



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



PEDRO AURÉLIO DE SOUSA BARBOSA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE POTENCIALIDADE
EROSIVA EM EXUTÓRIOS DE REDES DE DRENAGEM
PLUVIAL**

Uberlândia, setembro de 2025

PEDRO AURÉLIO DE SOUSA BARBOSA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE POTENCIALIDADE
EROSIVA EM EXUTÓRIOS DE REDES DE DRENAGEM
PLUVIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Márcio Ricardo Salla

Coorientador: Prof. Dr. Marcio A. R. Schmidt

Uberlândia, setembro de 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B238a
2025 Barbosa, Pedro Aurélio de Sousa, 1995-
 Análise multicritério de potencialidade erosiva em exutórios de redes
 de drenagem pluvial [recurso eletrônico] / Pedro Aurélio de Sousa
 Barbosa. - 2025.

Orientador: Márcio Ricardo Salla.

Coorientador: Márcio Augusto Reolon Schmidt.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5575>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia Civil. 2. Saneamento. 3. Drenagem. 4. Águas residuais.
I. Salla, Márcio Ricardo, 1976-, (Orient.). II. Schmidt, Márcio Augusto
Reolon, 1978-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 323, PPGEC				
Data:	29 de agosto de 2025	Hora de início:	14h00min	Hora de encerramento:	17h10min
Matrícula do Discente:	12312ECV019				
Nome do Discente:	Pedro Aurélio de Sousa Barbosa				
Título do Trabalho:	Análise Multicritério de Potencialidade Erosiva em Exutório de Redes de Drenagem Pluvial				
Área de concentração:	Análise Espacial, Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Engenharia Urbana				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Infraestrutura Urbana				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência e na Sala de Reuniões, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Stênio de Sousa Venâncio - UFTM, Carlos Eugenio Pereira - UFU e Marcio Ricardo Salla, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Marcio Ricardo Salla, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 17:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eugênio Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **STÊNIO DE SOUSA VENÂNCIO, Usuário Externo**, em 29/08/2025, às 17:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6632554** e o código CRC **EF1D9FA6**.

Referência: Processo nº 23117.059739/2025-82

SEI nº 6632554

*“Insanidade é continuar
fazendo sempre a mesma coisa
e esperar resultados diferentes”*
- Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço sempre e em primeiro lugar a Deus, que me acompanhou ao longo dessa jornada árdua. Quando Ele está à frente, até os momentos difíceis se tornam aprendizados.

Agradeço a minha esposa Alessandra, que além de minha companheira de vida, se tornou também minha companheira na jornada do mestrado, me mostrando um verdadeiro exemplo de disciplina e dedicação. Seu incentivo diário foi sem dúvidas peça chave para conclusão deste trabalho. Agradeço também ao meu filho, que ainda no ventre de sua mãe, foi inspiração para conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Altair e Delma, que desde os meus primeiros passos fizeram de tudo pela minha educação. Cada vitória e cada conquista são frutos do esforço e do amor que depositaram em mim.

Agradeço aos meus irmãos Bruno e Vítor, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, e a minha sobrinha Giovana que sempre me faz perceber que um pouco de bagunça, umas boas risadas e muito amor podem facilitar qualquer jornada.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia, que me acolheu durante a graduação e me permitiu ir além com o mestrado. Agradeço ao meu orientador Márcio Salla, pela paciência e aprendizados ao longo da orientação do mestrado.

Agradeço ainda ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia/MG, hoje minha segunda casa, que me permite vivenciar e explorar diariamente o mundo da engenharia através do saneamento.

RESUMO

A análise da literatura sobre saneamento mostra que estudos sobre drenagem pluvial são mais esparsos quando comparados aos voltados à análise dos sistemas de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário e limpeza/manejo dos resíduos sólidos. Não obstante, o Brasil sofre anualmente com as enchentes e inundações nos centros urbanos, que além de prejuízos financeiros, acarretam sérios impactos sociais, ambientais e de saúde pública, demonstrando a necessidade de estudos e investimentos no setor. Considerando ainda a necessidade de conservação dos corpos hídricos, este estudo está alinhado às atuais demandas por melhoria no planejamento urbano, em especial das infraestruturas de saneamento. Desse modo, o trabalho desenvolvido tem como proposta principal criar um método de análise de potencialidade das erosões de origem pluvial, mais especificamente daquelas oriundas de redes de drenagem sem dissipação de energia. Para isso, inicialmente são apresentadas algumas concepções de drenagem pluvial, além de um diagnóstico dos problemas relacionados a esta infraestrutura. Já na metodologia, propõe-se a associação de quatro fatores relacionados ao crescimento das erosões: a vazão escoada pela rede, o tipo de solo em que se localiza o lançamento, a diferença de cota entre lançamento e corpo hídrico e o tempo desde o surgimento da erosão. Ao final, a análise multicritérios desenvolvida apresentou resultados satisfatórios, com valores de Coeficiente de Correlação de Pearson superiores a 0,90, indicando uma correlação muito forte entre os valores obtidos pelo método e os observados em campo. Para estes cenários, foi possível identificar que o crescimento das erosões é influenciado principalmente pela vazão escoada na rede de drenagem e a diferença de cota entre o ponto de lançamento e o corpo receptor.

Palavras-chave: Saneamento – drenagem pluvial – erosão – sistemas de informação geográfica – análise multicritério

ABSTRACT

The analysis of the literature on sanitation shows that studies on stormwater drainage are less frequent when compared to those focused on the analysis of drinking water supply systems, sewage systems and solid waste management. Despite this, Brazil suffers annually from floods in urban centers, which in addition to financial losses, cause serious social, environmental and public health impacts, demonstrating the need for studies and investments in the sector. Also considering the need to conserve water bodies, this study is aligned with the current demands for improvements in urban planning, especially in sanitation infrastructure. Thus, the main proposal of the work developed is to create a method for analyzing the potential for erosion caused by stormwater, more specifically that originating from drainage networks without energy dissipation. To this end, some concepts of stormwater drainage are initially presented, in addition to a diagnosis of the problems related to this infrastructure. The methodology proposes the association of four factors related to erosion growth: the flow rate drained by the network, the type of soil in which the discharge is located, the difference in elevation between the discharge and the water body, and the time since the erosion began. In the end, the multicriteria analysis developed presented satisfactory results, with Pearson Correlation Coefficient values greater than 0.90, indicating a very strong correlation between the values obtained by the method and those observed in the field. For these scenarios, it was possible to identify that erosion growth is mainly influenced by the flow rate drained by the drainage network and the difference in elevation between the discharge point and the receiving body.

Keywords: Sanitation – storm drainage – erosion – geographic information systems – multicriteria analysis

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MUNICÍPIOS DE MG CLASSIFICADOS QUANTO A IMPLEMENTAÇÃO DE PDDMAPU..	19
FIGURA 2 - BOCA DE LOBO DUPLA COM GRELHA (GRADE).....	21
FIGURA 3 - BOCA DE LOBO COM GRADE (A) E COM ABERTURA NA GUIA (B).....	21
FIGURA 4 - BUEIRO INTELIGENTE	22
FIGURA 5 - DISPOSITIVO DE CAPTAÇÃO TIPO “GRELHÃO”	22
FIGURA 6 - CP/PV AINDA SEM TAMPA RECEBENDO INTERLIGAÇÃO DOS RAMAIS PLUVIAIS	23
FIGURA 7 - DIFERENCIAÇÃO FINAL NA EXECUÇÃO DE CP (A) E PV (B)	24
FIGURA 8 - ENCAIXES DOS TUBOS TIPO MACHO-FÊMEA (A) E PONTA E BOLSA (B).....	24
FIGURA 9 - TUBOS DE CONCRETO DE DN 400 MM(A) E DE 1500 MM(B).....	25
FIGURA 10 - TUBOS DE PEAD DE DN 1500 MM COM 6 METROS DE COMPRIMENTO	26
FIGURA 11 - DISSIPADOR TIPO ESCADA HIDRÁULICA	29
FIGURA 12 - ESCADA HIDRÁULICA CONJUGADA COM TAPETE DE ENROCAMENTO	29
FIGURA 13 - ESCADAS HIDRÁULICAS COM ANTEPAROS	30
FIGURA 14 - ESCADA HIDRÁULICA COM DEFLETORES	31
FIGURA 15 - DISSIPADOR TIPO ESCADA EM GABIÃO	31
FIGURA 16 - DISSIPADOR TIPO BLOCO DE IMPACTO COM BLOCOS DEFLETORES A JUSANTE	32
FIGURA 17 - CANAL DE VERTIMENTO/DISSIPADOR DE SOLEIRA	33
FIGURA 18 - DISSIPADOR DE SOLEIRA COM CANAL CHEIO E VERTENDO A ÁGUA	34
FIGURA 19 - COMBINAÇÃO DE DIFERENTES FORMAS DE DISSIPAÇÃO.....	34
FIGURA 20 - BOLSÕES DE DRENAGEM PLUVIAL	36
FIGURA 21 - BOCAS DE LOBO COM EXCESSO DE RESÍDUOS DOMÉSTICOS.....	37
FIGURA 22 - EXISTÊNCIA DE INTERLIGAÇÃO DE ESGOTO EM REDES DE DRENAGEM	39
FIGURA 23 - CLASSIFICAÇÃO DAS EROSÕES	40
FIGURA 24 - EROSÃO EM DISSIPADOR PLUVIAL.....	41
FIGURA 25 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS NO PERÍMETRO URBANO DE UBERLÂNDIA/MG	42
FIGURA 26 – MODELO HIERÁRQUICO DA AHP	49
FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DA ÁLGEBRA DE MAPAS.....	49
FIGURA 28 – REFLETÂNCIA DE CADA ALVO PELO COMPRIMENTO DE ONDA	51
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DA ÁLGEBRA DE MAPAS.....	54
FIGURA 30 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE EROSÃO DENTRO DO PERÍMETRO URBANO DE UBERLÂNDIA (MG)	56
FIGURA 31 – IMAGEM DE SATÉLITE DAS EROSÕES CRÍTICAS NOS PONTOS 01 A 08.....	57
FIGURA 32 – EROSÕES NOS PONTOS 01, 02, 03 E 04.....	58
FIGURA 33 – EROSÕES NOS PONTOS 05, 06, 07 E 08.....	59
FIGURA 34 – FATORES RELACIONADOS A POTENCIALIDADE EROSIVA	62
FIGURA 35 – ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO JDBOT2.....	64

FIGURA 36 – MAPAS NDBI E NDWI PARA REGIÃO DO PARQUE DO SABIÁ.....	66
FIGURA 37 – MAPA RECLASSIFICADO PARA A REGIÃO DO PARQUE DO SABIÁ – UBERLÂNDIA/MG.....	67
FIGURA 38 – LOCAL ONDE FOI RETIRADA A AMOSTRA DO SOLO DO PONTO 08	73
FIGURA 39 – SOLOS COM COAGULANTE (A) E ETAPA DE SEDIMENTAÇÃO (B).....	74
FIGURA 40 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA O SOLO DO PONTO 06 (JDHOLANDA1).....	75
FIGURA 41 – TRIÂNGULO TEXTURAL	76
FIGURA 42 – INTERFACE DA FERRAMENTA PARA CLASSIFICAÇÃO DO PONTO BALAIADAS NO TRIÂNGULO TEXTURAL	78
FIGURA 43 – DEMARCAÇÃO DOS PONTOS PARA CÁLCULO DA DIFERENÇA DE COTA	81
FIGURA 44 - EVOLUÇÃO DE EROSÃO NA ZONA NORTE DE UBERLÂNDIA ENTRE 2016 E 2024.....	82
FIGURA 45 – SINTETIZAÇÃO DA RELAÇÃO OBTIDA	85
FIGURA 46 – DESNÍVEL AO LONGO DA SOLEIRA.....	88
FIGURA 47 – EROSÃO SOB A SOLEIRA.....	88
FIGURA 48 – CANAL VERTEDOR COM GRANDE VOLUME DE TERRA ACUMULADA.....	89
FIGURA 49 – DRENO ENTUPIDO.....	90
FIGURA 50 – CANAL COM VOLUME DE ESGOTO	90
FIGURA 51 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO DO GRAU DE EROSÃO COM CADA FATOR SEPARADO	92
FIGURA 52 – GRÁFICO DE DISPERSÃO PARA O CENÁRIO 1.....	94
FIGURA 53 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO PARA OS CENÁRIO 2 E 3	96
FIGURA 54 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO PARA OS CENÁRIO 4 A 9	98
FIGURA 55 – RECORTE DO EXCEL UTILIZADO PARA ELABORAÇÃO DAS ANÁLISES	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RELAÇÃO CAUSA-EFEITO ENTRE URBANIZAÇÃO E INUNDAÇÃO	36
TABELA 2 – IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE EROSÃO COLETADOS	55
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS.....	60
TABELA 4 – DIVISÃO DE ÁREAS PARA CADA BACIA	68
TABELA 5 – VALOR MÉDIO DO COEFICIENTE DE <i>RUN-OFF</i> POR BACIA	69
TABELA 6 – CATEGORIZAÇÃO DO FATOR “REDE”	72
TABELA 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA O FATOR “REDE”	72
TABELA 8 – RESUMO DA GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS.....	74
TABELA 9 – RELAÇÃO ENTRE CLASSE TEXTURAL E PERMEABILIDADE DO SOLO.....	76
TABELA 10 – CATEGORIZAÇÃO DO FATOR “SOLO”	79
TABELA 11 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA O FATOR “SOLO”	79
TABELA 12 – CATEGORIZAÇÃO DO FATOR “TOPOGRÁFICO”	81
TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA O FATOR “TOPOGRÁFICO”	81
TABELA 14 – CATEGORIZAÇÃO DO FATOR “TEMPORAL”	83
TABELA 15 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA O FATOR “TEMPORAL”	83
TABELA 16 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS PARA OS 4 FATORES.....	84
TABELA 17 – CLASSIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE PEARSON	86
TABELA 18 – POTENCIALIDADE EROSIVA PARA O CENÁRIO 1.....	94
TABELA 19 – POTENCIALIDADE EROSIVA PARA OS CENÁRIOS 2 E 3.....	95
TABELA 20 – CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO “ <i>R</i> ”	97
TABELA 21 – POTENCIALIDADE EROSIVA PARA OS CENÁRIOS 4 A 9	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
NDBI	<i>Normalized Difference Built-up Index</i> ou índice de diferença normalizada de construção
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ou índice de diferença normalizada de vegetação
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i> ou índice de diferença normalizada da água
PDDMAPU	Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais
SIG	Sistema de Informação Geográfica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	A DRENAGEM PLUVIAL DENTRO DO SANEAMENTO.....	16
2.2	COMPONENTES DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL	20
2.2.1	<i>Dispositivos de captação.....</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Caixas de passagem/poços de visita</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Galerias.....</i>	<i>24</i>
2.2.4	<i>Ramais de ligação</i>	<i>26</i>
2.2.5	<i>Dissipadores.....</i>	<i>26</i>
2.2.6	<i>Bacia de detenção e retenção.....</i>	<i>35</i>
2.3	PROBLEMAS RELACIONADOS À DRENAGEM PLUVIAL	36
2.4	EROSÕES DE ORIGEM PLUVIAL.....	39
2.4.1	<i>Relação entre drenagem pluvial e solos</i>	<i>41</i>
2.5	ENFRENTAMENTO AOS PROBLEMAS DE DRENAGEM PLUVIAL.....	44
2.6	O USO DE GEOPROCESSAMENTO DE IMAGENS NO SANEAMENTO	46
2.6.1	<i>QGIS.....</i>	<i>47</i>
2.6.2	<i>Análise multicritérios e álgebra de mapas.....</i>	<i>48</i>
2.6.3	<i>Análise de uso e cobertura do solo através de índices</i>	<i>50</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1	IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE EROÇÃO	55
3.1.1	<i>Identificação dos pontos de erosão.....</i>	<i>55</i>
3.1.2	<i>Classificação das erosões</i>	<i>60</i>
3.2	MANIPULAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS DE ENTRADA.....	61
3.2.1	<i>Fator rede.....</i>	<i>63</i>
3.2.2	<i>Fator solo</i>	<i>72</i>
3.2.3	<i>Fator topográfico</i>	<i>80</i>
3.2.4	<i>Fator temporal</i>	<i>82</i>
3.3	POTENCIALIDADE EROSIVA.....	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87

4.1	ANÁLISE DAS ESTRUTURAS DE DISSIPACÃO	87
4.2	ANÁLISE DOS FATORES PREPONDERANTES NAS EROSÕES	92
4.2.1	<i>Análise de cada fator como variável independente</i>	92
4.2.2	<i>Análise conjunta dos fatores com mesmo peso</i>	93
4.2.3	<i>Análise conjunta dos fatores com diferentes pesos</i>	94
4.2.4	<i>Análise conjunta dos fatores de forma automatizada</i>	96
4.2.5	<i>Análise geral dos resultados obtidos</i>	99
5	CONCLUSÕES	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXO A – RESULTADOS ENSAIOS DE SOLOS	114

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos da antropização são cada vez mais percebidos na natureza. As paisagens naturais vêm perdendo espaço, dando lugar aos grandes centros urbanos. O crescimento urbano dificilmente consegue ser freado, e é uma tendência e necessidade da sociedade moderna. A dificuldade das políticas públicas em acompanhar o crescimento urbano é evidenciada pelo surgimento de problemas nas escalas sociais, econômicas e ambientais. Tucci (1997) destaca que o processo de urbanização acelerado ocorreu depois da década de 60, gerando uma população urbana com uma infraestrutura inadequada.

