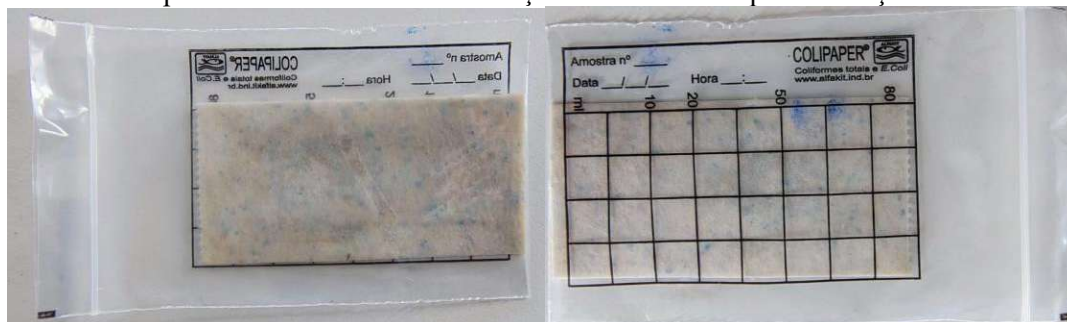
A coleta de amostras de água foi realizada em 26 de março de 2025, de forma a capturar as respostas hidrológicas imediatas após um evento de precipitação. Essa estratégia metodológica visou avaliar o impacto da poluição difusa e do escoamento superficial urbano, condições em que a dinâmica da qualidade da água sofre alterações significativas (LIBÂNIO, 2010).

Nestas circunstâncias, embora o aumento do volume hídrico possa causar a diluição de contaminantes microbiológicos provenientes de lançamentos pontuais de esgoto, ocorre o carreamento de sedimentos e detritos das superfícies impermeabilizadas, elevando os níveis de turbidez e sólidos suspensos no sistema fluvial (VON SPERLING, 2014; TUCCI, 2013). Assim, a amostragem em condições de pós-chuva permite uma análise crítica da resiliência do ecossistema frente ao estresse urbano, servindo de base para os procedimentos de monitoramento adotados.

Para essa análise, foram empregados métodos de monitoramento ambiental que incluíram a mensuração de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. A metodologia de campo consistiu na mensuração de parâmetros físico-químicos e microbiológicos essenciais para o cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA),

instrumento que sintetiza diferentes variáveis em um indicador único para facilitar a interpretação da integridade ambiental (CETESB, 2016).

Figura 3 - Fita de monitoramento microbiológico (Alfakit) contendo nutrientes específicos para o crescimento e identificação de coliformes após incubação.



Fonte: Arquivo pessoal

Foram mensurados a turbidez (Turbidímetro DLT-WV), o pH, a temperatura e a condutividade elétrica, além da detecção de coliformes totais e *Escherichia coli* através do kit Colipaper da Alfakit (Figura 3). A integração desses parâmetros é fundamental, pois cada um reflete aspectos distintos da potabilidade e da degradação hídrica: enquanto a turbidez indica o aporte de sedimentos erosivos e poluição difusa, o pH e a condutividade revelam a presença de cargas químicas, e os indicadores biológicos denunciam a contaminação por esgoto doméstico (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014). A interpretação técnica desses resultados, bem como os limites normativos de referência para cada variável, encontra-se detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de qualidade da água e limites normativos para rios urbanos e descarte de efluentes.

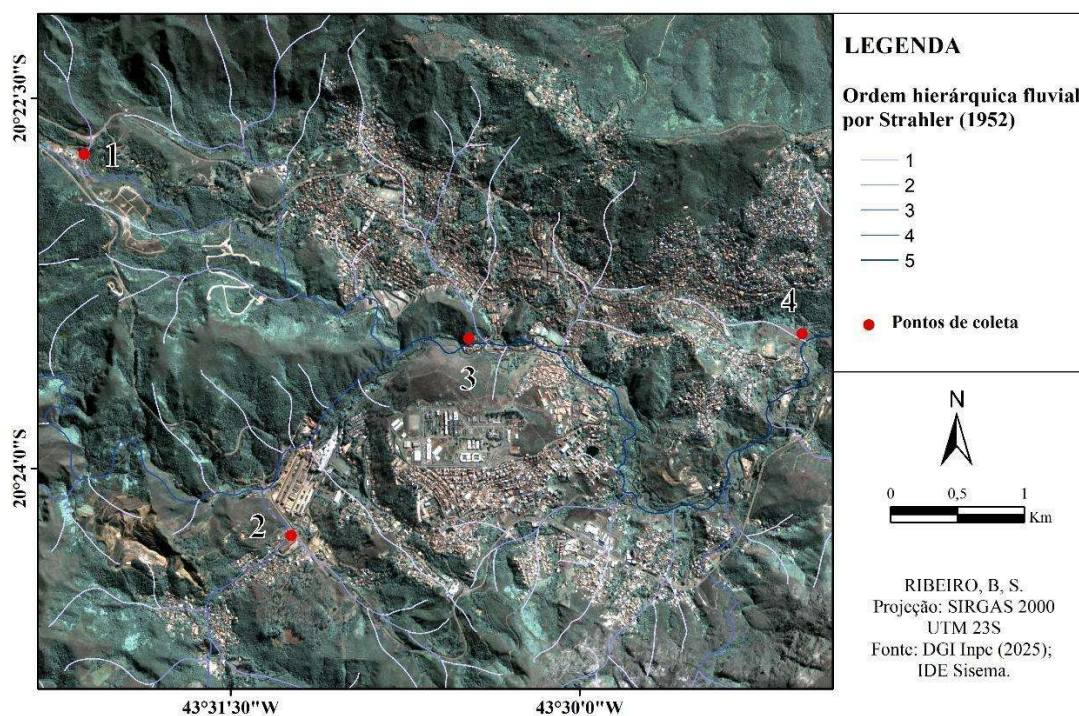
| Parâmetro | Unidade | Situação Ideal | Situação Ideal | Observações |
|-----------|---------|--------------------------|------------------------------|--|
| | | – Rios Urbanos Naturais | – Após Descarte de Efluentes | |
| Turbidez | NTU | < 40 (limite máximo 100) | ≤ 100 | Valores mais altos indicam sedimentos ou poluição urbana |

| | | | | |
|---------------------------|---------------|---|-----------------------------|--|
| pH | - | 6 – 9 | 6 – 9 (efluente: 5 – 9) | Fora da faixa afeta processos biológicos e químicos |
| Temperatura | °C | Próxima à natural, variação ≤ 3 °C | Aumento máximo de 3 °C | Alterações significativas afetam organismos aquáticos |
| Condutividade elétrica | µS/cm | Ideal < 100 | Próximo ao valor natural | Valores altos indicam excesso de sais ou poluição |
| Coliformes totais | UFC/100 ml | ≤ 10.000 | ≤ 10.000 | Indicador de contaminação fecal |
| E. coli | UFC/100 ml | ≤ 1.000 | ≤ 1.000 | Indicador de risco sanitário |

Fonte: Adaptado de CONAMA nº 357/2005 e CONAMA nº 430/2011.

O Ponto 1 identificado na Figura 4, situado no loteamento Jacobas (20°22'43"S, 43°32'09"W; 1.237,84 m), corresponde a um canal de 3ª ordem. Apesar de sua localização adjacente a uma propriedade rural, a ausência aparente de efluentes e de odor indica uma condição de menor alteração ambiental.

Figura 4 - Pontos de amostragem do trabalho de campo



Fonte: DGI Inpe (2025); IDE Sisema.

O Ponto 2 (Córrego Varjada), localizado no bairro Saramenha, às margens da Rodovia Rodrigo de Melo Franco (20°24'15"S, 43°31'14"W; 1.089,39 m) representa um curso de 2ª ordem com significativa influência de contribuições difusas decorrentes do adensamento urbano. A proximidade com um posto de gasolina resultou na observação de óleo derramado no asfalto, configurando um vetor de poluição pontual que é carregado para o leito durante eventos de precipitação.