Na perspectiva ambiental, a urbanização impacta de forma direta na fauna e na flora, e o avanço das cidades sobre os corpos hídricos é preocupante e tema de diversas discussões. O crescimento das cidades gera um aumento na impermeabilização dos solos e um consequente aumento do escoamento superficial durante as precipitações. Isso, por sua vez, traz consequências diretas para os córregos e rios que cortam as cidades, que passam a receber um volume de água muito maior se comparado às condições naturais do corpo hídrico. Diante disso, um problema ambiental de destaque ocasionado pela urbanização é o aumento das inundações. Embora uma enchente (ou cheia) se trate de um fenômeno natural que independe da ação humana, seus efeitos podem ser agravados e sua condição elevada a classificação de “inundação” pela ocupação antrópica. A recorrência desse evento em médias e grandes cidades brasileiras demonstra a falta de infraestrutura e a necessidade de investimento a ser feito nos sistemas de drenagem pluvial que atendem as cidades. Tucci (1997) destacou há quase 3 décadas que o desenvolvimento urbano brasileiro ajudou na produção de um aumento significativo na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água.

A Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, definiu o saneamento em 4 pilares e mostrou uma disparidade no tratamento dado as 4 disciplinas no Brasil. Embora ainda se apresentem de forma precária em várias partes do país, o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário e a limpeza urbana/manejo de resíduos sempre foram temas debatidos na sociedade e mais amplamente abordados pela literatura. Por outro lado, a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas sempre foi um tema

tratado em segundo plano por parte dos gestores públicos, e, se comparado aos três outros pilares, pode-se afirmar que ainda são esparsos os estudos e normas que versam sobre o tema.

Conforme os últimos 2 censos divulgados pelo IBGE em 2010 e 2022, a cidade de Uberlândia, em Minas Gerais, se apresenta com o maior crescimento absoluto do estado de Minas Gerais na última década, com um acréscimo de mais de 109 mil pessoas, representando um aumento de 18,08% e totalizando 713.232 habitantes, valor superior a 9 capitais brasileiras. (IBGE, 2023)

Não diferente das situações supracitadas, a cidade localizada no triângulo mineiro vem apresentando um elevado crescimento da sua mancha de ocupação urbana, com a abertura de diversos novos loteamentos voltados para as mais diferentes classes sociais. Atualmente, a abertura de vias e loteamentos é acompanhada pela implantação dos sistemas de saneamento, inclusive o de drenagem pluvial. Contudo, vale ressaltar que esse crescimento acelerado da cidade se iniciou há algumas décadas, período em que a drenagem pluvial não era tratada como hoje, sendo até negligenciada por muitas vezes. Em virtude disso, é comum encontrar na cidade pontos recorrentes de alagamento ou inundação, como a Avenida Rondon Pacheco, Avenida Anselmo Alves dos Santos e Avenida Professora Minervina Cândida, locais descritos como pontos críticos no Plano de Emergência Pluviométrica (PEP) recentemente atualizado pelo Município (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2025). Em episódio recente, em novembro de 2024, em função de forte chuva houve o extravasamento do Córrego São Pedro localizado sob a Avenida Rondon Pacheco, o que acabou resultando em uma vítima fatal (CBN, 2024). Essa situação reforçou ainda mais a necessidade de novos investimentos e ações preventivas, visando mitigar os impactos das chuvas. Em uma dessas ações, o Município recentemente implantou o sistema de envio de alertas da Defesa Civil, que permite o envio de mensagens de texto para os celulares das pessoas que estão em localidades com risco de desastres naturais, como alagamentos, enxurradas e enchentes provocadas por fortes chuvas, além de deslizamentos de terra e vendavais, ou causados pelo homem (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2025).

A falta de preocupação com o manejo e destinação das águas pluviais é ainda mais perceptível quando se observa os córregos do município, que vem apresentando cada vez mais os reflexos da falta de planejamento e correta implantação de infraestrutura. Uma breve visita em algumas margens de córregos da cidade ou uma simples visualização de imagens de satélite dessas

regiões revela a existência de diversos processos erosivos oriundos do escoamento das águas pluviais.

Considerando a necessidade de se debater as consequências da urbanização, e tendo em vista uma preocupação em se preservar os corpos hídricos, este trabalho busca abordar sobre drenagem pluvial e aprofundar nos seus impactos nos centros urbanos a partir do exemplo de Uberlândia/MG.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia para identificação do potencial de agravamento erosivo originado pelo deságue de redes de drenagem pluvial, utilizando a cidade de Uberlândia, Triângulo Mineiro, como objeto de estudo. Imagens geoprocessadas e informações obtidas em campo permitiram relacionar as erosões já existentes com fatores que potencializam o processo erosivo.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho traz como objetivos específicos:

1. Apresentar concepções da drenagem pluvial dentro do saneamento, apresentando uma visão prática dessa importante infraestrutura e os problemas da sua ausência ou insuficiência;
2. Reforçar a importância do uso dos SIG's na engenharia de saneamento e no planejamento do futuro das cidades;
3. Identificar, caracterizar e classificar erosões ocasionadas por redes de drenagem pluvial em Uberlândia/MG, permitindo assim relacioná-las com alguns fatores capazes de potencializar estes problemas;
4. Realizar uma integração dos dados levantados com o *software* QGIS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A DRENAGEM PLUVIAL DENTRO DO SANEAMENTO

A infraestrutura de drenagem pluvial urbana passa por muitas vezes despercebida pelos olhos da população. Sua presença na vida cotidiana urbana é pouco notada pela população, mas sua ausência é altamente sentida em períodos chuvosos ou em eventos pluviométricos extremos. Em partes devido a sazonalidade dos períodos chuvosos, a drenagem pluvial recebe poucos investimentos no país. Trata-se de um cenário que tende a mudar em cidades com intenso processo de urbanização. Segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM, 2006), “o aumento da densidade de ocupação por edificações e obras de infraestrutura viária resulta em maiores áreas impermeáveis, e como consequência no incremento das velocidades e dos volumes de escoamento superficial e na redução de recarga do lençol freático”. O planejamento nessa infraestrutura deve, portanto, ser uma ferramenta crucial para o acompanhamento do crescimento urbano face aos eventos pluviométricos.

Em 5 de janeiro de 2007 foi sancionada a Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Tratou-se de um marco representativo, que buscou integrar os 4 pilares do saneamento básico. De acordo com as últimas alterações propostas pela Lei Federal nº 14.026 de 15 de julho de 2020, Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020), as 4 disciplinas que compõe o saneamento básico podem ser definidas em: 1 – abastecimento de água potável; 2 – esgotamento sanitário; 3 – limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; 4 – drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. A ideia de introdução do termo “manejo” busca envolver não apenas a destinação das águas pluviais, mas conforme diz a própria lei, o “transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes”.

O Novo Marco do Saneamento, definiu ainda em seu Artigo 29 que “os serviços públicos de saneamento básico terão a sustentabilidade econômico-financeira assegurada por meio de remuneração pela cobrança dos serviços, e, quando necessário, por outras formas adicionais, como subsídios ou subvenções”. O inciso III do mesmo artigo traz ainda que essa cobrança, para o serviço de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, poderá ser feita na forma de

tributos, inclusive taxas, ou tarifas e outros preços públicos, em conformidade com o regime de prestação do serviço ou das suas atividades. Embora não apresente uma metodologia ou crie ferramentas capazes de subsidiar uma fonte de receitas para a infraestrutura de drenagem pluvial dos municípios, o artigo é importante para introduzir a necessidade de se destinar verba para o setor, e cria um precedente legal para a cobrança desse serviço de forma análoga ao que hoje é realizado no fornecimento de água ou até mesmo no setor energético.

Indo ao encontro do proposto na Lei Federal nº 11.445, o Município de Uberlândia, por meio da Lei Municipal nº 12.622 de 18 de janeiro de 2017 transferiu as atribuições de drenagem pluvial da Secretaria Municipal de Obras ao Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE (UBERLÂNDIA, 2017), buscando assim unificar o saneamento em torno do órgão. A autarquia municipal, criada em 23 de novembro de 1967 por meio da Lei Municipal nº 1.555, teve como objetivo inicial gerir os serviços de água e esgoto da cidade. Hoje, tem também como atribuição o gerenciamento das atividades de drenagem pluvial e manejo de resíduos sólidos da cidade.

A cidade de Uberlândia/MG hoje conta seu Plano Diretor de Drenagem em desenvolvimento (UBERLÂNDIA, 2025), mas ainda não possui ferramentas para realizar a cobrança do serviço de drenagem no município. Apesar disso, com a recente implantação no ano de 2022 da Agência de Regulação dos Serviços de Saneamento Básico de Uberlândia (ARESAN), e com a publicação da Norma de Referência nº 12/2025 pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que dispõe sobre a estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, a expectativa é de que o município em breve consiga novas ferramentas para trabalhar essa importante componente do saneamento e que seja ainda analisada a criação de um modelo de cobrança do serviço no município.

Apesar de os estudos referentes a elaboração do Plano Diretor de Drenagem do município terem se iniciado apenas recentemente, estudos e ações vêm sendo desenvolvidas pelo município para o fornecimento de um melhor serviço de drenagem pluvial. Em um destes estudos, foi anunciado em 2022 a implantação de 4 reservatórios ao longo do Córrego Lagoinha, que através do retardo do escoamento das águas pluviais, busca reduzir o volume de água que chega na Avenida Rondon Pacheco, um dos grandes problemas da cidade (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2022). Desde setembro de 2024, um desses reservatórios, a represa do Camaru, já se encontra em operação e contribuindo para a redução do impacto do volume de

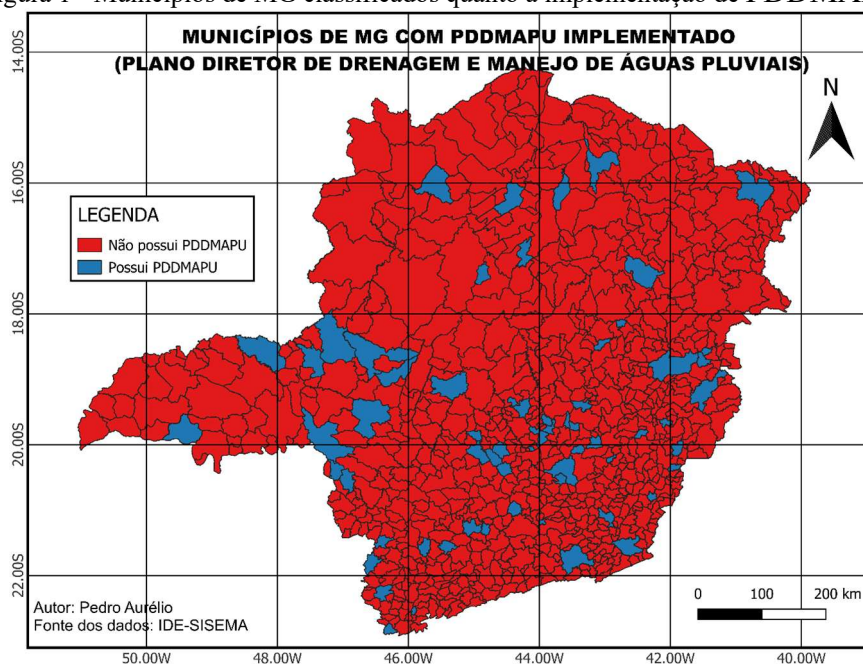
água conduzido pelo córrego (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2024). Além disso, o município também tem trabalhado em outras regiões, como no bairro Morumbi, onde construiu um novo bolsão de retenção e realizou diversas melhorias nos bolsões já existentes (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2024).

Tucci (1997) destaca a importância em se considerar o planejamento das redes cloacal e pluvial e a ocupação das áreas de risco, quando se formulam os planos diretores de desenvolvimento urbano e o quanto o gerenciamento inadequado na implantação de obras públicas ou privadas interfere no ambiente urbano. A drenagem é parte essencial da infraestrutura, portanto, o Plano Diretor de Drenagem Urbana deve ser planejado em conjunto com os outros sistemas, principalmente o plano de controle ambiental, esgotamento sanitário, disposição de material sólido e tráfego (DEP, 2005).

O Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais, é o instrumento que traz, para cada município, diagnósticos e propostas de medidas de prevenção e controle de riscos dos usos do solo e dos recursos hídricos para o adequado manejo das águas pluviais, tendo em conta as ocupações e atividades humanas no âmbito da bacia hidrográfica. Os objetivos específicos esperados são os de preservar vidas, reduzir prejuízos e preservar a saúde das pessoas e o meio ambiente, principalmente o urbano (MENDES, 2022).

De acordo com dados obtidos pelo Sistema de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE SISEMA, 2022), de 853 municípios mineiros, apenas 64 possuem Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (PDDMAPU), cuja distribuição espacial é observada na Figura 1.

Figura 1 - Municípios de MG classificados quanto a implementação de PDDMAPU



Fonte: Autor, com dados obtidos do IDE-Sisema, 2022

Das 64 cidades que já possuem Plano Diretor de Drenagem, pode-se citar as de pequeno porte como Carmo do Paranaíba, Ibiá e Sacramento e as de grande porte, como Juiz de Fora, Governador Valadares ou até mesmo a capital Belo Horizonte. Percebe-se, portanto, que a implementação do plano não se relaciona diretamente com o tamanho do município. A implantação de um Plano Diretor de Drenagem Pluvial depende de políticas públicas que priorizem ou não as demandas locais.

A implantação de um Plano Diretor de Drenagem é uma ferramenta muito importante de avanço para esta disciplina, especialmente considerando a falta de normativos no país que versam sobre o tema “drenagem pluvial”. Embora a ABNT NBR 10.844:1989 trate sobre o tema voltado para edificações (instalações prediais), as redes de infraestrutura urbana de drenagem sequer são mencionadas nas normas que tratam sobre abastecimento de água ou esgotamento sanitário. Com isso, os projetos e a implantação dessa infraestrutura quase sempre se baseiam em bibliografias existentes ou normativos internacionais.

A Política Nacional de Saneamento Básico, apresentada pela Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), e sua atualização dada pela Lei Federal nº 14.026, representam avanços significativos apresentando instrumentos capazes de orientar as ações no setor de drenagem pluvial. As normas, além das diretrizes técnicas e dos indicativos de formas de regulação, investimentos e

planejamento, trazem orientação para a gestão preventiva de desastres, controle da poluição das águas e do solo e para a promoção de soluções integradas de infraestruturas urbanas baseadas na dinâmica e nos fluxos da natureza. Entretanto, a evolução da aplicação dos instrumentos, inclusive de produção e difusão de dados confiáveis (de cadastro, condições operacionais, investimentos etc.), a viabilização do orçamento para expansão de sistemas e o seu custeio operacional, continuam sendo os desafios centrais. (MENDES, 2022)

De acordo com Mendes (2022), tendo como base o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - SNIS, de 3.653 municípios em 2020, 1.993 (54,6%) não declararam nenhum investimento em serviços de drenagem urbana. 744 (20,4%) declararam um investimento inferior a R\$10,00 *per capita*. Ainda conforme dados do levantamento, de 3.653 municípios, apenas 40 (1,1%) declararam possuir algum mecanismo de cobrança pelo serviço de drenagem pluvial. Esses dados escancaram a falta de investimento e a necessidade de mudanças no setor.

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL

O sistema de drenagem pluvial urbano pode ser dividido em alguns componentes básicos ou partes constituintes, incluindo, na sequência do escoamento da água pluvial, os dispositivos de captação (sarjetas e bocas de lobo), os ramais de ligação, as caixas de passagem/poços de visita, as galerias e, por fim, os dissipadores e as bacias de retenção e retenção. Buscando contextualizar melhor a pesquisa e destacar a drenagem pluvial dentro do saneamento, esses componentes básicos ou partes constituintes são explanados detalhadamente na sequência.

2.2.1 Dispositivos de captação

Os dispositivos de captação podem ser executados em diferentes formas e podem receber diferentes denominações. Segundo Wilken (1978) *apud* Cardoso (2003), as bocas de lobo (popularmente também denominados bueiros) podem ser classificados em:

- Boca de lobo com abertura na guia: a caixa fica situada sob o passeio. A sarjeta adjacente à boca-de-lobo pode ser normal (contínua) ou com depressão. Pode ficar localizada em trecho de sarjeta de declividade uniforme ou em ponto baixo do greide da rua.

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, vem sendo desenvolvidos alguns modelos de “bocas de lobo inteligentes”, que buscam reduzir a quantidade de poluentes direcionados às redes de drenagem pluvial. Conforme ilustrado pela Figura 4, o “bueiro inteligente” (ou “boca de lobo inteligente”) consiste em um cesto coletor colocado no bueiro e seu objetivo é reter e armazenar todo tipo de resíduo, orgânico ou artificial, deixando apenas a água passar por ele (CICLO VIVO, 2018).

Figura 4 - Bueiro inteligente



Fonte: Ciclo Vivo (2018)

Um outro dispositivo utilizado como captação são os “grelhões” de drenagem pluvial (Figura 5). Diferentemente das bocas de lobo, são estruturas implantadas perpendicularmente ao eixo viário, que buscam captar as águas pluviais que correm não somente na sarjeta, mas também ao longo de toda via. Em virtude do seu tamanho, apresenta grande eficiência principalmente em vias em que não se tem um abaulamento da rua capaz de direcionar as águas para a sarjeta, o que faz com que as águas escoem de forma não concentrada nos cantos da via.

Figura 5 - Dispositivo de captação tipo “grelhão”

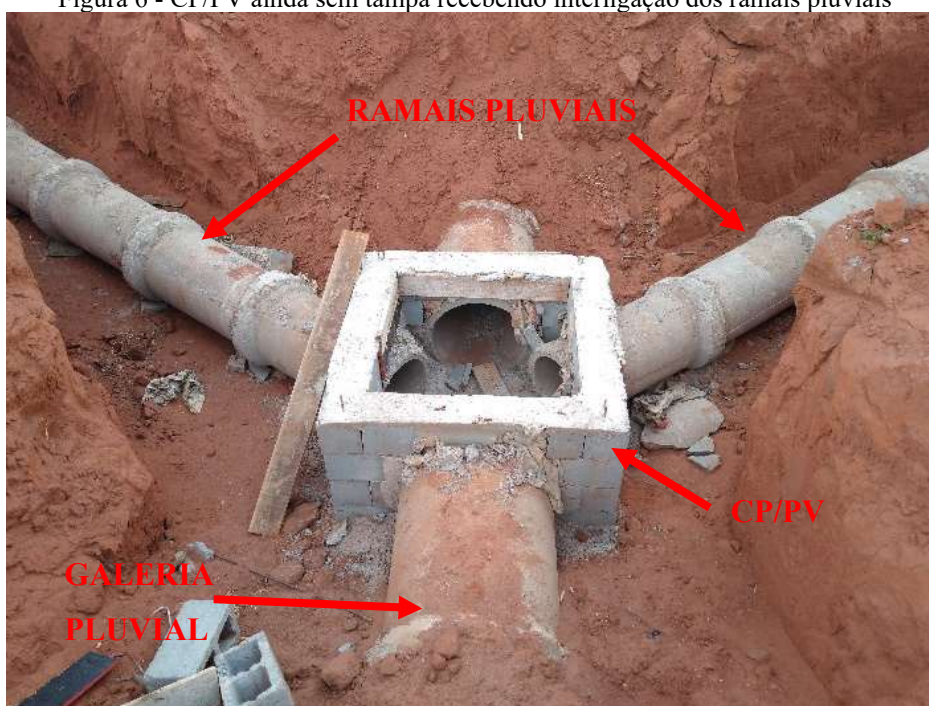


Fonte: Autor

2.2.2 Caixas de passagem/poços de visita

As Caixas de Passagem (CP) e Poços de Visita (PV) são dispositivos utilizados para realizar a mudança de direção do caminhamento da rede ou simplesmente introduzir um desnível (degrau) nos condutos, buscando assim evitar tubulações com declividades acentuadas e consequentemente elevadas velocidades de escoamento. Podem ainda ser utilizadas na interligação de ramais de drenagem pluvial, que interligam os dispositivos de captação às redes (Figura 6). Não é incomum também a utilização desses dispositivos em forma arredondada.

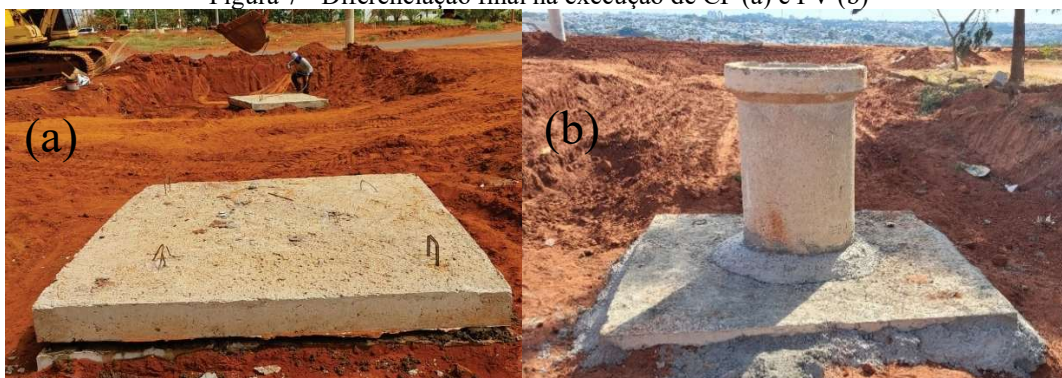
Figura 6 - CP/PV ainda sem tampa recebendo interligação dos ramais pluviais



Fonte: Autor

Algumas regiões do país e por vezes a literatura apresentam “caixas de passagem” e “poços de visita” como a mesma componente do sistema de drenagem. Embora sua execução seja praticamente idêntica, o poço de visita se caracteriza por possibilitar um acesso a rede através de uma “chaminé” ou ainda “pescoço”, acessado por meio de tampões que se encontram nivelados ao eixo viário. Já a caixa de passagem apresenta uma tampa cega, sem acesso, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Diferenciação final na execução de CP (a) e PV (b)



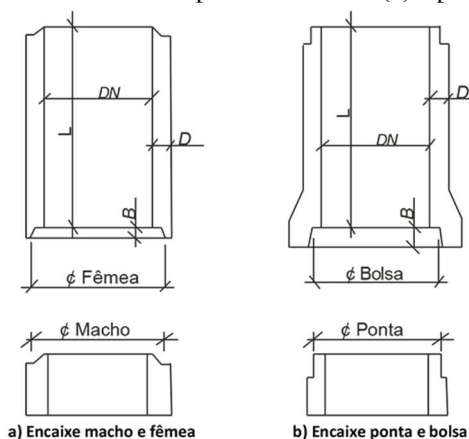
Fonte: Autor

Beduschi (2020), conceitua os PVs como dispositivos localizados em pontos convenientes do sistema de galerias para permitirem mudanças de direção, mudança de declividade, mudança de diâmetro, inspeção e limpeza das canalizações. São também utilizados para evitar trechos muito longos de rede, subdividindo as canalizações em trechos menores. Por não possuir acesso, as CPs não apresentam a mesma possibilidade de inspeção e limpeza.

2.2.3 Galerias

No Brasil, a execução de redes de drenagem é usualmente feita com a utilização de tubos de concreto simples ou armado, de seção circular, também denominadas de “manilhas”. Uma das poucas normas que regem sobre drenagem pluvial, a ABNT NBR 8890:2020 define requisitos e métodos de ensaio para tubulações de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto. Define ainda dois tipos usuais de encaixe de tubos, sendo eles macho/fêmea e ponta/bolsa (Figura 8).

Figura 8 - Encaixes dos tubos tipo macho-fêmea (a) e ponta e bolsa (b)



Fonte: ABNT NBR 8890:2020

Quanto aos diâmetros, a norma trata de valores que variam de 200 a 1500 mm. Em Uberlândia, com base em informações coletadas em novas redes de drenagem implantadas em obras de loteamentos e empreendimentos, é quase consensual o uso do encaixe tipo ponta/bolsa e os diâmetros utilizados variam de 400 a 1500 mm (Figura 9), sendo que para galerias o diâmetro mínimo encontrado é de 600 mm e 400 mm para ramais de ligação. É comum a utilização de aduelas de concreto em trechos do sistema de drenagem pluvial com diâmetro superior.

Figura 9 - Tubos de concreto de DN 400 mm(a) e de 1500 mm(b)



Fonte: Autor

Conforme a norma, os tubos de concreto dividem-se ainda em diferentes classes, sendo utilizado concreto simples (classes PS1 e PS2 – diâmetro de 200 a 600 mm) e concreto armado (PA1, PA2, PA3 e PA4 – diâmetros de 200 a 1500 mm). A utilização de tubos de diferentes classes se dá em função das diferentes cargas que os mesmos suportam, sendo necessário portanto um dimensionamento com base no seu recobrimento e carga suportada.

Além da utilização de tubos de concreto, vem ganhando força no país nos últimos anos a execução de redes de drenagem em polietileno de alta densidade (PEAD), um material que vem sendo oferecido cada vez mais pelas grandes fabricantes de tubos do Brasil. Dentre suas vantagens, destaca-se sua elevada resistência e sua possibilidade de execução em ritmo elevado, uma vez que os tubos são oferecidos em barras de 6 metros (Figura 10). Já como desvantagem, pode-se citar seu custo mais elevado e sua maior complexidade de execução, além do seu coeficiente de *Manning* mais baixo se comparado ao concreto, o que propicia o aumento da velocidade do escoamento.

Figura 10 - Tubos de PEAD de DN 1500 mm com 6 metros de comprimento



Fonte: Autor

2.2.4 Ramais de ligação

Os ramais de ligação consistem nas tubulações que interligam os dispositivos de captação às caixas de passagem/poços de visita (Figura 6). Sua execução é semelhante a implantação das galerias e normalmente são em materiais como concreto ou polietileno de alta densidade (PEAD), conforme descrito anteriormente. Por conduzir o volume de um único dispositivo de captação e representar o início da canalização das águas pluviais, esses trechos apresentam os menores diâmetros observados nas redes de drenagem.

2.2.5 Dissipadores

Conforme Henriques (2014), as elevadas velocidades e a turbulência dos escoamentos que muitas vezes ocorrem em obras de drenagem podem dar origem a erosões significativas, que causam prejuízos e põem em risco a funcionalidade e segurança das infraestruturas. Henriques (2014) afirma ainda que os problemas mais graves ocorrem geralmente ao longo de canais de drenagem [galerias] com inclinação acentuada, nas saídas das passagens hidráulicas e nos locais

de restituição, onde as velocidades de saída são, em muitos casos, superiores às que podem ser suportadas pelo terreno natural constituinte do leito e das margens.

De modo a conter este problema, os denominados “dissipadores” apresentam um papel fundamental no funcionamento da rede de drenagem. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (BRASIL, 2023), define o dissipador de energia como “uma estrutura que tem como objetivo promover a dissipação da carga hidráulica proveniente de fluxos d’água escoados por meio das manilhas.” Ou seja, o dissipador consiste em uma estrutura que é capaz de reduzir a energia do escoamento oriundo da rede pluvial, buscando assim evitar os efeitos potenciais de um escoamento com elevada carga hidráulica, como erosões e assoreamentos.

Com o passar dos anos, diversas estruturas foram e vem sendo propostas como alternativas para dissipar a energia cinética no ponto de deságue das redes pluviais. Alguns dos modelos mais utilizados são: plataforma de enrocamento, escada hidráulica (e suas variantes – Figuras 11 a 15), parede de impacto (Peterka – Figura 16), soleira (canal vertedor – Figuras 17 e 18), entre outros. É comum ainda a combinação de mais de um tipo de dissipação para um funcionamento eficaz da estrutura.

Segundo Henriques (2014), grande parte das informações sobre dissipadores de energia se encontra voltada para dissipação em pequenas e grandes barragens, onde os problemas causados pela ausência ou ineficiência dos dispositivos podem constituir problemas muito graves envolvendo grandes riscos. Apesar disso, a dissipação de energia em drenagem de vias constitui um ponto igualmente importante, porém, com dimensão diferente uma vez que os volumes descarregados em barragens são consideravelmente superiores aos volumes encontrados em drenagem de vias.

No Brasil, embora o DNIT apresente a Norma 022/2023 (BRASIL, 2023) voltada para o assunto, o dimensionamento de dissipadores, assim como o de rede pluviais, não possui um normativo específico. Os normativos do DNIT, voltados para o dimensionamento de rodovias em estradas muitas vezes não contemplam as peculiaridades das redes urbanas. Estas por sua vez se baseiam em estudos internacionais e métodos empíricos. O dimensionamento dessas estruturas pode envolver diversos parâmetros relacionados ao escoamento, como vazão, velocidade, nº de Froude, etc. Cada dispositivo tem suas peculiaridades, com vantagens e

desvantagens, sendo apresentado na sequência um breve resumo a respeito de alguns desses modelos que são mais usualmente utilizados em Uberlândia, na região alvo de estudo da pesquisa.

2.2.5.1 Plataforma (ou tapete) de enrocamento

A plataforma (ou tapete) de enrocamento se trata de uma solução relativamente simples, que consiste no espalhamento de blocos de pedra natural numa superfície plana. A dissipação de energia ocorre por meio do aumento da rugosidade e do aumento da largura do escoamento, que se espalha de modo a não concentrar o volume. O material a utilizar na proteção com enrocamento terá de ser proveniente de rocha dura, ter forma angular e granulometria extensa, isto é, deve evitar-se tapetes com granulometria uniforme (HENRIQUES, 2014). Os blocos são colocados sem nenhum tipo de ligante, o que permite sua adaptação ao terreno natural e também permite sua adaptação a eventuais deformações, conforme pode ser observado nas Figuras 12 e 19C.

Por se tratar de uma solução mais simples, sua utilização também é feita em escoamentos mais simples, com baixas vazões e baixas velocidades. Martins (2000) recomenda que sua utilização seja feita para redes com velocidades inferiores a 4,5 m/s. Por não apresentar elevada eficiência na dissipação quando utilizado sozinho, o tapete de enrocamento é usualmente combinado com outras estruturas

2.2.5.2 Escada Hidráulica

Também denominado como dissipador de quedas sucessivas (MARTINS, 2000), trata-se de um modelo amplamente utilizado nas estruturas de drenagem rodoviária e que também é muito utilizada em deságues de redes urbanas. O modelo apresenta boa utilização em locais com diferença significativa de cotas entre rede e corpo receptor e sua estrutura é usualmente em concreto armado (Figura 11), podendo também ser feita na forma de gabiões (Figura 15).

Figura 11 - Dissipador tipo escada hidráulica



Fonte: Autor

A escada hidráulica também é muito utilizada de forma conjugada com outras estruturas de dissipação. Sem alterar a estrutura do dispositivo, é comum a utilização de um tapete de enrocamento a jusante da escada, o que busca amenizar o contato da água com o solo e assim evitar erosões (Figura 12).

Figura 12 - Escada hidráulica conjugada com tapete de enrocamento

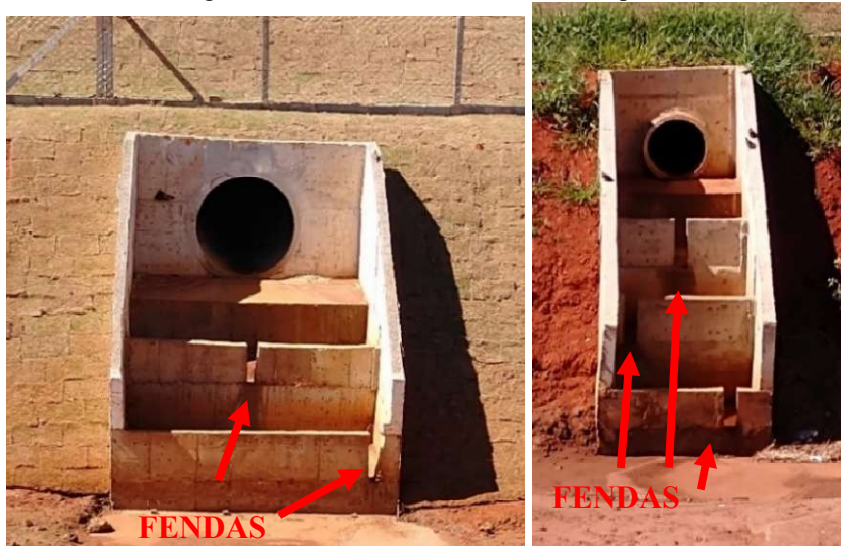


Fonte: Autor

2.2.5.2.1 Escada hidráulica com anteparos

Já alterando-se a estrutura da escada, é possível se obter uma maior eficiência do dispositivo ao se combinar a mesma com anteparos ao longo dos degraus (Figura 13). Essa melhoria permite criar uma espécie de “poço” de água ao longo de cada degrau, permitindo gerar um impacto de água com água durante o escoamento, reduzindo ainda mais a sua energia cinética. O modelo deve prever ainda fendas não alinhadas, para evitar que a água se acumule nos espaços após cessado o escoamento pluvial.

Figura 13 - Escadas hidráulicas com anteparos



Fonte: Autor

2.2.5.2.2 Escada hidráulica com blocos defletores

Já a utilização de blocos defletores deve possibilitar que o escoamento encontre impactos sucessivos ao longo das filas de blocos, evitando a sua aceleração (Figura 14). A utilização de defletores permite ainda um espalhamento do escoamento ao longo do canal. Peterka (1984, *apud* HENRIQUES, 2014) afirma que este tipo de dissipador de energia faz uso de elementos de rugosidade, designados como blocos defletores, que perturbam o padrão de escoamento. O escoamento passa por cima e em torno dos blocos defletores e a sua velocidade diminui à medida que se aproxima de cada bloco.

Figura 14 - Escada hidráulica com defletores



Fonte: Autor

2.2.5.2.3 Escada hidráulica de gabiões

A estrutura do gabião consiste em uma gaiola de tela feita em arame recozido ou aço galvanizado preenchida com pedra utilizada em obras geotécnicas e hidráulicas. Além de ser utilizado em obras de passagens transversais de vias e também na contenção de encostas para implantação de emissários, seu uso para obras de hidráulica/saneamento tem ganhado papel importante na dissipação de redes pluviais. Seu uso como um dissipador é normalmente na forma de escada hidráulica (Figura 15).

Figura 15 - Dissipador tipo escada em gabião



Fonte: Autor

A utilização de gabiões nas estruturas com degraus permite aumentar a dissipação de energia devido às características próprias que os gabiões apresentam e que fazem com que o seu uso

seja vantajoso. O seu elevado peso próprio fornece estabilidade à estrutura fazendo com que este material seja adequado para suportar o impacto das águas. A sua rugosidade confere melhoria na dissipação de energia e simultaneamente resistência ao desgaste provocado pela ação da água. A sua flexibilidade faz com que a sua colocação no local seja mais facilmente realizada, permitindo grande acomodação do material e facilidade na construção. (HENRIQUES, 2014)

2.2.5.3 Parede/bloco de impacto (ou *Peterka* ou tipo VI)

A partir de estudos de estruturas existentes e investigações laboratoriais, a USBR (United States Bureau of Reclamation, uma agência do governo americano) desenvolveu vários tipos de projetos de bacias de amortecimento. Uma das mais consolidadas, também apresentada por Peterka (1964) é a tipo VI, também conhecida como bacia de impacto.