Essa dinâmica de degradação física e química guarda relação com as observações de Oliveira (2011), que aponta a vulnerabilidade dos cursos d'água de Ouro Preto frente ao carreamento de resíduos e sedimentos. Segundo a autora, a destruturação das margens e a impermeabilização do solo aceleram a entrada de poluentes no sistema hídrico, transformando as vias asfálticas em condutores diretos de contaminantes para os corpos receptores, o que compromete a integridade ambiental dos pequenos tributários da bacia do Rio do Carmo.

Já o Ponto 3, coletado na ponte da estação ferroviária (20°23'27"S, 43°30'29"W; 1.083,28 m), é um curso de 5ª ordem que se encontra em uma área densamente urbanizada, próxima à confluência dos ribeirões Funil e Tripuí. O local apresentou visível descarga de esgoto, confirmada pela presença de um odor intenso.

E por fim, o Ponto 4, localizado a jusante do encontro de rios de 4ª ordem (20°23'25"S, 43°29'03"W; 1.005,9 m), em área próxima à ferrovia, apresentou um odor atenuado. A diminuição do odor, em comparação ao Ponto 3, sugere um processo de diluição dos poluentes ao longo do curso d'água principal.

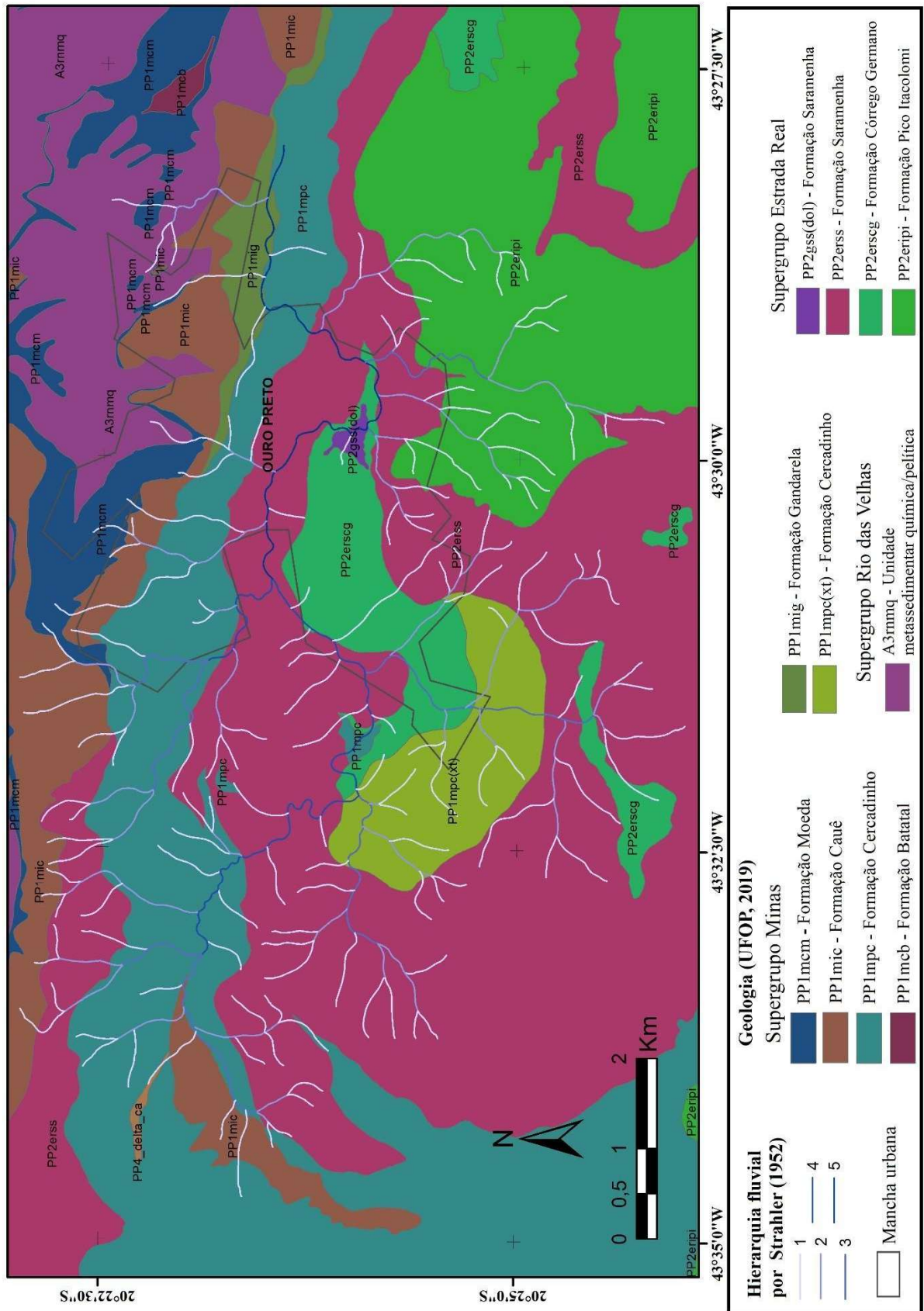
3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

3.1 Perfis longitudinais e condicionamento litológico

Conforme a teoria dos perfis de equilíbrio, rios em estágio de maturidade tendem a apresentar um traçado longitudinal côncavo, com declividade decrescente da nascente em direção à foz, refletindo o equilíbrio dinâmico entre processos de erosão e deposição (CHRISTOFOLETTI, 1980). Contudo, a análise dos perfis levantados para os rios Funil, Tripuí e Carmo evidencia o afastamento desse padrão idealizado: rupturas de declividade (*knickpoints*) e a segmentação do traçado revelam o forte controle litológico e, possivelmente, estrutural atuando como níveis de base locais, modulando a eficiência erosiva, a capacidade de transporte e o padrão de migração lateral dos canais (HACK, 1957).

A litologia da região pode ser observada na Figura 5. As nascentes dos córregos Tripuí e Funil encontram-se predominantemente nas formações Cauê (PP1mic) e Saramenha (PP2erss).

Figura 5 - Formações geológicas de Ouro Preto - MG

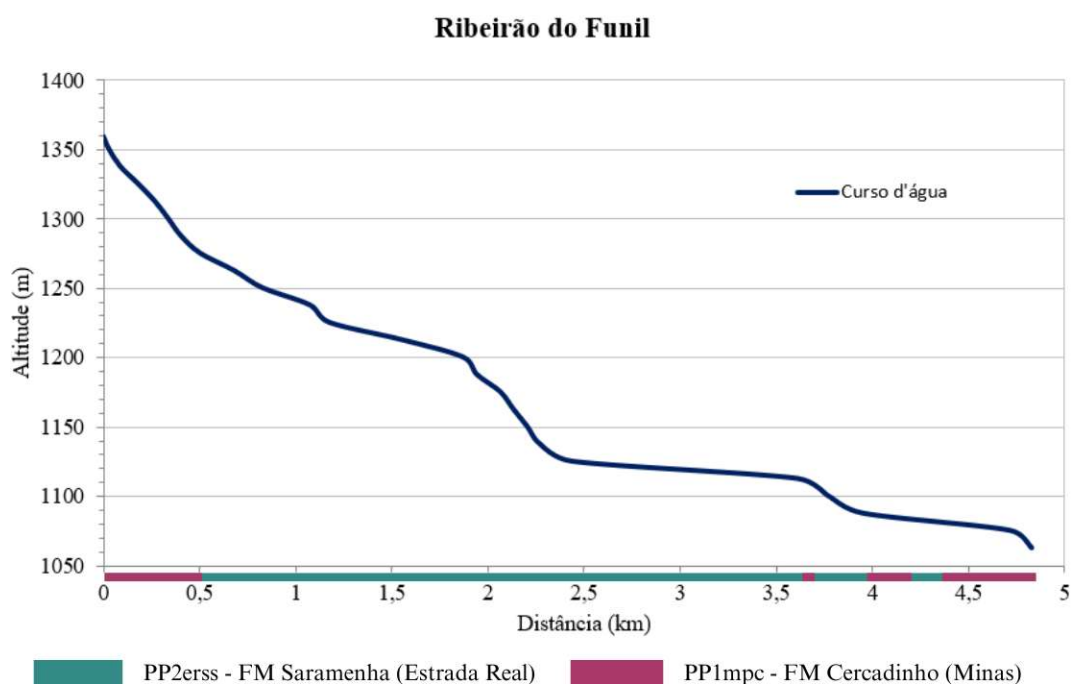


Fonte: UFOP (2019); IDE Sisema.

A Formação Cauê é composta por itabiritos silicosos, dolomíticos e anfibolíticos, hematíticos, mármores e filitos ferruginosos, indicando um ambiente deposicional marinho raso com intensa precipitação química de ferro (ALKMIM; MARSHAK, 1998). Já a Formação Saramenha apresenta maior heterogeneidade, incluindo biotita-clorita-granada xistos, quartzitos, metapelitos e intercalações de metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas, refletindo um ambiente tectônico e metamórfico ativo (CHEREM, 2012). Essa diversidade litológica confere características hidrológicas distintas: enquanto as rochas ferruginosas e quartzíticas possuem porosidade secundária elevada, favorecendo infiltração e recarga de aquíferos, os xistos e metapelitos tendem a ser mais impermeáveis, gerando escoamento superficial e condicionando maior aporte de sedimentos aos canais (CHEREM, 2012; LIMA et al., 2021).

O perfil do Ribeirão do Funil (Figura 6) reflete diretamente essas condições. A presença das formações Saramenha e Cercadinho (PP1mpc) impõe variações importantes no comportamento do canal. A sequência de *knipoints* observados no perfil pode ser resultado tanto da variação de litologias dentro de cada formação ou ainda devido à estrutura (falhas), já que se trata de uma área com diversas falhas, destacando-se as de empurrão.

Figura 6 – Perfil longitudinal do Córrego do Funil

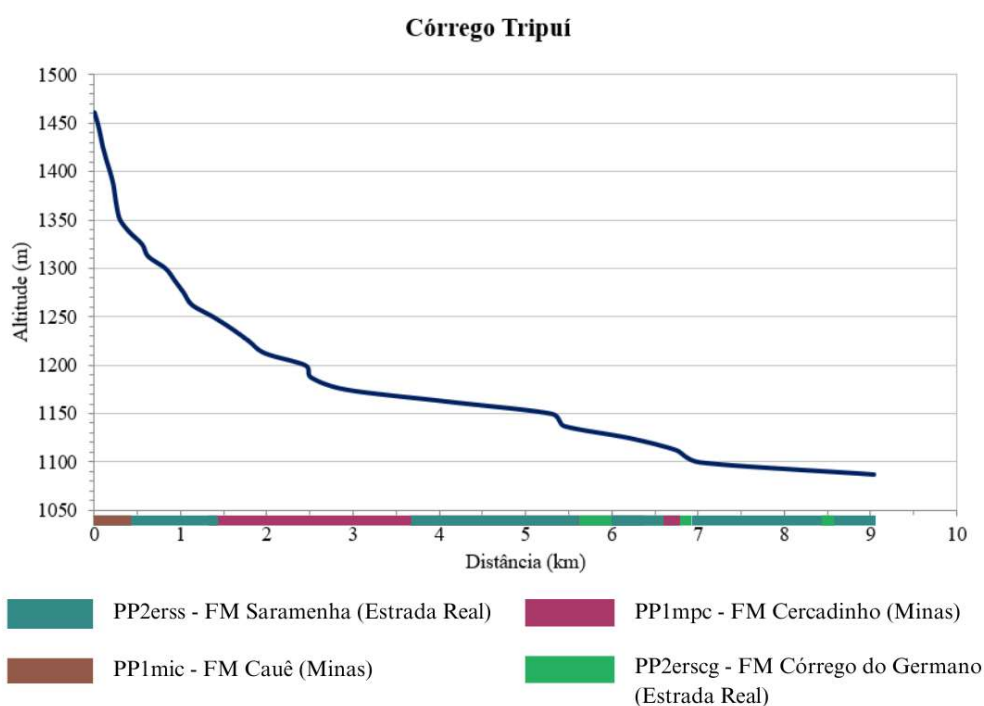


Fonte: UFOP (2019); IDE Sisema, ALOS Palsar (2025).

A Formação Saramenha, composta por litologias frágeis, como xistos e filitos, favorece uma erosão mais acelerada, resultando em canais largos, rasos e com forte migração lateral, além de elevada carga de sedimentos em suspensão. Por outro lado, nos trechos da Formação Cercadinho, composta por quartzitos resistentes, quartzitos ferruginosos, filitos dolomíticos e mármore subordinados (FONSECA E SILVA, 2014), o rio apresenta estreitamento do leito, maior profundidade e maior probabilidade de formação de gargantas e corredeiras. Essa alternância litológica gera um perfil segmentado, marcado pela recorrência de *knickpoints* associados às mudanças abruptas de resistência do substrato (CHRISTOFOLETTI, 1980).

O Córrego do Tripuí (Figura 7) exibe maior diversidade litológica, atravessando as formações Saramenha, Cercadinho, Cauê e Córrego do Germano. Essa configuração reforça a alternância morfológica: nos trechos de maior resistência mecânica, como na Formação Cauê e na Formação Córrego do Germano - ambas compostas por itabiritos bandados e quartzitos ferruginosos - o canal tende a ser mais profundo, estreito e estável, com menor mobilização de sedimentos (FONSECA E SILVA, 2014; LIMA et al., 2021). Já nos segmentos associados à Formação Saramenha e às porções mais frágeis da Formação Cercadinho, a baixa resistência litológica favorece maior sinuosidade, alargamento do leito e alta turbidez da água.

Figura 7 – Perfil longitudinal do Córrego Tripuí

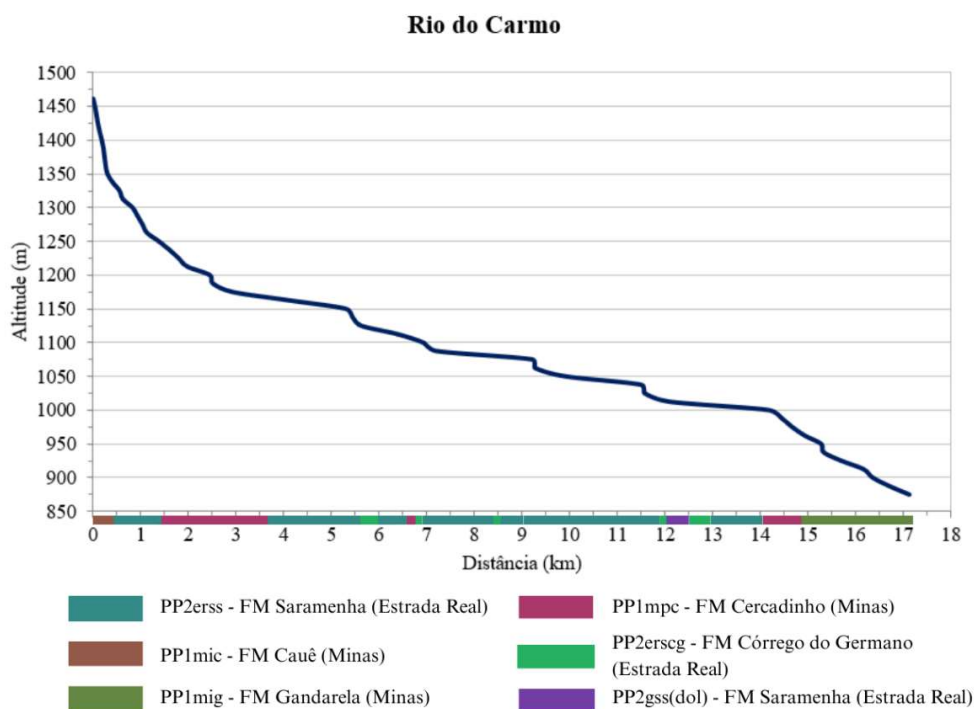


Fonte: UFOP (2019); IDE Sisema, ALOS Palsar (2025).

Essas alternâncias sucessivas, que reproduzem pequenas perdas e ganhos de declividade ao longo do traçado, resultam em um perfil longitudinal escalonado, típico de rios fortemente condicionados por níveis de base locais (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1964; HACK, 1957).