As bacias de dissipação por impacto, ou bacia tipo VI, ou ainda dissipador tipo Peterka, são utilizados nas saídas de canalizações com escoamentos pressurizados ou livres, e também em canais abertos na drenagem longitudinal da via de comunicação. Conforme Martins (2000), as bacias de dissipação de energia por impacto são estruturas compactas, em que a energia do escoamento é essencialmente dissipada por impacto do jato do escoamento que sai da rede contra uma parede vertical e também por ação dos turbilhões que se formam após o impacto no interior da estrutura. Usualmente, essa parede de impacto é uma estrutura em L invertido feita de concreto armado (Figura 16).

Figura 16 - Dissipador tipo bloco de impacto com blocos defletores a jusante



Fonte: Autor

2.2.5.4 Soleira (canal vertedor)

O dissipador de soleira consiste no deságue da rede de drenagem em um canal aberto que após cheio, trabalha com vertimento lateral da água sobre uma soleira. Buscando evitar a ruptura por galgamento e a criação de pontos preferenciais de caminhamento da água, a soleira é feita em concreto, com fundação de estacas e cota nivelada ao longo de todo canal, o que permite uma lâmina de vertimento com altura constante. É comum também a colocação de grama nos taludes do canal, buscando assim efetuar sua estabilização (Figura 17).

Figura 17 - Canal de vertimento/dissipador de soleira



Fonte: Autor

Considerando as grandes vazões oriundas das redes de drenagem, a aplicação das soleiras se mostra como uma boa alternativa para dissipar a energia da água, uma vez que possibilita distribuir melhor a vazão de forma superficial, utilizando-se uma lâmina com altura pré-fixada em projeto, preservando assim as condições da Área de Preservação Permanente (APP) a jusante. A Figura 18 ilustra esse dispositivo em funcionamento

Figura 18 - Dissipador de soleira com canal cheio e vertendo a água



Fonte: Autor

2.2.5.5 Combinação de diferentes estruturas

Buscando-se obter uma eficiência maior da dissipação das águas pluviais, as diversas formas de dissipação da energia da água podem ser combinadas, conforme ilustra a Figura 19 a seguir.

Na imagem, é possível identificar três combinações diferentes, sendo elas:

- (a) bloco de impacto + blocos defletores + soleira de vertimento
- (b) bloco de impacto + blocos defletores + escada hidráulica em gabião
- (c) bloco de impacto + blocos defletores + tapete de enrocamento

Figura 19 - Combinação de diferentes formas de dissipação



Fonte: Autor

2.2.6 *Bacia de retenção e retenção*

As bacias de retenção/detenção são utilizadas como forma de amortecer os escoamentos através da redução das vazões de pico.

O Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba, elaborado pela SUDERSHA (2002), define que “os reservatórios de micro e macrodrenagem podem ser de retenção, quando são mantidos a seco e controlam apenas o volume. O reservatório é de retenção quando é mantido com lâmina de água e controla também a qualidade da água, mas exige maior volume.” Desse modo, caracteriza-se como reservatório de retenção aquele destinado ao armazenamento temporário das águas de chuva e como retenção aquele que, ainda que utilizado para amortecimento das vazões de pico, apresenta uma lâmina de água constante que independe de precipitação.

Em Uberlândia, é comum a utilização do termo “bolsão” para se referir as bacias de retenção/detenção. Conforme levantamento feito com base em projetos de loteamentos aprovados pela cidade, a cidade apresentava no início de 2025 cerca de 60 bolsões de drenagem, em sua maioria com uso apenas na forma de retenção (temporário).

A implementação de bacias de retenção e/ou retenção (Figura 20) a nível de loteamento demanda a destinação de uma grande área para este fim, muitas vezes gerando um passivo estético não agradável para a vizinhança, além de carregar também outros problemas como um possível acúmulo de água no fundo e falta de segurança às suas margens. Apesar disso, PICCOLI (2017) destaca que tais reservatórios contribuem de forma eficiente na melhoria da drenagem urbana, evitando alagamentos e impactos no meio ambiente. Propicia a redução nas erosões e assoreamentos dos meios aquáticos, além de tornar a área urbana um local com mais qualidade de vida.

Figura 20 - Bolsões de drenagem pluvial



Fonte: Autor

2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS À DRENAGEM PLUVIAL

O processo da urbanização é acompanhado por diversos problemas nas mais diferentes escalas. A mera implantação de uma infraestrutura de drenagem pluvial não representa a solução por completo destes problemas. Sua execução requer cuidados, e principalmente, planejamento. Diversos são os fatores que influenciam nas inundações e Tucci (1993) apresenta uma relação entre causas e efeitos que a urbanização pode causar sobre esses fenômenos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Relação causa-efeito entre urbanização e inundação

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos de vazões.
Redes de drenagem	Maiores picos de vazões a jusante.
Lixo	Degradação da qualidade da água; Entupimento de bueiros e galerias.
Rede de esgoto deficientes	Degradação da qualidade da água; Moléstias de veiculação hídrica; Inundações: Consequências mais sérias.
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias.
Ocupação de Várzeas	Maiores prejuízos; Maiores picos; Maiores custos de utilidades públicas.

Fonte: Adaptado de Tucci (1993)

A impermeabilização e o desmatamento dos solos têm como consequência a redução da capacidade de infiltração das águas de chuva. Isso faz gerar um aumento do volume superficial escoado, que encontra em regiões não vegetadas um cenário favorável para o aumento das velocidades de escoamento.

Embora a execução de infraestrutura de drenagem possibilite evitar problemas como alagamentos, a canalização das águas pluviais propicia o seu direcionamento mais rápido a jusante se comparado as condições naturais de uma área sem ocupação. Segundo PICCOLI (2017), o sistema de drenagem convencional, utilizado na maioria dos municípios brasileiros, tem como premissa básica captar as águas pluviais a montante e lançá-las a jusante em um córrego ou meio receptor. Dessa forma o sistema capta “o problema” a montante e de forma simplificada transfere-o à jusante. Embora seja uma solução para a área contemplada pela infraestrutura, essa transferência do problema para a jusante pode ser problemática, sendo necessário um minucioso planejamento para detectar seus possíveis impactos nas regiões de topografias inferiores.

Tucci *apud* Neves (2006) afirma que as águas pluviais, esgoto sanitário e disposição de resíduos sólidos têm uma estreita relação em países em desenvolvimento. Em dias secos, é comum somente águas residuárias escoarem na rede de drenagem de águas pluviais, em função das ligações clandestinas. Em dias chuvosos, além disso, ocorre a lavagem da superfície onde se encontram os resíduos sólidos e outros detritos. Os resíduos sólidos se apresentam como um grande problema sob a ótica da drenagem pluvial uma vez que, ao serem carregados, podem causar o entupimento de bocas de lobo (Figura 21) e também de galerias.

Figura 21 - Bocas de lobo com excesso de resíduos domésticos



Fonte: Autor

Já o esgoto se relaciona de forma problemática com a drenagem pluvial sob várias formas. A Lei Federal nº 14.026, Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020) define que o sistema separador absoluto de esgoto corresponde ao “conjunto de condutos, instalações e equipamentos destinados a coletar, transportar, condicionar e encaminhar exclusivamente esgoto sanitário”. Já o sistema unitário compreende as mesmas estruturas, porém voltadas para o transporte de esgoto sanitário e também das águas pluviais. A mesma lei apresenta ainda que caberá a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) normas e metas de substituição do sistema unitário pelo sistema separador absoluto de tratamento de efluentes, mostrando uma tendência preferencial para este sistema.

Freire (2014) afirma que o sistema separador absoluto adotado no Brasil é considerado por muitos o mais adequado, por atender aos aspectos sanitários, ambientais e financeiros, tendo em vista que sua implantação é menos onerosa. Apesar disso, é muito comum a existência de interligações clandestinas entre esses sistemas, o que na prática faz o sistema funcionar como separador parcial. Freire (2014) afirma ainda que essa realidade é preocupante, visto que os sistemas não estão preparados para tal situação, expondo desta forma a população aos riscos sanitários e os recursos hídricos à contaminação.

A captação de águas pluviais e seu direcionamento à rede coletora de esgoto pode causar uma sobrecarga na rede, que não se encontra apta a receber os volumes de águas de chuva consideravelmente maiores que os volumes de esgoto. Em eventos chuvosos, essa sobrecarga pode gerar transbordamento da rede via poço de visita, e consequentemente possibilitar a proliferação das doenças carregadas pelos esgotos domésticos. Além disso, gera uma sobrecarga nas estações de tratamento de esgoto, que passam a tratar um efluente com carga mais diluída, mas em volume maior.

Por outro lado, o deságue de redes de esgoto em redes de drenagem pode ser ainda mais preocupante, uma vez que esse tipo de conexão permite o despejo direto de esgoto nos corpos hídricos. Com elevadas concentrações de poluentes, esses efluentes passam a impactar diretamente na vida da fauna e da flora existente nos córregos e rios urbanos. Trata-se de um evento muito comum na maioria das cidades brasileiras. A Figura 22 traz imagens de trechos finais de galerias de água pluvial com deságue de esgoto sanitário bruto em corpo hídrico urbano.

Figura 22 - Existência de interligação de esgoto em redes de drenagem



Fonte: Autor

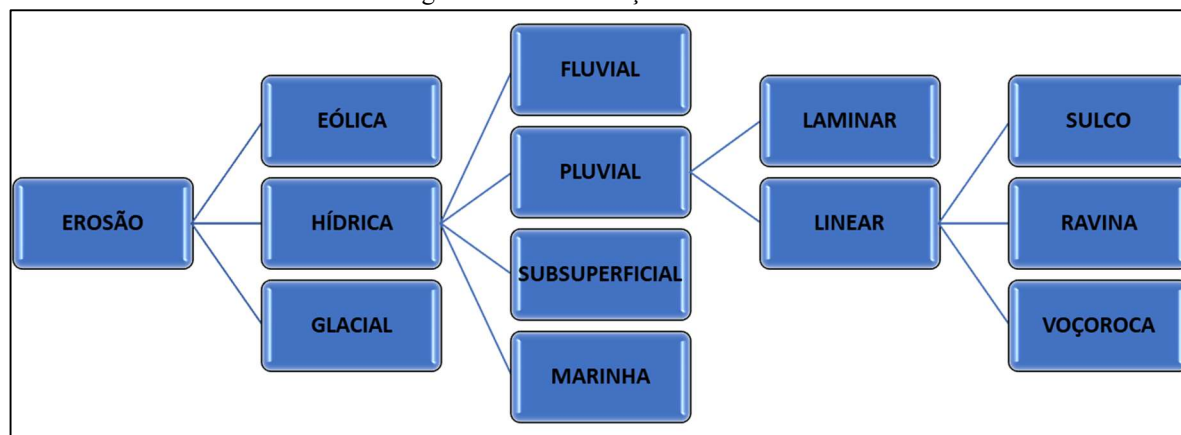
Tucci (1997) afirma que as cidades, no passado, localizavam-se próximas aos rios de médio e grande porte, para uso do transporte fluvial. A parcela do leito maior ocupada pela população sempre dependeu da memória dos habitantes e da frequência com que as enchentes ocorriam. Uma sequência de anos sem inundação era motivo para que a sociedade ocupasse o leito maior do rio. Essa ocupação das várzeas acabou trazendo consequências graves, uma vez que na eventualidade de ocorrência de nova cheia, potencializa os riscos de perda material e também de vidas. No mais, a ocupação das margens dos rios e córregos potencializa o aumento das velocidades de escoamento dos corpos hídricos, favorecendo o surgimento de processo erosivo ao longo dos canais naturais. As erosões de origem pluvial são mais bem detalhadas na sequência.

2.4 EROSÕES DE ORIGEM PLUVIAL

Grande parte dos efeitos apontados no subcapítulo anterior implica no aumento das erosões. A erosão é um fenômeno natural, que consiste na remoção e transporte das camadas de solo por diferentes agentes erosivos. Trata-se de um processo que pode ser agravado pela ação antrópica, momento em que passa a se denominar como erosão acelerada, erosão antropogenética ou erosão antrópica. Jesus (2013) divide os processos erosivos em hídricos, eólicos ou glaciais (Figura 23). Os processos hídricos por sua vez se dividem então em pluvial, fluvial, de subsuperfície e marinha. A erosão pluvial, alvo deste estudo, pode ser dividida ainda entre laminar e linear. A laminar, menos perceptível, pode ocorrer ao longo de toda uma área,

enquanto a linear ocorre em um trecho específico de solo. Já quanto a sua magnitude, a erosão pluvial linear pode ser dividida em sulcos, ravinas e voçorocas (ver Figura 23).

Figura 23 - Classificação das erosões



Fonte: Adaptado de Jesus (2013)

Jesus (2013) mostra que a erosão é pesquisada mundialmente, sendo o Brasil o 12º lugar mundial em publicações de artigos científicos. Tal colocação demonstra a importância que se tem o estudo mais aprofundado do tema, principalmente porque o país, pelo predomínio de solos tropicais, aumenta a tendência para ocorrência de processos erosivos. Oliveira (2020) aponta que as feições erosivas são produtos não apenas das características intrínsecas do solo, mas também do clima, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal, uso do solo (ação antrópica), evidenciando a necessidade de uma investigação multidisciplinar desses fenômenos.

Jesus (2013), que apresentou uma análise multidisciplinar de processos erosivos na cidade Anápolis/GO, concluiu que o grande estopim da erosão urbana é o escoamento superficial concentrado sobre áreas impermeabilizadas, associado ao sistema de drenagem ineficiente ou inexistente. O lançamento de águas pluviais em locais inadequados, como em cabeceiras de drenagem (regiões mais altas, onde se inicia uma drenagem) também são grandes causadoras de erosão (JESUS, 2013). Pode-se afirmar também que a falta de uma correta dissipação pode, muitas vezes, comprometer uma região já vulnerável de várzea, ocasionando a abertura de erosões. A Figura 24 ilustra um caso em Uberlândia/MG, em que a má estruturação do dissipador pluvial ocasionou sua ruína e consequente abertura de voçoroca.

Figura 24 - Erosão em dissipador pluvial



Fonte: Autor

2.4.1 Relação entre drenagem pluvial e solos

Em se tratando de processos erosivos de origem pluvial, a análise do solo é um aspecto crucial para o entendimento desse fenômeno. O conhecimento dos tipos de solo, de suas propriedades e características hidrológicas torna possível fazer interferências sobre sua suscetibilidade natural à erosão (DEMARCHI E ZIMBACK, 2014). De acordo com a classificação das erosões, ilustrada na Figura 23, as erosões ocorrem pela interação entre algum agente específico (vento, água fluvial, água pluvial, etc) e o solo. Em virtude da ampla possibilidade de composição de um solo, o mesmo pode apresentar diferentes comportamentos quando expostos a esses fatores.

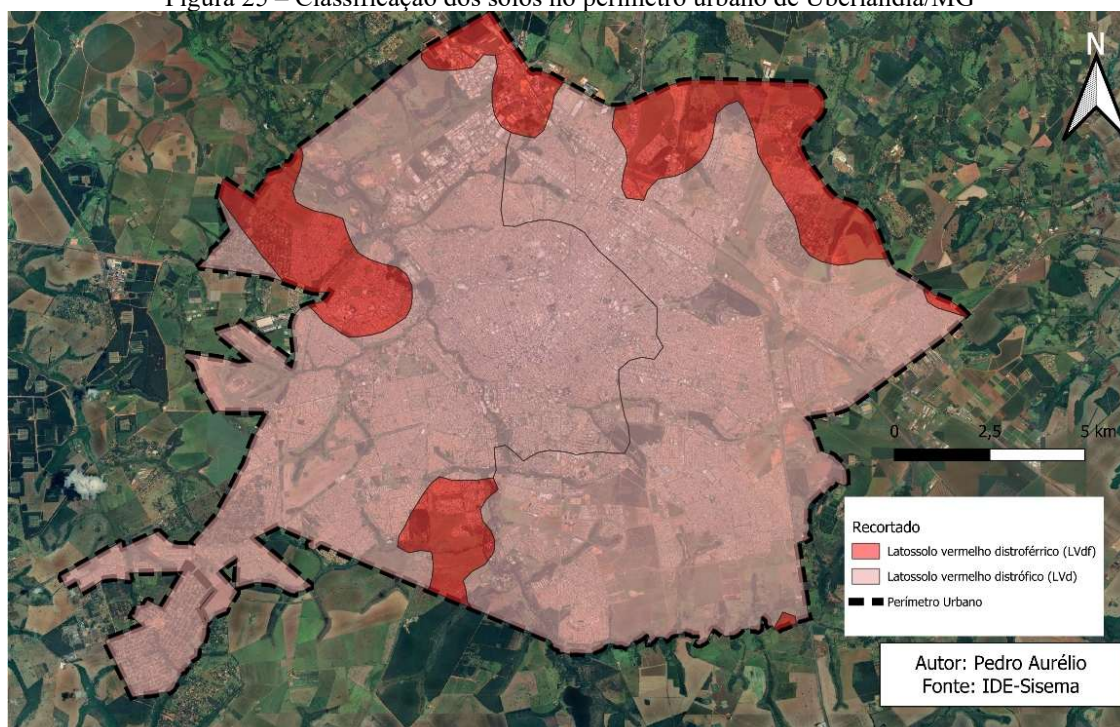
A classificação de um solo pode ser feita de diversas formas, como pela sua cor, origem (residual, aluvial, litoral), textura (definição de porcentagem de cada tipo de grão), uso, entre outros. Existem ainda sistemas de referência com base em diversos estudos, podendo-se destacar o uso do SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) e o *USDA Soil Taxonomy*, um sistema de classificação taxonômico desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

No Brasil, o muito utilizado SiBCS é uma classificação criada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPBRAPA, 2018), que divide o solo em 6 níveis (ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries), sendo que o último nível (séries) ainda carece de definições de conceitos.