O Rio do Carmo (Figura 8) constitui o exemplo mais complexo e didático da região, atravessando sucessivamente as formações Saramenha, Cercadinho, Cauê, Córrego do Germano, Gandarela e retornando a trechos na Formação Saramenha. Esse mosaico litológico alterna setores de alta resistência e setores mais frágeis, condicionando forte variabilidade no traçado do canal. Nos domínios da Saramenha, predominam canais mais largos e sinuosos, com acentuada migração lateral e grande aporte de sedimentos em suspensão.

Figura 8 – Perfil longitudinal do Rio do Carmo



Fonte: UFOP (2019); IDE Sisema, ALOS Palsar (2025).

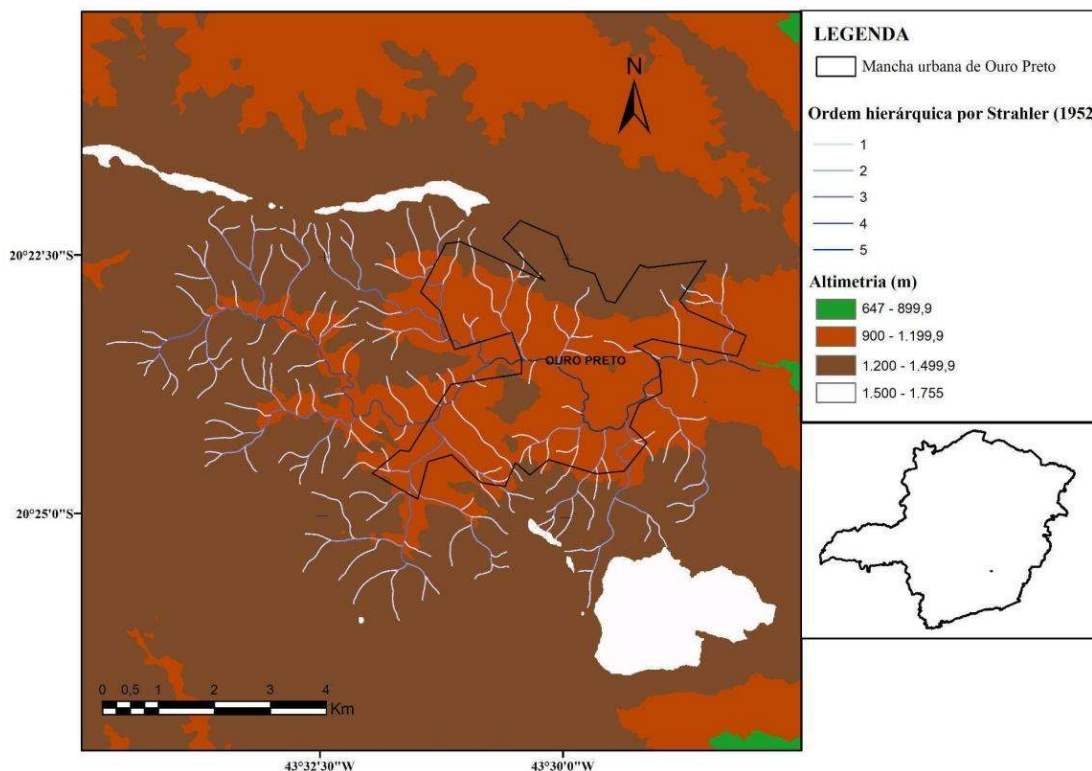
Ao cruzar a Formação Cercadinho, o comportamento torna-se misto: nos trechos quartzíticos, a resistência aumenta e surgem gargantas estreitas e corredeiras; já nas porções filíticas e xistosas, a erosão é facilitada e o canal volta a se alargar, suavizando a declividade. Nos segmentos da Formação Cauê e do Córrego do Germano, a resistência do substrato ferrífero restringe a mobilidade lateral, formando canais encaixados, com ocorrência de *pools* e degraus estruturais, que funcionam como

knickpoints persistentes e limitam a regressão erosiva a montante (HACK, 1957; SCHUMM, 1977).

Na unidade carbonática PP2gss(dol), os mármore dolomíticos introduzem um componente de dissolução química lento, mas contínuo, que complementa a erosão mecânica e favorece pequenas reentrâncias, zonas de infiltração e ajustes sutis no gradiente do canal (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1964). Por fim, nos trechos da Formação Gandarela, marcada pela predominância de itabiritos, a resistência é tão elevada que o leito se mantém fortemente confinado, com baixa migração lateral e declividades locais mais acentuadas, frequentemente organizadas em sequências de corredeiras intercaladas por remansos. O resultado integrado é um perfil longitudinal segmentado, com concavidade composta e forte controle estrutural, em perfeita concordância com a literatura clássica sobre a regulação de perfis fluviais por litologia e níveis de base locais (CHRISTOFOLETTI, 1980; SCHUMM, 1977).

A análise do mapa de altimetria da região (Figura 9) confirma que os padrões de relevo estão intimamente associados à resistência litológica. As maiores altitudes correspondem às formações Pico do Itacolomi (PP2eripi) e Moeda (PP1mcm), ambas compostas por quartzitos e metaconglomerados resistentes, responsáveis pela manutenção de cristas e morros-testemunho. Em contraste, as menores altitudes estão vinculadas às formações Saramenha e Cercadinho, constituídas por rochas mais frágeis (xistos, filitos e metagrauvas), que se degradam mais rapidamente, originando depressões e vales amplos (CHEREM, 2012; LIMA et al., 2021).

Figura 9 - Altimetria de Ouro Preto - MG



Fonte: ALOS PALSAR; IDE Sisema.

Portanto, a integração entre geologia e morfodinâmica fluvial demonstra que a variabilidade litológica é o principal fator de controle dos perfis longitudinais do Funil, Tripuí e Carmo. Enquanto as formações quartzíticas e ferríferas conferem estabilidade e promovem a formação de degraus e gargantas, as litologias mais frágeis favorecem a erosão lateral, a migração do canal e a alta carga de sedimentos. A presença de carbonatos acrescenta ainda um componente químico à dinâmica, ampliando a complexidade dos perfis. Essa interação litológica multiescalar explica a segmentação observada nos perfis fluviais e fundamenta a necessidade de análises integradas para gestão dos recursos hídricos e compreensão da evolução geomorfológica de Ouro Preto.

3.2 Análise morfométrica da bacia do rio Carmo em Ouro Preto

A análise detalhada das bacias hidrográficas Funil, Tripuí e do Carmo revela um intrincado sistema de drenagem composto por 189 canais, distribuídos em cinco ordens segundo método de Strahler (1952). A Bacia do Carmo, com 59,229 km², destaca-se por sua extensão territorial, abrangendo as Bacias Funil (7.022 km²) e Tripuí (30.226 km²). A Bacia Tripuí concentra o maior número de canais de 1ª ordem (81),

enquanto a Bacia Funil apresenta a menor densidade de nascentes (2,27). A Bacia do Carmo, por sua vez, detém o único canal de 5ª ordem.

A densidade de drenagem, indicador da quantidade de canais por unidade de área, revela a concentração da rede de drenagem em cada bacia, que “expressa a magnitude da rede hidrográfica, indicando sua capacidade de gerar novos cursos em função das características pedológicas, geológicas e climáticas da área” (CHRISTOFOLETTI 1969). A Bacia do Tripuí se destaca com o maior índice (2,63 canais/km²), seguida pela Bacia do Funil (2,59 canais/km²) e pela Bacia do Carmo (2,46 canais/km²). Essa distribuição reflete a maior quantidade de canais de 1ª ordem na Bacia do Tripuí. No que tange ao número de nascentes, a Bacia do Tripuí também se sobressai, com 81 nascentes, enquanto a Bacia do Funil possui 16 nascentes. A Bacia do Carmo, por sua vez, apresenta um total de 142 nascentes somando a montante.

A geologia da região de Ouro Preto, caracterizada por formações pertencentes ao Supergrupo Minas, com predomínio de rochas metamórficas como quartzitos, itabiritos, xistos e filitos, desempenha um papel fundamental na configuração e no comportamento das redes de drenagem das bacias analisadas (Cherem, 2012; Fonseca e Silva, 2014). A composição litológica e a estrutura das formações controlam a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, o padrão de escoamento superficial e a densidade de drenagem.