Dentro da classificação apresentada pela Embrapa, alguns levantamentos, como o levantamento feito pelo próprio instituto e também o levantamento feito pelo IDE-Sisema (IDE SISEMA, 2010) apontam para a predominância de latossolos vermelhos no perímetro urbano de Uberlândia. Na Figura 25 é apresentado um mapa elaborado com base nos dados disponibilizados pelo IDE-Sisema (SISEMA, 2010), em que é possível observar a existência de latossolos vermelhos distróficos (LVd1 e LVd2) e latossolos vermelhos distroféricos (LVdf2) dentro do perímetro urbano de Uberlândia/MG.

A EMBRAPA define os latossolos como “solos em avançado estágio de intemperização muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo”. Já a subordem dos latossolos vermelhos tem como característica específica a apresentação de cores vermelhas acentuadas, o que ocorre devido aos teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário em ambientes bem drenados. (EMPBRAPA, 2018)

Figura 25 – Classificação dos solos no perímetro urbano de Uberlândia/MG



Fonte: Autor, com dados obtidos do IDE-Sisema, 2010

Observa-se pela Figura 25, que a classificação feita até o 3º nível (grandes grupos) não apresenta uma grande diferenciação do solo dentro do perímetro urbano. Dessa forma, considerando o objetivo da pesquisa, o uso de mapas já elaborados e imagens geoprocessadas se torna uma ferramenta não tão interessante para a análise do solo.

Briaud (2023) destaca que uma investigação *in loco* é o primeiro passo para resolver a maioria dos problemas geotécnicos de engenharia. A coleta de amostras de solo e a realização de ensaios se torna um bom caminho para a determinação de diversos parâmetros. Considerando a necessidade de se analisar a potencialidade erosiva de uma rede pluvial tendo como base o solo da região de deságue, a erodibilidade do solo se torna um parâmetro de interesse. Seu conceito se relaciona com a capacidade do solo de ser erodido por meio de agentes externos como, por exemplo, a água ou o vento.

Denardin (1990) destaca que a erodibilidade dos solos pode ser determinada de 3 formas:

- a) em condições de campo, através da análise das perdas de solo durante um longo período de tempo com diversos eventos pluviométricos;
- b) também em campo, de maneira semelhante ao primeiro item, porém com chuvas simuladas;
- c) através de equações que contenham como variáveis independentes, parâmetros do solo que se relacionam com a erodibilidade; equações essas que já foram ajustadas e determinadas previamente através dos dois métodos anteriores.

Segundo Fragassi (2001), a granulometria mostrou ser a característica com a maior parcela de influência na erodibilidade dos solos, podendo ser parâmetro individual para uma avaliação prévia da erodibilidade de um solo.

Lima (2021) apresentou um estudo comparativo de diferentes metodologias utilizadas na mensuração da erodibilidade do solo. Um total de 103 amostras foram analisadas por meio de 9 métodos, sendo alguns deles de destaque da literatura, como Bouyoucos (1935), Denardin (1990), Wischmeier e Smith (1978) e Sharpley e Williams (1990). Esses métodos fazem uso de parâmetros obtidos através da análise de amostras, como o percentual de sólidos (areia, silte e argila), de matéria orgânica e permeabilidade do solo. No estudo feito por Lima (2021), os 9 métodos indiretos apresentados para determinação da erodibilidade trabalham com parâmetros

de obtenção mais fácil, como granulometria e percentual de matéria orgânica e, portanto, apresentam uma facilidade maior de uso.

Bouyoucos (1935, *apud* Lima) propôs um método mais simples, onde o coeficiente de erodibilidade (k) poderia ser estimado pela mera razão da soma entre as porcentagens de areia e silte no solo dividido pela porcentagem de argila. Já Denardin (1990) propôs uma equação robusta da estimativa de erodibilidade baseada em 31 perfis de solos brasileiros, com enorme aplicação na literatura (CUNHA ET AL, 2010; GUERRA ET AL, 2015). Já Demarchi e Zimback (2014) apresentaram uma simplificação do método proposto por Denardin (1990).

Considerando a sua facilidade de aplicação, os métodos apresentados de determinação de erodibilidade tratam-se de ferramentas interessantes para aplicação na análise de erosões pluviais.

2.5 ENFRENTAMENTO AOS PROBLEMAS DE DRENAGEM PLUVIAL

Conforme abordado ao longo do tópico 2.3, é ampla a gama de problemas envolvendo a drenagem pluvial urbana e mais vastos ainda são seus efeitos sobre a cidade. Tucci (2016) defende a utilização de diferentes estratégias para reduzir a erosão sobre os leitos de escoamentos, a saber:

- Redução do volume de escoamento ou da velocidade pela infiltração;
- Dissipação da energia através do aumento da rugosidade;
- Amortecimento de parte do volume escoado para redução da velocidade;
- Restrição da vazão máxima de saída do empreendimento.

DEP (2005) aborda que, para prevenir as inundações, são necessárias medidas que controlem o escoamento. Estas medidas podem ser classificadas, de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, em:

- Distribuída ou na fonte: age no controle sobre o lote, estacionamentos, praças e passeios;
- Na microdrenagem: age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos. Para que o acréscimo de vazão máxima não seja transferido para jusante, utiliza-se o

amortecimento do volume gerado, através de dispositivos como tanques, lagos e pequenos reservatórios abertos ou enterrados, entre outros;

- Na macrodrenagem: controla os principais riachos urbanos. No Brasil o controle da macrodrenagem tem sido realizado através de canalizações. A solução de controle em uma bacia urbana envolve a combinação de medidas distribuídas, mas principalmente a combinação do aumento de capacidade com o amortecimento.

Seja de forma micro, macro ou distribuída, a proposição de soluções de drenagem urbana passa por uma grande necessidade de planejamento. Diferente do cenário de décadas passadas, em que a drenagem era negligenciada e que a resolução do problema consistia na sua mera transferência para jusante, a engenharia civil conta hoje com diversas ferramentas capazes de auxiliar no planejamento e no gerenciamento dos sistemas de forma ampliada. A drenagem não pode mais ser vista como problema de uma rua ou bairro, devendo ser vista como o problema integrado de uma cidade em que todas as ruas e bairros se conectam por meio de sub-bacias conectadas por talvegues. Novas tecnologias estão em constante desenvolvimento, tanto na parte executiva quanto na parte de planejamento, e a infraestrutura urbana de drenagem deve se apoiar nisso.

O conceito de “*Sponge City*”, ou cidade esponja, nos centros urbanos é uma inovação na gestão hídrica da água pluvial urbana (DE SOUZA, 2020). Trata-se do conceito de uma cidade resiliente, capaz de suportar os impactos das chuvas de alta intensidade, e posteriormente, retomar a sua condição original. De Souza (2020) e De Oliveria Silva e Teixeira (2023) apresentam alguns desses dispositivos, conforme explanado:

- Telhados verdes: trata-se da aplicação de vegetação nos telhados convencionais, permitindo a redução do escoamento superficial;
- Reservatórios de detenção e retenção: atenuam os picos de vazão, acumulando as águas pluviais no pico do evento chuvoso e liberando esse volume aos poucos;
- Praças alagáveis/praça piscina: trata-se de praças e parques que em condições normais representam equipamentos urbanos utilizados pela população mas que em eventos chuvosos possuem capacidade de funcionar como um reservatório capaz de atenuar picos de vazão;

- Trincheiras de infiltração: estruturas lineares implantadas na forma de valetas preenchidas por material granular que permitem ampliar a infiltração de água no solo e evitar seu escoamento superficial;
- Calçamentos/pavimentos permeáveis: tratam-se de superfícies que diferentemente do asfalto usualmente utilizado em vias, apresentam boa capacidade de absorção da água, permitindo infiltração de parte do volume da chuva e reduzindo o volume que escoa superficialmente.

Observa-se que as técnicas apresentadas funcionam em grande parte com a manutenção dos processos hidrológicos naturais, principalmente com o redirecionamento das águas para a infiltração. Os reservatórios por outro lado trabalham com o aproveitamento das águas de chuva, abrindo inclusive caminhos para o reuso de água.

2.6 O USO DE GEOPROCESSAMENTO DE IMAGENS NO SANEAMENTO

O crescimento das cidades faz com que o planejamento futuro dos centros urbanos se torne um complexo desafio para as administrações públicas. Tendo em vista que a maior parte das decisões tomadas pelo planejamento e gestão urbana possui um componente espacial importante, o mapeamento das informações torna-se fundamental, pois permite uma maior cognição por parte do gestor urbano (FREITAS, 2013).

Ainda conforme Freitas (2013), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm tido utilização crescente pelas administrações municipais e demais atores envolvidos com o planejamento do território, no sentido de aprimorar o processo de tomada de decisões. Como exemplo, a Prefeitura de Uberlândia, por meio do sítio eletrônico da Secretaria Municipal de Planejamento Urbano, traz que “a necessidade crescente por informação georreferenciada é uma constante na atualidade, principalmente pelo poder público municipal. A criação de um banco de dados espacial único, que integre todas as informações existentes às bases cartográficas urbanas e ambientais é o propósito da Prefeitura Municipal de Uberlândia, na busca por uma gestão eficiente” (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2025).

O surgimento e as amplas possibilidades de utilização dos mais variados *softwares* e *hardwares* fazem com que os usos dos SIG's se tornem cada vez mais disseminados. Ainda dentro do planejamento urbano, diversos programas que trabalham com modelagem hidráulica e hidrológica têm possibilitado que órgãos públicos e privados façam estudos voltados para o planejamento e gestão dos 4 componentes do saneamento descritos pela Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007). Melo (2008) enfatiza a importância da integração entre modelos hidrológicos e SIG na descrição dos processos hidrológicos em escalas de microbacia e bacia hidrográfica.

Nesse sentido, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos abrangendo o uso de geoprocessamento ligado ao crescimento urbano e a análise de ocupação das bacias hidrográficas. Dos Santos (2019) realizou um estudo sobre o uso e ocupação do solo no município de Cristal/RS. De forma semelhante, Pavanin (2014) elaborou um diagnóstico referente ao uso e ocupação do solo na bacia do Córrego Guaribas, localizada na zona oeste do município de Uberlândia/MG. Ambos os estudos fazem uso do QGIS, um *software* de geoprocessamento de fácil obtenção em virtude da sua disponibilidade gratuita. Contudo, outros *softwares* também tem seu uso bem difundido na comunidade acadêmica, como o ArcGis, utilizado por DE ABREU (2018) em um trabalho de avaliação da drenagem pluvial e de indicadores de saneamento básico na cidade de Macapá-AP.

Em virtude de sua disponibilização gratuita, de sua facilidade de manipulação e de seu uso difundido dentro da Universidade Federal de Uberlândia, o QGIS foi escolhido como uma ferramenta de apoio para elaboração deste trabalho.

Além do QGIS, outra ferramenta muito útil no geoprocessamento de imagens é o Google Earth Engine. O Google Earth Engine é uma plataforma baseada em nuvem que facilita o acesso a recursos de computação de alto desempenho para o processamento de conjuntos de dados geoespaciais muito grandes (GORELICK, 2017). Ele também foi utilizado em algumas etapas do trabalho.

2.6.1 QGIS

Uma das mais robustas ferramentas de geoprocessamento de imagens, o QGIS é um *software* de código aberto utilizado na visualização, gestão, edição e análise de dados georreferenciados. Amplamente utilizado na elaboração de mapas e interação de dados espaciais, é um programa

cujo desenvolvimento se iniciou em 2002, por Gary Sherman, e teve sua versão 1.0 lançada em janeiro de 2009 (OSGEO, 2009).

Conforme informações do site oficial da ferramenta, o programa é mantido por um grupo ativo de desenvolvedores voluntários que regularmente lançam updates e correção de bugs. Desde 2012 os desenvolvedores traduziram o QGIS em 48 línguas e a aplicação é usada internacionalmente em ambientes acadêmicos e profissionais. Diversas empresas oferecem serviços de suporte e desenvolvimento de recursos. Sua licença do tipo GNU GPL (General Public License) permite a livre modificação do seu código fonte, e, portanto, a criação de diversos plugins e complementos capazes de expandir as funcionalidades do programa (QGIS, 2024).

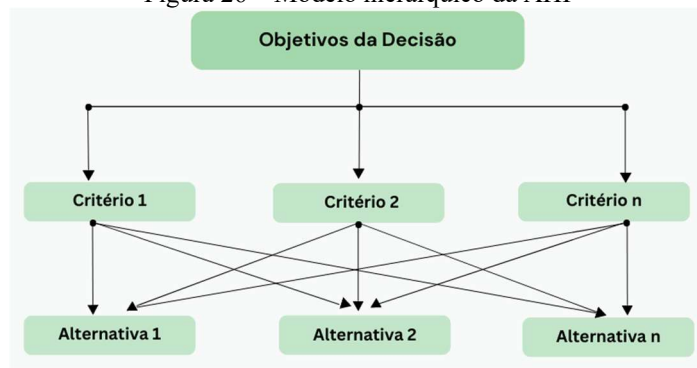
Sua utilização no saneamento é bem abrangente, podendo ser uma ótima ferramenta para cadastro de redes de água, esgoto ou drenagem georreferenciadas e também na criação de diversos mapas, como o de tipologia de solos, hipsometria, curvas de nível e mapas de caracterização do uso e ocupação dos solos. O *software* apresenta uma interface amigável e devido a sua característica de código aberto, possui diversos plugins voltados para as mais diferentes áreas. Para este estudo, destaca-se o uso do LF (*Landscape Functioning*) Tools, um plugin que apresenta ferramentas que auxiliam na produção cartográfica e na obtenção de informações de interesse, como será demonstrado durante a metodologia.

O QGIS é uma ferramenta muito útil para a álgebra de mapas, um método utilizado em análises complexas envolvendo distribuições espaciais de informações e que faz uso da análise multicritérios.

2.6.2 *Análise multicritérios e álgebra de mapas*

A análise multicritérios é um conjunto de métodos que ajudam na tomada de decisão quando há múltiplos fatores a serem considerados. A AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é um desses métodos específicos que visa auxiliar na tomada de decisões através de uma análise estruturada em critérios dispostos de forma hierárquica e com diferentes pesos (Figura 26).

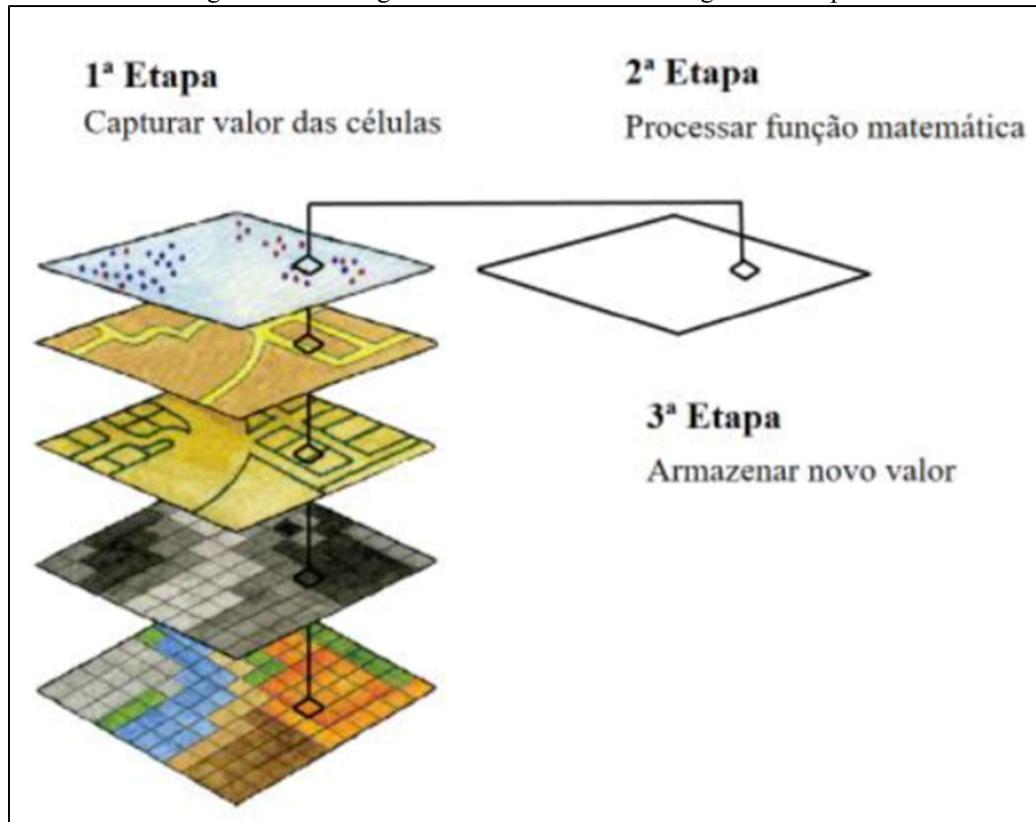
Figura 26 – Modelo hierárquico da AHP



Fonte: Dotto (2023)

Já a álgebra de mapas é uma linguagem algébrica que permite criar novos mapas através da combinação e transformação de mapas existentes, utilizando operações matemáticas e lógicas. Através dessas operações, pode-se combinar, comparar e transformar mapas, permitindo a extração de informações de interesse (Figura 26). Essa abordagem é especialmente útil para analisar padrões espaciais, identificar relações entre diferentes variáveis e tomar decisões informadas (AERO ENGENHARIA, 2023).

Figura 27 – Fluxograma de funcionamento da álgebra de mapas



Fonte: Raspini (2017)

Enquanto a análise multicritérios consiste em um método de decisão, a álgebra de mapas consiste em um mecanismo de processamento de informações geoespaciais. A combinação dessas duas técnicas permite a análise de variáveis geoespacializadas através da imputação de diferentes graus de importância (pesos) sobre as informações (variáveis).