Nas áreas onde predominam rochas de baixa permeabilidade, como os itabiritos silicosos e filitos ferruginosos da Formação Cauê (PP1mic) e os xistos da Formação Saramenha (PP2erss), observa-se um aumento no escoamento superficial. Essas litologias, por apresentarem baixa capacidade de infiltração, favorecem a formação de redes de drenagem mais densas e ramificadas, como evidenciado na Bacia do Tripuí (Santos e Ribeiro, 2018). Esse comportamento ocorre porque a água esco preferencialmente pela superfície em vez de infiltrar no solo, intensificando a erosão e a formação de canais secundários (Christofoletti, 1980).

Em contrapartida, regiões compostas por rochas de maior permeabilidade, como os quartzitos da Formação Moeda (PP1mcm) e os mármore dolomíticos da Formação Cercadinho (PP1mpc(xt)), apresentam menor densidade de drenagem devido à infiltração da água no substrato rochoso (Fonseca e Silva, 2014). A porosidade e a estrutura cristalina dessas rochas permitem maior absorção de água, reduzindo o volume de escoamento superficial e, por conseqüência, limitando a formação de novos canais de drenagem (Lima et al., 2021).

Portanto, a relação entre a geologia e as redes de drenagem na região de Ouro Preto é diretamente influenciada pelas características litológicas e estruturais. Rochas impermeáveis favorecem uma drenagem mais densa e ramificada, enquanto litologias mais permeáveis resultam em uma rede de drenagem menos expressiva. Esse controle geológico sobre os processos hidrológicos é essencial para compreender a dinâmica das bacias hidrográficas locais e sua suscetibilidade a processos erosivos e inundações (Cherem, 2012; Santos e Ribeiro, 2018).

A análise morfométrica da Bacia do Funil, realizada a partir de dados calculados, fornece percepções sobre a forma e o desenvolvimento da rede de drenagem. A Relação de Bifurcação (R_b), que expressa a relação entre o número de canais de uma ordem e o número de canais da ordem imediatamente superior, foi calculada para cada ordem de canal na bacia. Os valores obtidos na bacia do Funil foram: 1ª ordem – 2,66; 2ª ordem – 3,0; e 3ª ordem – 2,0. Esses valores indicam que a bacia apresenta uma tendência à ramificação, com um aumento gradual no número de canais de ordens inferiores.

Na Bacia do Tripuí, a R_r evidencia uma rede de drenagem com forte tendência à ramificação, especialmente nas primeiras ordens. Os valores obtidos foram: 1ª ordem – 4,05; 2ª ordem – 5,0; e 3ª ordem – 4,0. Na Bacia do Carmo, a R_r também apresenta uma tendência à ramificação, com valores ligeiramente inferiores aos da Bacia do Tripuí. Os resultados obtidos foram: 1ª ordem – 3,94; 2ª ordem – 4,5; 3ª ordem – 4,0; e 4ª ordem – 2,0.

A relação entre as distâncias dos canais principais, segundo Horton (1945), evidencia padrões importantes sobre a conformidade e o desenvolvimento dos cursos d'água. Comparando a distância real e a distância vetorial dos canais analisados, observa-se que o Córrego do Funil possui uma extensão real de 4,868 km e vetorial de 4,03 km, enquanto a Bacia do Tripuí apresenta 9,492 km de extensão real e 5,540 km vetorial, e a Bacia do Carmo, 16,57 km real e 10,352 km vetorial. A diferença entre essas medidas reflete o grau de sinuosidade e complexidade da rede de drenagem, conforme descrito por Horton. No caso do Funil, a razão entre a distância real e vetorial é de 1,21, caracterizando um canal com baixa sinuosidade e percurso relativamente retilíneo. Já na Bacia do Tripuí, a razão de 1,71 indica um canal mais sinuoso, condicionado pelas características topográficas e geológicas da área. A Bacia do Carmo, por sua vez, apresenta uma razão de 1,60, sugerindo uma rede de drenagem mais

complexa, influenciada tanto pela sua maior extensão quanto pela convergência de bacias menores que a compõem.

A análise do Índice de Sinuosidade por Trecho (Is) revela padrões distintos ao longo dos cursos d'água das bacias do Funil, Tripuí e Carmo, refletindo a complexidade geomorfológica e a influência de fatores naturais e antrópicos na organização dos canais fluviais (Tabela 2). O índice mede o quão sinuoso é um trecho de rio, comparando a distância real percorrida pela água com a distância em linha reta entre os pontos inicial e final do trecho.

Tabela 2 - Índice de sinuosidade por trechos das bacias hidrográficas

| Is por trecho | Bacia do Funil | Bacia do Tripuí | Bacia do Carmo | Dv Funil | Dv Tripuí e Carmo | Resultado Funil | Resultado |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------|-------------------|-----------------|--------------|
| trecho 1 | 0,081 | 0,015 | 0,015 | 0,081204 | 0,014799 | 0,9974878085 | 1,013581999 |
| trecho 2 | 0,057 | 0,029 | 0,029 | 0,056861 | 0,029385 | 1,002444558 | 0,9868980773 |
| trecho 3 | 0,04 | 0,029 | 0,029 | 0,040027 | 0,029198 | 0,9993254553 | 0,9932187136 |
| trecho 4 | 0,042 | 0,027 | 0,027 | 0,042012 | 0,026814 | 0,9997143673 | 1,006936675 |
| trecho 5 | 0,053 | 0,059 | 0,059 | 0,053296 | 0,057684 | 0,9944461123 | 1,022813952 |
| trecho 6 | 0,039 | 0,034 | 0,034 | 0,038572 | 0,033785 | 1,011096132 | 1,006363771 |
| trecho 7 | 0,041 | 0,03 | 0,03 | 0,040922 | 0,029708 | 1,001906065 | 1,009829002 |
| trecho 8 | 0,069 | 0,042 | 0,042 | 0,069145 | 0,042095 | 0,9979029576 | 0,9977431999 |
| trecho 9 | 0,064 | 0,361 | 0,361 | 0,063393 | 0,275186 | 1,00957519 | 1,311839992 |
| trecho 10 | 0,063 | 0,051 | 0,051 | 0,06285 | 0,050066 | 1,002386635 | 1,018655375 |
| trecho 11 | 0,058 | 0,074 | 0,074 | 0,057839 | 0,073465 | 1,002783589 | 1,007282379 |
| trecho 12 | 0,537 | 0,171 | 0,171 | 0,51086 | 0,170732 | 1,051168618 | 1,001569712 |
| trecho 13 | 0,278 | 0,075 | 0,075 | 0,274685 | 0,074411 | 1,012068369 | 1,007915496 |
| trecho 14 | 0,312 | 0,403 | 0,403 | 0,291406 | 0,39292 | 1,07067116 | 1,025654077 |
| trecho 15 | 0,282 | 0,075 | 0,075 | 0,246889 | 0,074713 | 1,142213707 | 1,003841366 |
| trecho 16 | 0,043 | 0,299 | 0,299 | 0,042902 | 0,287619 | 1,002284276 | 1,039569709 |
| trecho 17 | 0,048 | 0,059 | 0,059 | 0,047213 | 0,059164 | 1,016669138 | 0,9972280441 |
| trecho 18 | 0,065 | 0,066 | 0,066 | 0,064697 | 0,065929 | 1,00468337 | 1,001076916 |
| trecho 19 | 0,06 | 0,34 | 0,34 | 0,060179 | 0,306133 | 0,9970255405 | 1,110628387 |
| trecho 20 | 0,037 | 0,826 | 0,826 | 0,036716 | 0,430978 | 1,007735047 | 1,916571147 |
| trecho 21 | 0,043 | 0,108 | 0,108 | 0,042846 | 0,095297 | 1,003594268 | 1,133299055 |
| trecho 22 | 0,051 | 1,263 | 1,263 | 0,050947 | 1,083379 | 1,001040297 | 1,165797011 |
| trecho 23 | 0,399 | 0,495 | 0,495 | 0,309302 | 0,401174 | 1,290001358 | 1,233878566 |

| | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|----------|----------|-------------|--------------|
| trecho 24 | 0,475 | 0,193 | 0,193 | 0,455403 | 0,12566 | 1,043032215 | 1,535890498 |
| trecho 25 | 0,542 | 0,703 | 0,703 | 0,483483 | 0,384161 | 1,121032177 | 1,829961917 |
| trecho 26 | 0,375 | 0,244 | 0,244 | 0,28596 | 0,239616 | 1,31137222 | 1,01829594 |
| trecho 27 | 0,713 | 1,74 | 1,74 | 0,513594 | 1,277449 | 1,388256093 | 1,362089602 |
| trecho 28 | x | 0,112 | 0,112 | x | 0,111893 | x | 1,000956271 |
| trecho 29 | x | 0,059 | 0,059 | x | 0,058871 | x | 1,002191232 |
| trecho 30 | x | 1,51 | 1,51 | x | 1,435447 | x | 1,051937132 |
| trecho 31 | x | x | 0,034 | x | 0,033745 | x | 1,007556675 |
| trecho 32 | x | x | 0,051 | x | 0,051098 | x | 0,9980821167 |
| trecho 33 | x | x | 0,439 | x | 0,378986 | x | 1,158354134 |
| trecho 34 | x | x | 0,018 | x | 0,018478 | x | 0,9741313995 |
| trecho 35 | x | x | 0,119 | x | 0,117265 | x | 1,014795549 |
| trecho 36 | x | x | 1,251 | x | 1,142996 | x | 1,094492019 |
| trecho 37 | x | x | 0,148 | x | 0,142904 | x | 1,035660303 |
| trecho 38 | x | x | 0,047 | x | 0,046983 | x | 1,000361833 |
| trecho 39 | x | x | 1,65 | x | 0,832368 | x | 1,982296292 |
| trecho 40 | x | x | 1,187 | x | 1,008277 | x | 1,177255853 |
| trecho 41 | x | x | 0,195 | x | 0,180434 | x | 1,080727579 |
| trecho 42 | x | x | 0,942 | x | 0,862874 | x | 1,091700526 |
| trecho 43 | x | x | 0,455 | x | 0,441342 | x | 1,030946522 |
| trecho 44 | x | x | 0,254 | x | 0,253483 | x | 1,002039585 |
| trecho 45 | x | x | 0,193 | x | 0,191891 | x | 1,005779323 |
| trecho 46 | x | x | 0,044 | x | 0,043567 | x | 1,009938715 |
| trecho 47 | x | x | 0,031 | x | 0,03057 | x | 1,014066078 |
| trecho 48 | x | x | 0,02 | x | 0,019618 | x | 1,019471914 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados mostram que a Bacia do Funil apresenta valores relativamente baixos de sinuosidade, com algumas variações pontuais, indicando que sua drenagem tende a ser mais eficiente e direta. Por outro lado, a Bacia do Tripuí e a Bacia do Carmo demonstram maior heterogeneidade nos valores, especialmente em certos trechos, o que sugere maior influência de barreiras naturais, controle estrutural do relevo ou processos erosivos.

A Bacia do Carmo, que integra os sistemas do Funil e do Tripuí somados a uma área adicional, exibe os maiores valores de sinuosidade em alguns trechos, como nos trechos 20, 25, 27, 30 e 39, onde I_s ultrapassa 1,5. Isso indica setores mais sinuosos, possivelmente associados a terrenos mais planos ou a interferências na drenagem natural, como ocupação urbana e deposição de sedimentos.

Já o Índice de compactidade (I_c), quantifica o grau de alongamento ou compactação de uma bacia, sendo que valores próximos de 0 indicam formas mais irregulares e assimétricas, geralmente associadas a maior suscetibilidade à erosão e inundações. Os resultados demonstram que a Bacia do Funil, com um I_c de 0,1519, apresenta um formato ligeiramente mais compacto em comparação às bacias do Tripuí (0,1081) e do Carmo (0,1065). Isso sugere que o Funil possui uma forma menos alongada e mais regular, o que pode favorecer um escoamento superficial relativamente mais eficiente e tempos de concentração menores. Em contrapartida, as bacias do Tripuí e do Carmo possuem valores de I_c mais baixos, indicando formas mais irregulares e alongadas, características que podem resultar em fluxos de água menos uniformes, com maior dispersão do escoamento e potencial para formação de áreas sujeitas à erosão diferencial.

O Coeficiente de Manutenção (C_m) reflete a relação entre a área da bacia e o comprimento total dos canais fluviais, sendo um indicador da densidade de drenagem e da eficiência do escoamento superficial. Valores mais baixos sugerem uma maior densidade de drenagem, indicando uma rede hidrográfica mais ramificada e eficiente na captação das águas pluviais, enquanto valores mais altos apontam para uma drenagem mais espaçada, onde o escoamento superficial percorre distâncias maiores antes de alcançar um curso d'água.

Os valores obtidos para as bacias urbanas de Ouro Preto são 0,3854 para o Funil, 0,3802 para o Tripuí e 0,4066 para o Carmo. Como a Bacia do Carmo é composta pela soma das bacias do Funil e do Tripuí, acrescida de uma área adicional, seu maior coeficiente pode indicar que essa nova área possui uma menor densidade de drenagem em comparação com as bacias individuais. Esse fator sugere que, apesar da soma dos sistemas de drenagem, a rede hidrográfica do Carmo apresenta setores mais espaçados, possivelmente devido a variações no relevo e na distribuição dos canais menores.

Ao analisar o comportamento hidrológico dessas bacias, percebe-se que o Funil e o Tripuí apresentam coeficientes bastante próximos, sugerindo características semelhantes na organização da drenagem. Essas bacias possuem redes mais estruturadas

e eficientes na captação do escoamento superficial, o que pode resultar em tempos de concentração menores e respostas hidrológicas mais rápidas, especialmente em eventos de precipitação intensa. Já a Bacia do Carmo, ao incorporar áreas com menor densidade de drenagem, pode apresentar trechos onde o escoamento é menos direcionado, aumentando o tempo de escoamento superficial e influenciando a distribuição dos fluxos ao longo da rede.

3.3 Avaliação da qualidade da água

Os resultados obtidos através das amostras coletadas revelaram variações expressivas entre os pontos amostrados (Tabela 3 – Figura 10). No que se refere à turbidez, parâmetro diretamente relacionado à presença de partículas suspensas, observou-se uma discrepância marcante conforme observado na Imagem 3. O Ponto 1 apresentou o menor valor (2,19 NTU), indicando condições de elevada clareza visual e baixa influência de fontes externas de poluição, sugerindo ainda um estado de relativa preservação. Em contrapartida, os Pontos 2 (83,9 NTU) e 3 (66,4 NTU) registraram valores significativamente superiores.

Tabela 3 – Resultados dos parâmetros de qualidade da água por ponto de coleta.

| Ponto de coleta | Turbidez (NTU) | pH | Temperatura (°C) | Condutividade elétrica (µS/cm) | Coliformes totais (UFC/100ml) | Coliformes E. Coli (UFC/100ml) |
|-----------------|----------------|-----|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2,19 | 7,1 | 19 | 51 | 4.080 | 2.400 |
| 2 | 83,9 | 7,5 | 19.2 | 108 | 16.320 | 11.520 |
| 3 | 66,4 | 8,8 | 20.1 | 163 | 16.720 | 11.120 |
| 4 | 50,3 | 7,9 | 21.7 | 160 | 26.560 | 15.040 |

Figura 10 - Variação da turbidez nas amostras de água. Da esquerda para a direita: Ponto 2 (elevada turbidez) e Ponto 1 (baixa turbidez), evidenciando o carreamento de material particulado ao longo do gradiente urbano.



Fonte: Arquivo pessoal

No primeiro ponto, a proximidade com a rodovia e um posto de combustíveis sugere a contribuição de escoamento superficial urbano, aliado à possível presença de resíduos oleosos (Figura 11), enquanto no terceiro a principal influência é atribuída ao lançamento direto de efluentes domésticos. O Ponto 4, com valor intermediário (50,3 NTU), reflete sobretudo a condição de acúmulo, recebendo sedimentos e poluentes transportados ao longo do curso fluvial, atuando como zona de confluência de cargas poluidoras advindas de montante.