A utilização da análise multicritérios atrelada aos sistemas de informações geográficas vem permitindo a elaboração de trabalhos focados em analisar a origem e o desenvolvimento de feições erosivas, apontando suas causas e os fatores que contribuem para o crescimento desses fenômenos. Dotto (2023) elaborou um estudo de aplicação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) no mapeamento de suscetibilidade ao voçorocamento no município de Capão do Cipó – RS/Brasil. Dias (2021) fez uso da AHP no estudo dos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí-RS, focando na análise dos fatores relacionados ao relevo, solos, uso do solo e geologia.

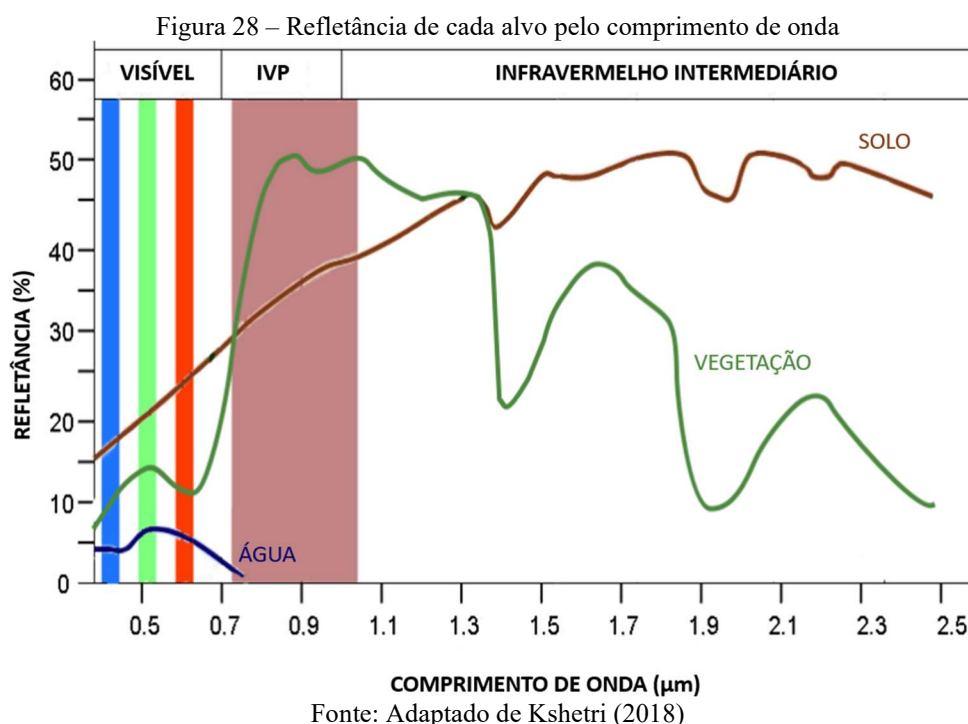
Embora o impacto das chuvas nas erosões possa ser avaliado também sobre aspectos relacionados ao tipo de solo, ao seu uso e ocupação, e ao clima, sua avaliação dentro de centros urbanos permite uma ótica diferente. Os sistemas de drenagem pluvial, responsáveis por canalizar as águas de chuva, tem características que podem propiciar o desenvolvimento dos processos erosivos. Dessa forma, este trabalho objetiva realizar também uma abordagem diferente do usual encontrado na literatura sobre as erosões, buscando vincular o desenvolvimento destes processos também a fatores relacionados as redes pluviais através de uma análise multicritérios, englobando fatores relacionados a rede e também as características da região, como tipo e cobertura do solo.

2.6.3 Análise de uso e cobertura do solo através de índices

Os satélites que orbitam o planeta realizam um constante levantamento de imagens, que ao compor um banco de dados georreferenciados, permitem avaliar a evolução das características físicas de uma determinada região, podendo mostrar fatores relacionados ao relevo, pedologia e uso/ocupação do solo.

Além da análise comparativa sob o ponto de vista temporal, as imagens captadas por estes satélites, dotados de sensores multiespectrais, são feitas através de diferentes bandas, que permitem identificar sutis variações de refletância de alvos específicos, como um tipo de

litologia, solo, ou tipos de vegetação (MENESES e ALMEIDA, 2012). A Figura 28 apresenta a relação entre a refletância (eixo Y) e o comprimento de onda do espectro eletromagnético (eixo X), dando destaque para a região da luz visível, do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho intermediário (IVI), que abrange também o infravermelho de ondas curtas (IOC) próximo à divisa com o IVP. Na imagem é possível identificar ainda a linha de alguns itens alvo de interesse, sendo solo, vegetação e água e sua maior/menor refletância de acordo com o comprimento de onda.



Dessa forma, a análise multibanda das imagens possibilita, através de operações lógicas (aritmética de bandas), destacar informações de interesse para a análise de cobertura do solo, como por exemplo na identificação de áreas vegetadas (com elevada refletância de clorofila) ou áreas construídas. A aritmética de bandas nada mais é que uma técnica utilizada dentro da álgebra de mapas, citada no tópico anterior.

Essas informações obtidas pela combinação de bandas são apresentadas na forma de índices, sendo alguns deles descritos a seguir, de acordo com informações obtidas e adaptadas de Kshetri (2018):

- NDWI – “*Normalized Difference Water Index*” ou índice de diferença normalizada da água: faz uso de uma combinação da banda situada na região do infravermelho próximo

(IVP) e do infravermelho de ondas curtas (IOC). A relação apresenta valores variando entre -1 e 1, sendo que valores acima de 0,3-0,5 indicam a presença de água. A expressão de cálculo é apresentada na Equação 1:

$$NDWI = \frac{IVP - IOC}{IVP + IOC} \quad (1)$$

- NDBI – “*Normalized Difference Built-up Index*” ou índice de diferença normalizada de áreas construídas: assim como o NDWI, faz uso de uma combinação da banda situada na região do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho de ondas curtas (IOC). Como o NDWI, os valores deste índice variam entre -1 e 1, sendo que valores negativos do NDBI representam corpos d'água e áreas não edificadas, enquanto valores mais altos e próximos a 1 representam áreas de acúmulo de construção. O valor do NDBI para vegetação também costuma apresentar valores mais baixos. É expresso pela Equação 2:

$$NDBI = \frac{IOC - IVP}{IOC + IVP} \quad (2)$$

- NDVI – “*Normalized Difference Vegetation Index*” ou índice de diferença normalizada da vegetação é um índice que permite observar a variação da densidade de cobertura vegetal em uma área de interesse. Em geral, a vegetação saudável é boa absorvedora do espectro eletromagnético na luz visível. A clorofila presente na vegetação absorve intensamente o espectro azul e o vermelho, e reflete o espectro verde, o que explica o motivo de a vegetação saudável ser vista como verde (Ksherti, 2018). Dessa forma, o índice NDVI é calculado pela alta refletância no infravermelho próximo (IVP) e alta absorção no espectro vermelho (V), sendo este índice expresso pela Equação 3:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (3)$$

O NDVI apresenta valores que variam entre -1 e 1, sendo valores mais próximos a 1 indicando uma vegetação saudável e valores próximos a -1 indicando vegetação não saudável ou locais sem vegetação.

A utilização de índices como mapeamento de informações a nível de solo apresenta uma ampla utilização na literatura, sendo feita com os mais diversos índices através da combinação de

diversas bandas. Para este trabalho, estes índices tiveram grande importância na identificação do grau de impermeabilização de algumas sub-bacias hidrográficas urbanas.

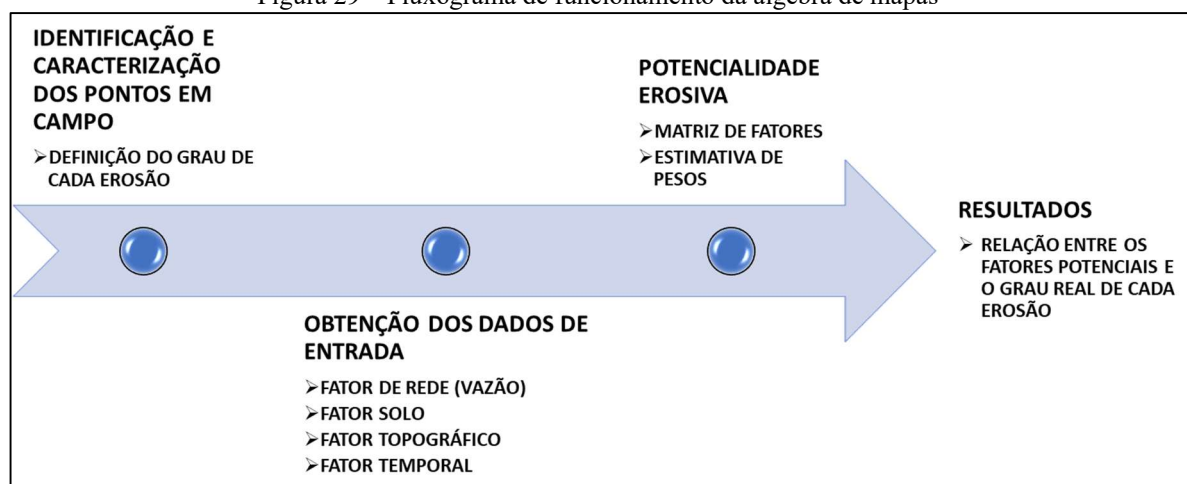
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Diante do abordado até então, evidencia-se a necessidade de novos estudos e propostas que busquem compreender melhor o comportamento de redes pluviais e suas consequências sobre o funcionamento dos corpos hídricos. O método proposto neste trabalho busca alinhar essas informações e criar uma ferramenta capaz de analisar a potencialidade erosiva de redes pluviais através da análise conjunta de alguns fatores chave. Ou seja, o método utiliza o princípio da análise de multicritérios e explora também a álgebra de mapas citados no tópico 2.6.2.

A análise é dividida nas seguintes etapas, descritas no esquema da Figura 29.

- Em um primeiro momento é feita a identificação dos pontos de erosão em campo. Tendo como limitador o perímetro urbano do Município de Uberlândia, Triângulo Mineiro, os pontos de erosão relacionados ao escoamento de uma determinada rede pluvial urbana são definidos e caracterizados (tópico 3.1);
- No segundo momento, parte-se para a manipulação e obtenção de dados de entrada referentes aos pontos de interesse (tópico 3.2). Esses dados de entrada foram nomeados como 4 fatores, a saber: fator rede, fator solo, fator topográfico e fator temporal;
- Posteriormente, os 4 fatores tiveram seus pesos estimados através de tentativas, e a sobreposição desses dados revelou um valor final de suscetibilidade erosiva, que foi então comparado com o grau real de erosão de cada lançamento pluvial (tópico 3.3).

Figura 29 – Fluxograma de funcionamento da álgebra de mapas



Fonte: Autor

3.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE EROSÃO

3.1.1 Identificação dos pontos de erosão

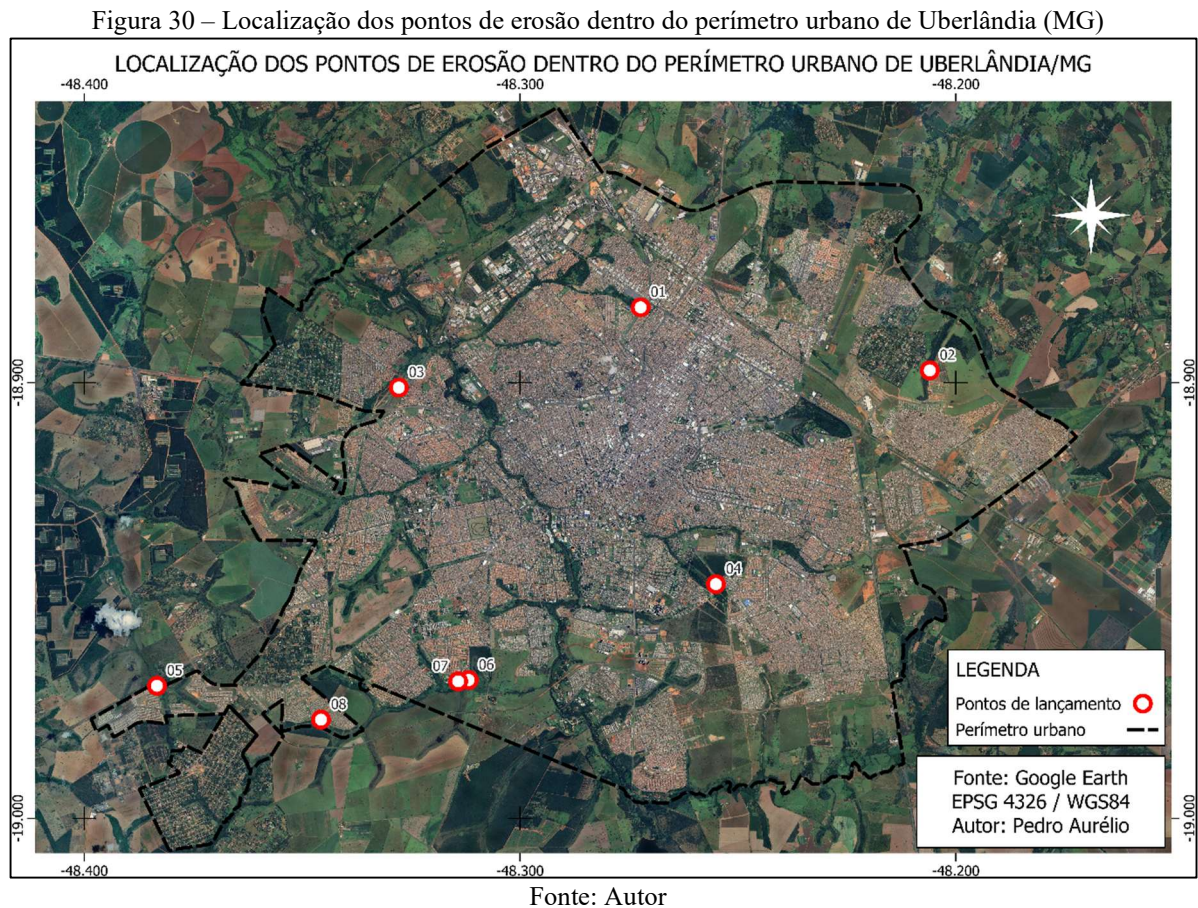
Foram selecionados diversos pontos de erosões ocasionadas por redes pluviais no Município de Uberlândia, Triângulo Mineiro. Os locais que se encontram em estágio erosivo mais avançado podem ser facilmente detectáveis por *softwares* de geoprocessamento como o Google Earth, enquanto as erosões de menor porte possuem maior dependência de observações feitas em campo. Os 8 pontos de erosão utilizados como base neste estudo foram visitados, numerados, descritos e suas coordenadas foram obtidas através do *software* Google Earth. Buscando melhor caracterizar essas erosões, a Tabela 2 apresenta um resumo básico de cada exutório pluvial, contendo as informações de número de identificação ID, nome de identificação, localização do ponto (latitude e longitude), o diâmetro da rede (todas em seção circular) e o tipo de dissipação existente anteriormente na rede (quando existente), conforme os tipos apresentados no tópico 2.2.4. Cabe observar que o colapso, ainda que oriundo de diferentes fatores, atinge os mais diferentes tipos de estrutura. Isso demonstra que a melhor eficiência não se relaciona diretamente a um tipo específico de dissipador, mas sim de uma melhor escolha em projeto, levando-se em consideração as condições específicas de cada ponto de deságue. Vale ressaltar ainda que os pontos escolhidos todos já apresentavam estrutura de dissipação colapsada e sem funcionamento. Dessa forma, desconsidera-se o motivo que deflagrou o processo erosivo, focando-se na análise dos fatores relacionados ao seu crescimento.

Tabela 2 – Identificação dos pontos de erosão coletados

Nº ID	IDENTIFICAÇÃO	LAT	LONG	DIAM. (mm)	TIPO DE DISSIPACÃO EXISTENTE ANTES DO COLAPSO
01	BALAIADAS	-18.882893	-48.272381	1500 +800 +600	Sem dissipação
02	INTEGRAÇÃO	-18.897170	-48.205989	1500	Soleira
03	BOMJARDIM	-18.901283	-48.327701	1000	Sem dissipação (final de canal)
04	JDBOTANICO	-18.946569	-48.256047	1500	Bacia de vertimento (soleira)
05	PEQUIS	-18.969588	-48.383300	1000	Parede de impacto + soleira
06	JDHOLANDA1	-18.968268	-48.311781	1200	Parede de impacto + soleira
07	JDHOLANDA2	-18.968636	-48.314134	2 x 1500	Parede de impacto + soleira
08	MONTEHEBRON	-18.977634	-48.345721	1500	Parede de impacto + soleira

Fonte: Autor

Os dados dos pontos foram então transferidos ao *software* QGIS, e conforme mapa apresentado na Figura 30, verifica-se uma amostragem diversificada de diferentes regiões da malha urbana de Uberlândia (MG).



A Figura 31 apresenta imagens obtidas por meio do *software* Google Earth das 8 erosões em diferentes épocas, ilustrando os processos erosivos em estágio avançado. A Figura 32 apresenta uma breve ilustração da situação em campo das erosões nos pontos 01, 02, 03 e 04. Já a Figura 33 ilustra as erosões nos pontos 05, 06, 07 e 08.