Figura 11 - Ponto 2 - Saramenha



Fonte: Arquivo pessoal.

A análise da condutividade elétrica reforçou o contraste entre os trechos relativamente preservados e aqueles sujeitos a maior impacto. O menor valor foi registrado no Ponto 1 (51 $\mu\text{S}/\text{cm}$), evidenciando baixa concentração de íons dissolvidos e, portanto, menor grau de alteração antrópica. Por outro lado, os Pontos 3 (163 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e 4 (160 $\mu\text{S}/\text{cm}$) apresentaram condutividades significativamente superiores, refletindo a influência de substâncias dissolvidas associadas ao despejo de esgoto doméstico e, possivelmente, de efluentes industriais.

Em relação ao pH, o Ponto 1 (Figura 12) destacou-se novamente por apresentar valor próximo à neutralidade (7,1), condição considerada adequada para a manutenção da biodiversidade aquática. O Ponto 3, entretanto, registrou pH alcalino (8,8), resultado provavelmente associado à decomposição de matéria orgânica e ao descarte de substâncias provenientes de saneamento precário. Os Pontos 2 (7,5) e 4 (7,9) apresentaram valores ligeiramente alcalinos, que, embora indiquem certo desequilíbrio, sugerem alterações menos intensas em comparação ao Ponto 3.

Figura 12 - Ponto 1 - Loteamento Jacobas



Fonte: Arquivo pessoal.

A avaliação microbiológica revelou-se crucial para a identificação dos níveis de contaminação fecal. O Ponto 1 apresentou o menor índice de *Escherichia coli* (2.400 UFC/100ml), o que, embora não represente ausência de poluição, evidencia menor exposição a fontes intensivas de contaminação e/ou maior capacidade de

autodepuração nesse trecho do rio. Em contraste, os Pontos 2 (11.520 UFC/100ml) e 3 (11.120 UFC/100ml) revelaram níveis bastante elevados, configurando áreas de risco sanitário. As prováveis origens, entretanto, diferem: enquanto o Ponto 2 é impactado por poluentes difusos provenientes do escoamento superficial urbano e do tráfego viário, o Ponto 3 sofre influência direta do lançamento de esgoto doméstico próximo à estação ferroviária. O Ponto 4 apresentou os valores mais alarmantes de *E. coli* (15.040 UFC/100 ml) e coliformes totais (26.560 IF/100ml), representando o trecho mais crítico da bacia. Tal resultado decorre de sua posição a jusante, onde se acumulam os impactos provenientes de diferentes fontes de poluição ao longo do curso d'água, consolidando-se como área de síntese da degradação ambiental regional.

3.4 Qualidade ambiental na bacia hidrográfica do rio do Carmo na sede de Ouro Preto

A análise integrada dos resultados permite constatar que a bacia hidrográfica em questão apresenta elevada heterogeneidade quanto à qualidade da água, variando entre trechos relativamente preservados, como o Ponto 1, e áreas de forte degradação, como o Ponto 4 (Figura 13). Essa condição evidencia tanto o impacto direto das atividades humanas em pontos específicos, como no caso do esgoto lançado no Ponto 3, quanto o efeito cumulativo da poluição, observado de maneira mais expressiva no Ponto 4. Destaca-se ainda a relevância dos parâmetros físico-químicos, sobretudo turbidez e condutividade elétrica, como indicadores eficazes para alterações ambientais, embora a contagem de *E. coli* se configure como o marcador mais robusto de contaminação fecal e risco sanitário.

Figura 13 - Ponto 4 - Rio do Carmo – água com turbidez visivelmente elevada.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os valores elevados de coliformes registrados em três dos quatro pontos investigados evidenciam que a água não atende aos padrões de potabilidade e representa risco à saúde pública, seja para o consumo direto, seja para atividades recreacionais de contato primário. Esse cenário reforça a urgência de medidas voltadas ao saneamento básico, ao tratamento de efluentes e ao controle das fontes difusas de poluição. Paralelamente, ressalta-se a importância de preservar áreas de menor impacto, como o Ponto 1, que pode servir como referência para a manutenção da biodiversidade e da qualidade ambiental.

Em suma, os resultados do estudo de campo demonstram de forma inequívoca que a bacia hidrográfica analisada exibe uma elevada heterogeneidade em sua qualidade da água, refletindo um gradiente de impacto que vai de trechos relativamente preservados, como o Ponto 1, a áreas de forte degradação, como o Ponto 4. A análise integrada de parâmetros físico-químicos e microbiológicos evidenciou tanto o impacto direto de fontes de poluição em pontos específicos, como o esgoto no Ponto 3, quanto o efeito cumulativo de cargas poluidoras ao longo do curso fluvial, observado de maneira mais expressiva no Ponto 4.

Os níveis de coliformes fecais em três dos quatro pontos investigados superaram significativamente os padrões de potabilidade, configurando um risco sanitário iminente. Este cenário reforça a urgência de medidas de saneamento básico e tratamento de efluentes, bem como a necessidade de controle de fontes difusas de poluição. A preservação de áreas de menor impacto, como o Ponto 1, é crucial para a manutenção

da biodiversidade e pode servir de referência para futuras ações de recuperação e gestão ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos rios Funil, Tripuí e do Carmo demonstra que a dinâmica fluvial na região de Ouro Preto é fortemente condicionada pela geologia local, evidenciando o afastamento do perfil de equilíbrio clássico descrito por Christofletti (1980). Em todos os cursos estudados, a presença de *knickpoints*, rupturas de declividade e perfis segmentados indica a atuação de níveis de base locais controlados pela variação litológica. Assim, o traçado longitudinal dos canais não reflete apenas processos autônomos de erosão e deposição, mas sim uma complexa interação entre substrato, tectônica e ocupação antrópica, corroborando interpretações já apontadas por Hack (1957), Leopold, Wolman e Miller (1964) e Schumm (1977).

O Córrego do Funil, condicionado pelas formações Saramenha e Cercadinho, apresenta alternâncias marcantes entre trechos de alta instabilidade — onde predominam xistos e filitos mais suscetíveis à erosão — e segmentos controlados por quartzitos resistentes, nos quais o leito se estreita e ocorrem gargantas e corredeiras. O Córrego do Tripuí, ao atravessar as formações Saramenha, Cercadinho, Cauê e Córrego do Germano, exhibe um perfil ainda mais heterogêneo, em que a alternância litológica gera uma sucessão de trechos encaixados e estáveis intercalados por trechos mais largos, sinuosos e de maior turbidez. O Rio do Carmo, por sua vez, sintetiza a complexidade regional: seu perfil longitudinal reflete a sobreposição de seis formações geológicas distintas, combinando setores fortemente resistentes, como Gandarela e Cauê, a domínios frágeis, como Saramenha e porções filíticas da Cercadinho. O resultado é um canal de elevada variabilidade morfológica, com concavidade composta e segmentada, onde se combinam processos de erosão mecânica, dissolução química e controle estrutural.

Do ponto de vista hidroquímico e microbiológico, os resultados revelaram uma condição de forte contraste entre trechos relativamente preservados e setores impactados pela urbanização. Enquanto o Ponto 1, localizado em área de menor interferência, apresentou baixos valores de turbidez, condutividade e coliformes, os Pontos 2, 3 e 4 registraram índices alarmantes de contaminação fecal e de partículas em suspensão, evidenciando a degradação provocada pelo lançamento de efluentes domésticos e pela presença de poluentes difusos associados ao escoamento superficial urbano. Esse quadro não apenas compromete a qualidade ambiental dos cursos d'água,

mas também configura risco direto à saúde pública, reforçando a necessidade urgente de políticas de saneamento básico e controle de poluição difusa.

A análise morfométrica confirmou a heterogeneidade litológica. A Bacia do Tripuí, com maior densidade de drenagem e número de canais de 1ª ordem, revela maior suscetibilidade a processos erosivos superficiais, enquanto a Bacia do Funil, mais compacta, apresenta escoamento relativamente mais eficiente. Já a Bacia do Carmo, que integra os sistemas anteriores e acrescenta área adicional, reflete maior complexidade, abrigando o único canal de 5ª ordem e exibindo elevados índices de sinuosidade em determinados trechos, o que sugere maior controle estrutural e influência antrópica na organização da rede hidrográfica.