Figura 31 – Imagem de satélite das erosões críticas nos pontos 01 a 08



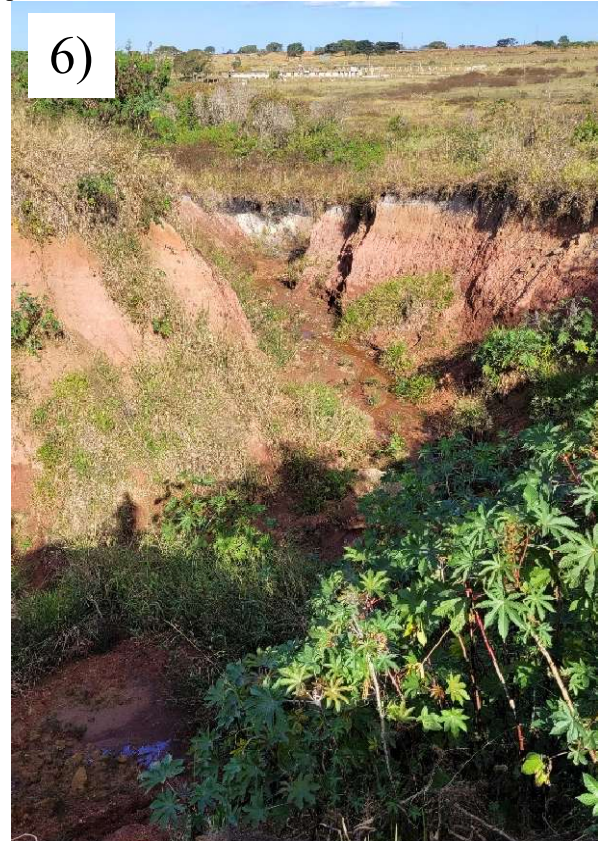
Fonte: Google Earth

Figura 32 – Erosões nos pontos 01, 02, 03 e 04



Fonte: Autor

Figura 33 – Erosões nos pontos 05, 06, 07 e 08



Fonte: Autor

3.1.2 Classificação das erosões

Além da classificação em função do agente responsável pelo processo, conforme apresentado no tópico 2.4, uma erosão pode ter sua estrutura classificada de várias formas, como por exemplo em relação a sua intensidade ao longo do tempo (intensa ou lenta) ou também quanto a suas dimensões em escala linear (comprimento ou profundidade), área (seção crítica) ou volumétrica (volume de solo arrastado).

Pereira (2021) apresenta uma ampla revisão a respeito das diversas classificações existentes na literatura quanto a classificação das erosões. Os termos “*sulcos*”, “*ravinas*” e “*erosões*” podem apresentar diferentes intervalos de valores de profundidades de acordo com cada referência.

Considerando que este trabalho busca vincular o potencial erosivo aos diferentes fatores, propõe-se aqui uma classificação de forma qualitativa quanto a sua profundidade, dividindo as erosões em 5 diferentes graus de acordo com a profundidade máxima que o processo erosivo apresenta:

- Grau 1: 0 a 2 metros de profundidade;
- Grau 2: 2 a 4 metros de profundidade;
- Grau 3: 4 a 6 metros de profundidade;
- Grau 4: 6 a 8 metros de profundidade;
- Grau 5: mais de 8 metros de profundidade.

Utilizando esses parâmetros, a Tabela 3 apresenta um resumo com a profundidade de cada erosão e a sua classificação por ponto. Esses valores foram utilizados no tópico 3.3, em que cada erosão teve seu grau relacionado aos diferentes fatores levantados.

Tabela 3 – Caracterização dos pontos

Nº ID	IDENTIFICAÇÃO	PROF. ESTIMADA(m)	GRAU DA EROSÃO
01	BALAIADAS	7 - 7,5	4
02	INTEGRAÇÃO	3,5 - 4	2
03	BOMJARDIM	6 - 6,5	4
04	JDBOTANICO	5 - 5,5	3
05	PEQUIS	0,5	1
06	JDHOLANDA1	7,5 - 8	4
07	JDHOLANDA2	8 - 8,5	5
08	MONTEHEBRON	3,5 - 4	2

Fonte: Autor

3.2 MANIPULAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS DE ENTRADA

Considerando as erosões de origem pluvial, a proposta de Oliveira (2020) apresentada no tópico 2.4 foi adaptada para este trabalho, e 4 fatores podem ser descritos como preponderantes no crescimento das voçorocas em virtude dos volumes escoados de águas de chuva, sendo eles:

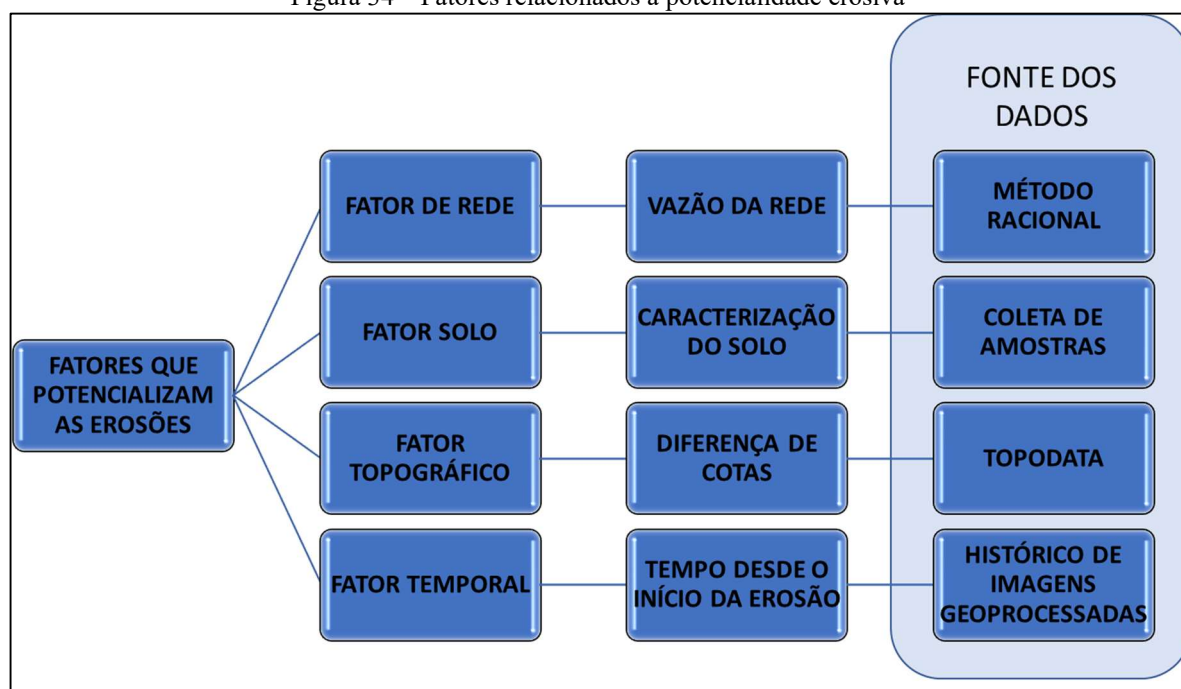
- Vazão do escoamento na rede: grandes volumes de água apresentam elevada energia e maior capacidade de carregar agregados do solo. Sendo assim, elevadas vazões podem propiciar o agravamento das erosões. Este fator foi estimado por meio do método racional, um método consolidado da literatura relacionada à rede de drenagem;
- Tipo de solo: solos com baixa capacidade de infiltração como solos argilosos compactados, solos arenosos com baixa matéria orgânica e solos sem a cobertura vegetal tendem a sofrer mais com o carregamento das partículas com a passagem da água de chuva. O tipo de solo foi classificado por meio da coleta de amostras e realização de ensaios laboratoriais, com consequente determinação da erodibilidade de cada solo nas regiões de deságue;
- Diferença de cota entre deságue e corpo hídrico: devido à gravidade, deságues com elevada cota de lançamento tendem a adquirir maior velocidade ao se aproximar do corpo hídrico. Portanto, quão mais distante verticalmente do corpo hídrico se encontra o ponto de lançamento, maior o seu potencial erosivo. Este valor foi obtido por meio de manipulação de imagens geoprocessadas no QGIS;
- Tempo desde o surgimento da erosão: Quanto mais tempo decorrido desde o colapso da estrutura de dissipação, maior e mais grave tende a ficar o processo erosivo. Assim como a diferença de cota, este parâmetro também foi obtido por meio da manipulação de imagens geoprocessadas.

Um outro fator de grande importância a ser mencionado é a eficiência da dissipação das redes pluviais. O item 2.2.4 abordou diversos tipos de dissipadores, que por muitas vezes podem não ser suficientes para a redução da energia no deságues das redes nos corpos hídricos.

A eficiência da dissipação é um tema complexo, que envolve não só a escolha de uma melhor opção em projeto como também a qualidade de sua execução. Conforme mencionado, para a análise da potencialidade erosiva proposta neste trabalho, optou-se pela observação de erosões

onde o sistema de dissipação se encontra colapsado ou onde inexistia qualquer sistema de dissipação. Dessa forma, desconsidera-se o estopim para o surgimento do processo erosivo, podendo ele se relacionar por exemplo a uma insuficiência na dissipação ou a alguma falha de execução do sistema. A partir desse ponto, os 4 fatores supracitados se tornam fundamentais para o agravamento ou não do processo erosivo. Conforme citado, a coleta de dados referente a estes fatores é feita por diferentes fontes, também demonstradas na Figura 34.

Figura 34 – Fatores relacionados a potencialidade erosiva



Fonte: Autor

A análise multicritérios descrita no tópico 2.6.2 é uma metodologia interessante para se estudar fenômenos complexos, como as erosões. Diversos trabalhos encontrados na literatura utilizam desse método para o tratamento de dados acerca de suscetibilidade dos solos às erosões. Alguns destes inclusive são utilizados como base para projeção de pesos sobre cada fator neste trabalho, como os estudos apresentados por Pereira (2021), que trata sobre o mapeamento de voçorocas e análise de suscetibilidade erosiva no município de Uberlândia/MG; Oliveira (2020), que aborda o uso de investigação multidisciplinar para diagnóstico de processos erosivos lineares urbanos em uma voçoroca no bairro do Bequimão em São Luís, MA; e Jesus (2013), que também trabalha com investigação multidisciplinar de processos erosivos em Anápolis, GO.

3.2.1 Fator rede

Para compreensão da magnitude de cada erosão, a estimativa do volume de água escoado na rede é um parâmetro essencial. Hoje, no país, não existe normativo que verse ou determine um método específico para o dimensionamento de redes de infraestrutura de drenagem pluvial, sendo usual a utilização de métodos consolidados da literatura. Esses cálculos são geralmente baseados em modelos hidráulicos que simulam o comportamento dos condutos escoando uma vazão produzida por meio de uma precipitação estimada. Com isso, diversos são os fatores envolvidos no cálculo dessas redes, como declividade, seção da tubulação e área contribuinte. Estes parâmetros são utilizados em cada dimensionamento de trecho de rede, o que possibilita aproximar e detalhar da melhor forma possível o comportamento do escoamento.

Considerando que este trabalho envolve diversas redes espalhadas pela malha urbana de Uberlândia/MG, a utilização de métodos baseados em modelos hidráulicos se torna inviável, uma vez que necessitaria de um amplo conhecimento cadastral das redes, envolvendo todas as variáveis já mencionadas. Considerando ainda que o trabalho tem como fim o desenvolvimento de uma análise multicritérios e que os valores de cada parâmetro foram utilizados de forma comparativa em cada erosão, a estimativa da vazão desaguada pelas redes pluviais pelo método racional se torna uma boa alternativa.

O método racional trata-se de um método desenvolvido pelo irlandês Thomas Mulvaney em 1851 (BEVEN, 2012). Seu uso é limitado a pequenas áreas (até 80 hectares) e trabalha com algumas premissas simplificadoras, como a desconsideração do armazenamento de água na bacia (infiltração durante as chuvas) e de variações da intensidade da chuva. O método considera a bacia com um comportamento hidrológico uniforme. Apesar disso, conforme já mencionado, o método é capaz de preencher a necessidade de se dimensionar a vazão que cada bacia (região abrangida por uma rede de drenagem) produz no seu ponto de deságue, especialmente considerando que o valor obtido de vazão foi utilizado para comparação das diferentes bacias contribuintes para os dissipadores problemáticos.

O método estima a vazão máxima de água de uma determinada área por meio de 3 fatores, sendo a área da bacia, a intensidade da precipitação e o coeficiente de deflúvio, conforme Equação 4.

$$Q = \frac{A \times C \times I}{360} \quad (4)$$

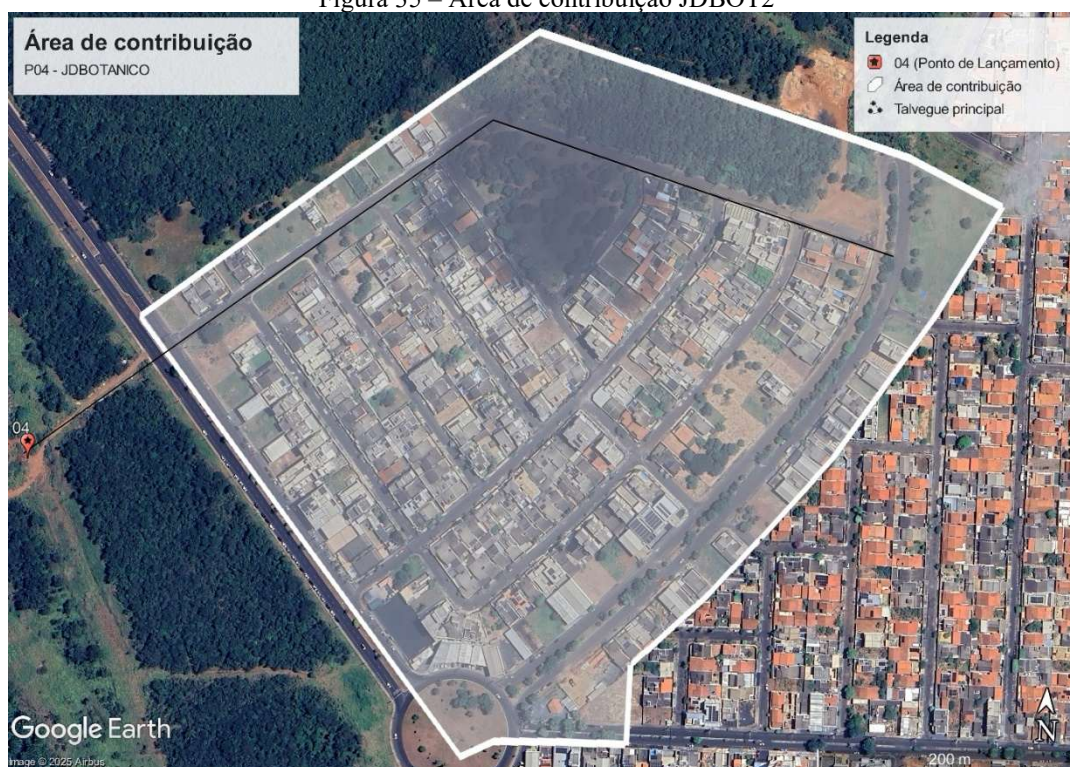
Em que: Q = vazão de escoamento, em m^3/s ; A = área da bacia (ha); C = coeficiente de escoamento superficial, ou *run-off* (adimensional); I = intensidade da precipitação (mm/h).

3.2.1.1 Cálculo da área da sub-bacia

A estimativa da área de cada sub-bacia pode ser feita de forma simples pelo Google Earth, através da criação dos polígonos de cada bacia contribuinte. A maior parte desses polígonos neste trabalho foi traçada com auxílio dos projetos de drenagem de cada loteamento, que já apresenta até mesmo as áreas contribuintes para cada trecho de drenagem. Já em alguns casos, as áreas foram estimadas com base no traçado da rede e a demarcação de curvas de nível e arruamentos.

Exemplificando, para o ponto JDBOTANICO, a área de contribuição foi estimada com auxílio do projeto existente do loteamento, obtido junto ao DMAE. Toda a área demarcada, estimada em 19,80 hectares, apresenta-se drenada para um único ponto de deságue (Figura 35).

Figura 35 – Área de contribuição JDBOT2



Fonte: Autor

3.2.1.2 Cálculo do coeficiente de escoamento superficial ou *run-off* (C)

O coeficiente de escoamento superficial, ou *run-off*, é um parâmetro amplamente utilizado na hidrologia e no dimensionamento de estruturas de drenagem. Ele corresponde a uma relação que indica a quantidade de água precipitada que se converte em escoamento. Sendo assim, seu valor é sempre inferior a 1, sendo que valores próximos a 0 indicam um solo altamente permeável e valores próximos a 1 indicam um solo altamente impermeável, situação em que a água precipitada se torna quase em sua totalidade, em escoamento superficial.

A determinação do coeficiente de *run-off* de cada uma das 8 bacias cujas águas pluviais são direcionadas para um ponto de erosão trata-se de uma estimativa complexa, uma vez que cada região apresenta diferentes graus de impermeabilização do solo.

Conforme abordado no tópico 2.6.3, o uso de geoprocessamento de imagens apresenta grande valia na análise de cobertura do solo. Dessa forma para a análise do coeficiente de *run-off*, propõe-se a análise da cobertura do solo através de índices de ocupação, como o NDBI e NDWI (2.6.3).

Inicialmente, com auxílio do Google Earth Engine, partiu-se para a elaboração de dois mapas apresentando os índices NDBI e NDWI para região do perímetro urbano de Uberlândia. Para a elaboração deste mapa, algumas premissas foram adotadas:

- Foi proposta a utilização de imagens referentes a coleção Copernicus Sentinel-2, uma missão europeia que utiliza imagens multiespectrais de alta resolução e ampla faixa de frequências oriundas de dois satélites gêmeos, de órbita polar posicionados na mesma órbita heliossíncrona, com uma diferença de fase de 180° (COPERNICUS, 2025);
- Foi proposta a utilização de imagens do perímetro urbano de Uberlândia entre 01/08/2024 e 31/10/2024, período em que foram feitas as visitas aos pontos de erosão para coleta das informações;
- Imagens com cobertura de nuvens superior a 20% foram descartadas, uma vez que imagens com nebulosidade podem reduzir a qualidade dos resultados;

- O valor de cada pixel da imagem final foi calculado através da mediana entre todas as imagens que passaram nos filtros (data, nuvem e área).