Em síntese, o presente estudo demonstra que os rios Funil, Tripuí e Carmo não podem ser compreendidos isoladamente a partir do modelo teórico de perfis de equilíbrio, mas sim como sistemas complexos e dinâmicos, moldados pela interação entre litologia, tectônica e ação antrópica. A variação litológica multiescalar — envolvendo desde quartzitos e itabiritos altamente resistentes até xistos e filitos frágeis — constitui o principal fator de controle, ao qual se somam os impactos do uso e ocupação do solo, particularmente na bacia do Carmo, que sintetiza e acumula as pressões ambientais a jusante.

Assim, conclui-se que a gestão ambiental dos recursos hídricos de Ouro Preto deve necessariamente integrar a perspectiva geológico-geomorfológica às análises de qualidade da água, reconhecendo a interdependência entre substrato rochoso, dinâmica fluvial e impactos antrópicos. Somente a partir dessa abordagem sistêmica será possível compreender os processos de evolução das bacias hidrográficas e estabelecer estratégias de conservação e recuperação eficazes, que assegurem tanto a sustentabilidade ambiental quanto a qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Brazil: An Example of Tectonic Inversion. *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 119-129, 1998.
- BARRETO, R. F.; MORAES, L. R. S. Definição de indicadores de sustentabilidade ambiental aplicados a rios urbanos com o uso do método Delphi. *Revista Gestão & Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 224-249, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/25261>. Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEREM, L. F. S. Análise morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG. 2008. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-7KWLTH>. Acesso em: 24 fev. 2024.
- CHEREM, L. F. S. Geologia e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: uma abordagem sobre a degradação e a valorização do patrimônio geológico. *Caderno de Geografia*, v. 22, n. 39, p. 25-42, 2012.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. *Notícia Geomorfológica*. Campinas/SP, v. 9, n. 18, p. 35-64, 1969.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2. ed. São Paulo: Blücher, 1980.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Editora Blücher, 1981.
- FERREIRA, L. J. *Mina Du Veloso: História e memória da mineração subterrânea em Ouro Preto*. Ouro Preto: UFOP, 2017.
- FONSECA, F. P.; SILVA, A. P. Mapeamento geológico e caracterização litológica do Supergrupo Minas em Ouro Preto – MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 44, n. 2, p. 189-205, 2014.
- HACK, J. T. *Studies of Longitudinal Stream Profiles in Virginia and Maryland*. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1957. (Professional Paper 294-B).

HOUGH, M. Cities and natural process: a basis for sustainability. 2. ed. London: Routledge, 2004. 306 p.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco: W. H. Freeman, 1964.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 524 p.

LIMA DOS SANTOS, L.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, V.; OLIVEIRA DIODATO, J. Morphometry of the Hydrographic Basins Inserted in the Urban Area of Dourados – MS – Brazil. RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise, v. 46, n. 3, p. 75–87, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/67039>. Acesso em: 27 mar. 2025.

LIMA, R. C. et al. Análise da suscetibilidade a movimentos de massa em Ouro Preto, MG: uma abordagem integrada. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 22, n. 2, p. 255-272, 2021.

LIMA, V. F.; RIBEIRO, V. O. Morfometria de Bacia Hidrográfica Urbanizada: Uma análise do Rio Iguaçu-Sarapuí, na Baixada Fluminense (RJ), para avaliação de parâmetros de suscetibilidade à ocorrência de enchente e inundação. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 3, p. 1012-1028, 2021. Disponível em: <https://www.revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/download/195/157/>. Acesso em: 19 mar. 2025.

LINSTONE, H. A.; TUROFF, M. The Delphi Method: Techniques and Applications. Boston: Addison-Wesley, 2002.

NETTO, A. L. C. A interface florestal-urbana e os desastres naturais relacionados à água no maciço da Tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental. Revista do Departamento de Geografia, v. 16, p. 46-60, 2005.

NETTO, A. L. C. Eventos extremos e vulnerabilidade socioambiental: um olhar geográfico sobre a erosão e a ocupação urbana. In: COELHO NETTO, A. L. (Org.). Geocologia das Águas: subsídios à gestão ambiental de bacias hidrográficas. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 275-308.

NETTO, A. P. Participação comunitária na gestão ambiental urbana: desafios e perspectivas. *Revista de Geografia*, v. 29, n. 1, p. 45-59, 2012.

OLIVEIRA, M. C.; FREITAS, F. S. Gestão de recursos hídricos urbanos: desafios em cidades médias brasileiras. *Cadernos de Geografia*, v. 26, n. 45, p. 88-102, 2016.

OURO PRETO. Plano Municipal de Saneamento Básico – Produto 2: Diagnóstico da Situação do Saneamento Básico. Ouro Preto: Prefeitura Municipal de Ouro Preto, 2012. Disponível em: <https://www.ouropreto.mg.gov.br/transparencia/pmsop>. Acesso em: 4 fev. 2025.

OURO PRETO. Plano Municipal de Saneamento Básico. Ouro Preto: Prefeitura Municipal de Ouro Preto, 2015.

RAMOS, T. C.; FONSECA FILHO, R. E.; SILVA, J. R. A percepção da paisagem turística de Ouro Preto/MG. *CULTUR, Ilhéus*, v. 18, n. 2, 2024. Disponível em: <http://periodicos.uesc.br/>. Acesso em: 4 fev. 2025.

SANTOS, E. S.; RIBEIRO, S. A. G. Geologia e Petrografia das Rochas Metassupracrustais do Grupo Itacolomi na Serra do Itacolomi, Ouro Preto (MG). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 48, n. 4, p. 574-593, 2018.

SCHUMM, S. A. *The Fluvial System*. New York: John Wiley & Sons, 1977.

SILVA, A. J. et al. Monitoramento da qualidade da água em bacias urbanas: aplicação de índices de conformidade e kits de análise rápida. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 18, p. 145-158, 2021.

SILVA, R. A.; ALMEIDA, M. C. Análise morfométrica e pressão urbana: um estudo de caso sobre a degradação de recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 2, 2020.

SOUZA, L.; SANTOS, F. Geoprocessamento aplicado ao zoneamento ambiental em áreas de mineração e patrimônio. *Journal of Environmental Analysis*, v. 15, 2022.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

TEIXEIRA, H.; MILLAN, R. Impactos ambientais da urbanização em curso d'água: diagnóstico da qualidade de água do Córrego Vertente Grande, Frutal-MG. *Revista de Geografia Acadêmica*, v. 18, n. 1, p. 69-93, 2024.

TEIXEIRA, L.; MILLAN, G. Impactos da urbanização sobre os corpos hídricos urbanos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 1, p. 55-73, 2024.

TOLENTINO, M.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B. Estudo de bacias hidrográficas. *Revista da Escola de Engenharia de São Carlos*, v. 14, p. 61-92, 1968.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, ago. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/6Z9G6f4H8yP8v8L8X9G/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

TUCCI, C. E. M. (org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013. 952 p.

TUNDISI, J. G. *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005. 248 p.

VASCONCELOS, M. C.; ALMEIDA, J. C. Aplicações do Método Delphi na gestão ambiental: uma revisão crítica. *Cadernos de Pesquisa*, v. 41, n. 144, p. 202-220, 2011.

LIMA, R. C. et al. Análise da suscetibilidade a movimentos de massa em Ouro Preto, MG: uma abordagem integrada. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 2, p. 255-272, 2021.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (Org.). *Geomorfologia Urbana*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.

Alkmim e Marshak (1998): Referência principal para a geologia estrutural da região (Cráton São Francisco/Quadrilátero Ferrífero).

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo: 2015-2016 – Relatório Técnico*. São Paulo: CETESB, 2016.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. (Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 1).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Estabelece a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 053, p. 58-63, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

OLIVEIRA, Isabela Maria de. Avaliação da atividade minerária de topázio imperial na bacia hidrográfica do ribeirão Tripuí, Ouro Preto, MG. 2011. (Monografia/Dissertação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.