Essa combinação de condições resultou em 2 mapas formados pela manipulação de 74 imagens, apresentando valores de NDBI e NDWI pixel a pixel para a região estudada. A Figura 36 destaca a região do Parque do Sabiá, em Uberlândia, para os 2 índices.

Figura 36 – Mapas NDBI e NDWI para região do Parque do Sabiá



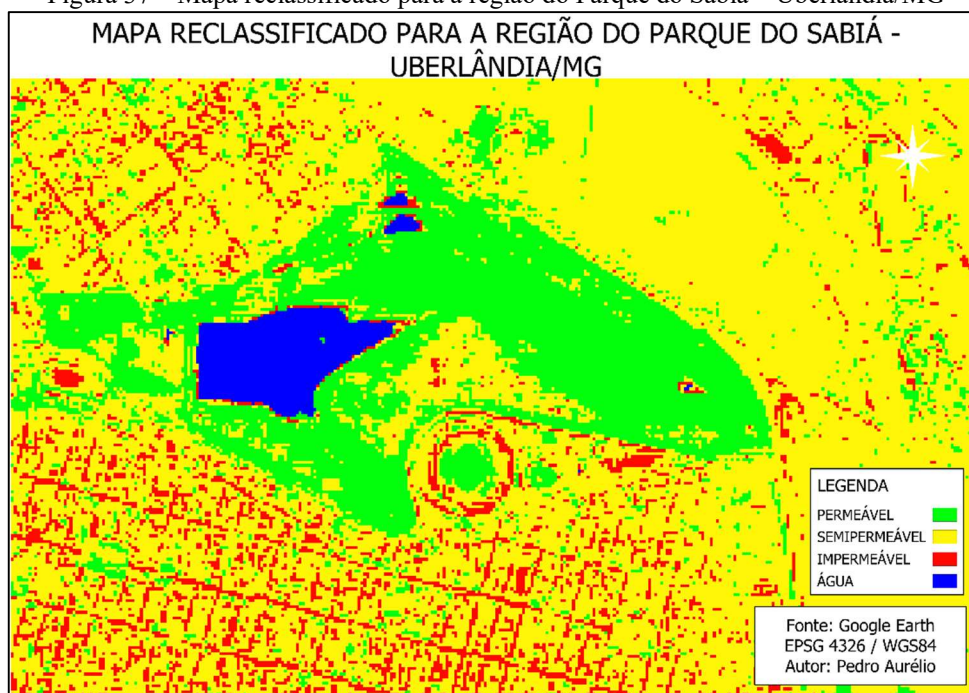
Fonte: Autor

Com os mapas NDBI e NDWI elaborados para a região de estudo, foi proposta uma reclassificação dos valores apresentados nas seguintes categorias:

- Valores com NDWI maior que 0,3 foram classificados como água (Farmonault, 2025);
- Dentre os pixels não classificados como água, foi utilizada uma classificação do índice NDBI conforme proposto por Uddin, Ali e Khan (2010):
 - Valores com NDBI acima de 0,2 foram considerados como áreas impermeáveis, uma vez que esses valores indicam presença significativa de áreas construídas;
 - Valores com NDBI menores ou iguais a 0,2 e maiores que 0 foram classificadas como áreas semipermeáveis ou áreas de transição, uma vez que podem representar regiões com pouca construção ou até mesmo um solo exposto ou com vegetação esparsa;
 - Valores com NDBI iguais ou menores que 0 indicam vegetação.

Com a combinação dos dois mapas e reclassificação dos valores, foi então obtido um mapa do perímetro urbano de Uberlândia descrevendo áreas permeáveis, semipermeáveis/de transição e impermeáveis. A Figura 37 destaca a mesma região do Parque do Sabiá citada anteriormente, porém conforme a nova classificação.

Figura 37 – Mapa reclassificado para a região do Parque do Sabiá – Uberlândia/MG



Fonte: Autor

O novo mapa elaborado para cobertura do solo foi então utilizado dentro do QGIS, e sobre ele foram posicionados os polígonos delimitados no item 3.2.1.1, referentes ao cálculo das áreas das sub-bacias contribuintes para cada ponto de erosão. Através da função “histograma zonal” do QGIS, foram levantados então os quantitativos de pixels de cada classe do mapa (permeável, semipermeável, impermeável e água). Como dentro de cada sub-bacia não houve a identificação de corpo hídrico com dimensão significativa, não foi identificado em nenhum dos 8 casos a presença de pixel correspondente a classificação “água”. Assim, através desse levantamento, foi possível então classificar em valores percentuais, as áreas de cada bacia consideradas como permeável, semipermeável ou impermeável. Esses dados foram dispostos na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Divisão de áreas para cada bacia

Nº ID	IDENTIFICAÇÃO	ÁREA PERMEÁVEL (%)	ÁREA SEMIPERMEÁVEL (%)	ÁREA IMPERMEÁVEL (%)
01	BALAIADAS	11,4%	75,9%	12,7%
02	INTEGRAÇÃO	3,5%	86,8%	9,6%
03	BOMJARDIM	5,2%	80,2%	14,6%
04	JDBOTANICO	9,3%	80,2%	10,5%
05	PEQUIS	0,3%	79,7%	20,1%
06	JDHOLANDA1	1,3%	73,7%	24,9%
07	JDHOLANDA2	1,1%	68,2%	30,8%
08	MONTEHEBRON	4,9%	82,2%	13,0%

Fonte: Autor

Considerando os parâmetros apresentados por Wilken (1978, apud Polidoro, 2013), é possível refazer uma classificação do coeficiente de escoamento superficial (ou *run-off*) para áreas permeáveis, semipermeáveis e impermeáveis. Dessa forma, o coeficiente C foi definido da seguinte forma:

- Áreas permeáveis, como matas, parques, e regiões pouco adensadas – $C = 0,20$
- Áreas semipermeáveis/de transição, como regiões com poucas edificações ou até solos expostos – $C = 0,55$
- Áreas impermeáveis, como regiões altamente adensadas – $C = 0,95$

Foi considerado ainda que o coeficiente de escoamento superficial de cada bacia pode ser determinado através de uma média ponderada (Equação 5):

$$C_{med} = \frac{A_{perm.} \times C_{perm.} + A_{sp.} \times C_{sp.} + A_{imp.} \times C_{imp.}}{A_{total}} \quad (5)$$

Onde:

C_{med} , $C_{perm.}$, $C_{sp.}$ e $C_{imp.}$ representam respectivamente o coeficiente médio e os coeficientes para as áreas permeáveis, semipermeáveis impermeáveis;

$A_{perm.}$, $A_{sp.}$, $A_{imp.}$, A_{total} representam respectivamente as áreas permeável, semipermeável, impermeável e total.

Dessa forma, considerando os percentuais de áreas apresentados na Tabela 4 e os valores definidos para os coeficientes de *run-off* para as 3 classes de ocupação do solo, foram obtidos os coeficientes médios de cada sub-bacia do estudo (Tabela 5).

Tabela 5 – Valor médio do coeficiente de *run-off* por bacia

Nº ID	IDENTIFICAÇÃO	C_{med}
01	BALAIADAS	0,561
02	INTEGRAÇÃO	0,576
03	BOMJARDIM	0,590
04	JDBOTANICO	0,559
05	PEQUIS	0,629
06	JDHOLANDA1	0,645
07	JDHOLANDA2	0,669
08	MONTEHEBRON	0,585

Fonte: Autor

3.2.1.3 Cálculo da intensidade pluviométrica

O dimensionamento de estruturas de drenagem quase sempre envolve o uso de estimativa de precipitação por meio de equações IDF. Trata-se de equações que relacionam a intensidade, duração e frequência das precipitações e são utilizadas na determinação de precipitações máximas. São obtidas de forma regionalizada, por meio da operação de dados históricos coletados e transformados em coeficientes capazes de estimar através de uma equação, a intensidade de uma precipitação por meio de dois outros parâmetros, sendo o tempo de retorno e o tempo de duração da chuva.

Para este trabalho, utilizou-se a equação apresentada por BELLO (2018), que trabalhou com a formulação de equações IDF's para diversos municípios mineiros, apresentando uma equação de chuva para o município de Uberlândia/MG, conforme Equação 6.

$$I = \frac{827,802 \times Tr^{0,137}}{(t + 9,782)^{0,724}} \quad (6)$$

Em que: I = intensidade da precipitação; Tr = tempo de retorno (anos); t = tempo da chuva (minutos).

- Tempo de concentração

Embora as equações IDF utilizem o tempo de precipitação para estimativa da chuva, esse valor, a ser utilizado no método racional, pode ser substituído pelo tempo de concentração. Isso porque a chuva mais crítica para causar o pico de vazão é aquela cuja duração é igual ao tempo de concentração. O tempo de concentração corresponde ao intervalo de tempo necessário para que toda a água da chuva que precipita sobre uma determinada área alcance o ponto mais distante da bacia de drenagem. Ou seja, é o tempo que leva para a água percorrer a distância máxima possível dentro da bacia de drenagem até atingir o ponto de exutório da bacia. Diversas são as equações apresentadas na literatura para cálculo do tempo de concentração. Este trabalho utiliza a equação fornecida por Kirpich (1940), conforme Equação 7.

$$tc = 57 \times \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (7)$$

Em que: Tc = tempo de concentração (minutos); L = comprimento do talvegue principal (km); Δh = diferença de cota entre o ponto mais alto e mais baixo do talvegue (m).

- Tempo de retorno (TR)

Também denominado de tempo de recorrência, trata-se de um conceito que se refere à frequência em que um evento hidrológico, como uma chuva intensa, é esperado ocorrer em um determinado período. Seu cálculo é feito a partir de dados históricos e sua utilização é de grande importância em projetos envolvendo estruturas de drenagem, que utilizam esse parâmetro na

determinação de uma vazão para dimensionamento. A escolha do tempo de retorno para dimensionamento de uma estrutura varia de acordo com as consequências de sua possível falha. Sendo assim, estruturas menores, como sarjetas em vias, apresentam dimensionamento para um tempo de retorno inferior ao de uma barragem por exemplo (menor risco, menor TR). Na literatura, a escolha do tempo de retorno para estruturas de microdrenagem é bem variável, sendo possível encontrar valores que variam de 2 a 15 anos. O Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre (DEP, 2005) apresenta que pode ser adotado um valor mais baixo para regiões de característica mais residencial (2 a 5 anos) e valores mais altos para regiões que contemplem grandes avenidas e áreas comerciais (5 a 10 anos). Já o DMAE, autarquia responsável pela operação dos sistemas de drenagem no município de Uberlândia adota o valor de 15 anos para dimensionamento das estruturas de microdrenagem, valor este que também foi utilizado neste trabalho.

Retomando o exemplo feito para o ponto JDBOTANICO, para o tempo de concentração foi estimado o talvegue principal da bacia (L), de 0,752 km (conforme apresentado na Figura 35), e também o desnível entre os seus pontos de início e fim (Δh), de 25 metros. Dessa forma, substituindo na Equação 7:

$$tc = 57 \times \left(\frac{0,752^3}{25} \right)^{0,385} = 11,88 \text{ min}$$

Substituindo o tempo de concentração e o tempo de retorno na Equação 6:

$$I = \frac{827,802 \times 15^{0,137}}{(11,88 + 9,782)^{0,724}} = 129,43 \text{ mm/h}$$

3.2.1.4 Cálculo das vazões

Com os 3 parâmetros obtidos (C, I e A) para os 8 pontos, procedeu-se para o cálculo estimativo das vazões máximas das redes, conforme Equação 3. Desse modo, a vazão foi estimada para todas as redes apresentadas conforme Tabela 7. O fator rede foi então categorizada em 5 classes diferentes, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Categorização do fator “rede”

VAZÃO (m³/s)	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO DA VAZÃO
<3	Muito baixa	1
3-5	Baixa	2
5-8	Média	3
8-10	Alta	4
>10	Muito alta	5

Fonte: Autor

Tabela 7 – Classificação dos pontos para o fator “rede”

Nº ID	C	I (mm/h)	A (ha)	VAZÃO (m³/s)	CLASSIFICAÇÃO DA VAZÃO
01	0,561	110,12	47,80	8,206	4
02	0,576	99,30	57,70	9,171	4
03	0,590	93,36	30,10	4,608	2
04	0,559	129,43	19,80	3,981	2
05	0,629	116,85	13,80	2,819	1
06	0,645	100,18	28,30	5,080	3
07	0,669	90,95	61,50	10,400	5
08	0,585	87,55	39,90	5,674	3

Fonte: Autor

Observa-se, portanto, que o método racional se apresenta como uma ferramenta útil na estimativa das vazões para este trabalho, que busca apenas comparar os valores de vazão gerados em cada bacia/rede pluvial. Reforça-se que o dimensionamento mais adequado de uma rede de drenagem e seu respectivo dissipador deve ser feito com um método mais preciso, não sendo recomendável o uso do método racional para este fim.

3.2.2 Fator solo

Conforme destacado no tópico 2.4.1, a análise do solo é um fator crucial na análise de erosões pluviais. Para obtenção do “fator solo”, a ser utilizado na análise de potencialidade erosiva de redes pluviais, adotou-se o seguinte procedimento sequencial:

- Coleta de dados em campo;
- Ensaios de granulometria com o material coletado;
- Aplicação de método que relaciona granulometria com erodibilidade do solo;
- Divisão das amostras de solo em classes, apresentando assim uma caracterização do solo nas regiões erodidas.

3.2.2.1 Coleta de dados

A proposta de classificação dos solos quanto ao parâmetro de erodibilidade se inicia com a coleta dos solos nas regiões de interesse. Todos os pontos de interesse foram visitados e amostras de solo foram retiradas das regiões erodidas. Cuidado especial foi tomado para que as amostras coletadas não se apresentassem modificadas, seja por ação humana ou por qualquer intempérie. Os solos foram coletados preferencialmente nas paredes verticais das erosões, onde é possível identificar o solo em seu estado original, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Local onde foi retirada a amostra do solo do ponto 08

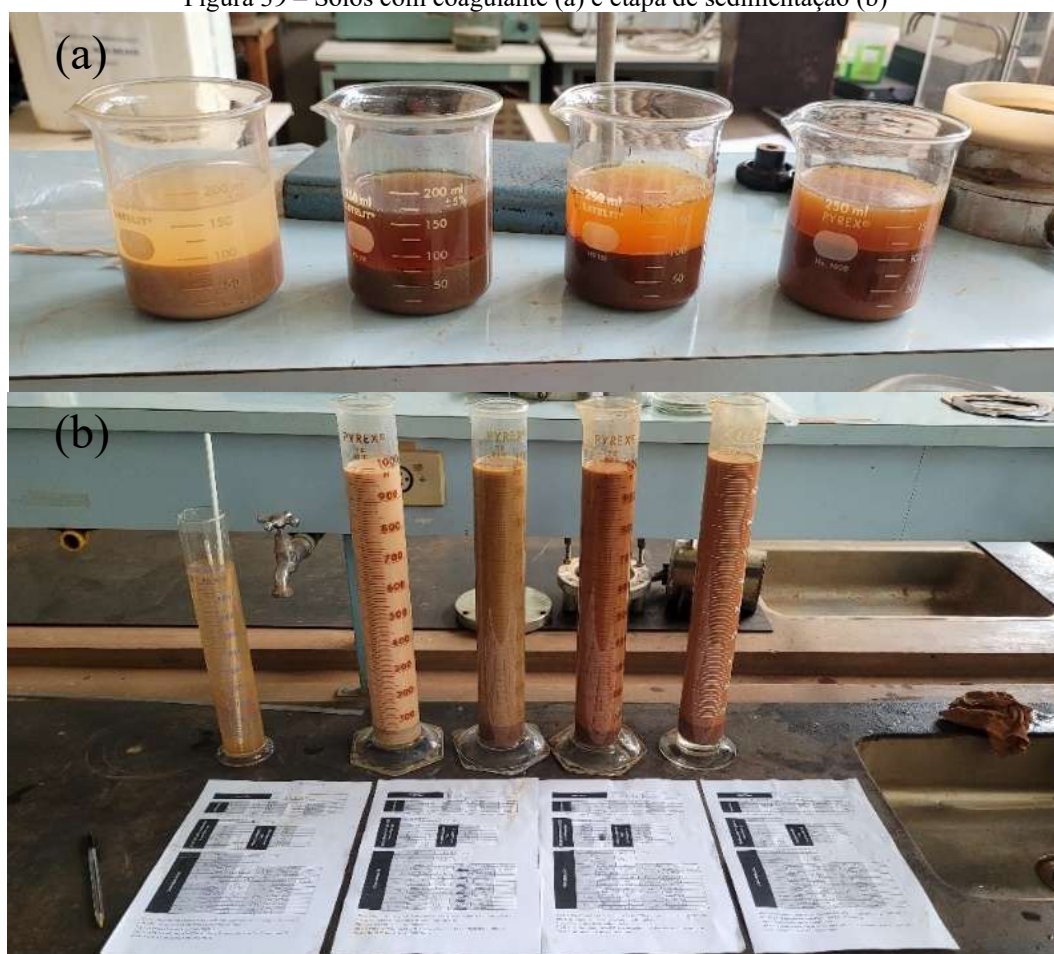


Fonte: Autor

3.2.2.2 Ensaio granulométricos

As amostras coletadas foram analisadas no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, cujas etapas de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação seguiram as orientações normativas da ABNT NBR 7181:2025. A Figura 39 apresenta dois momentos do ensaio sendo feito para 4 solos, sendo o primeiro a mistura do solo com solução de hexametáfosfato de sódio (preparação para sedimentação) e o segundo durante a sedimentação.

Figura 39 – Solos com coagulante (a) e etapa de sedimentação (b)



Fonte: Autor

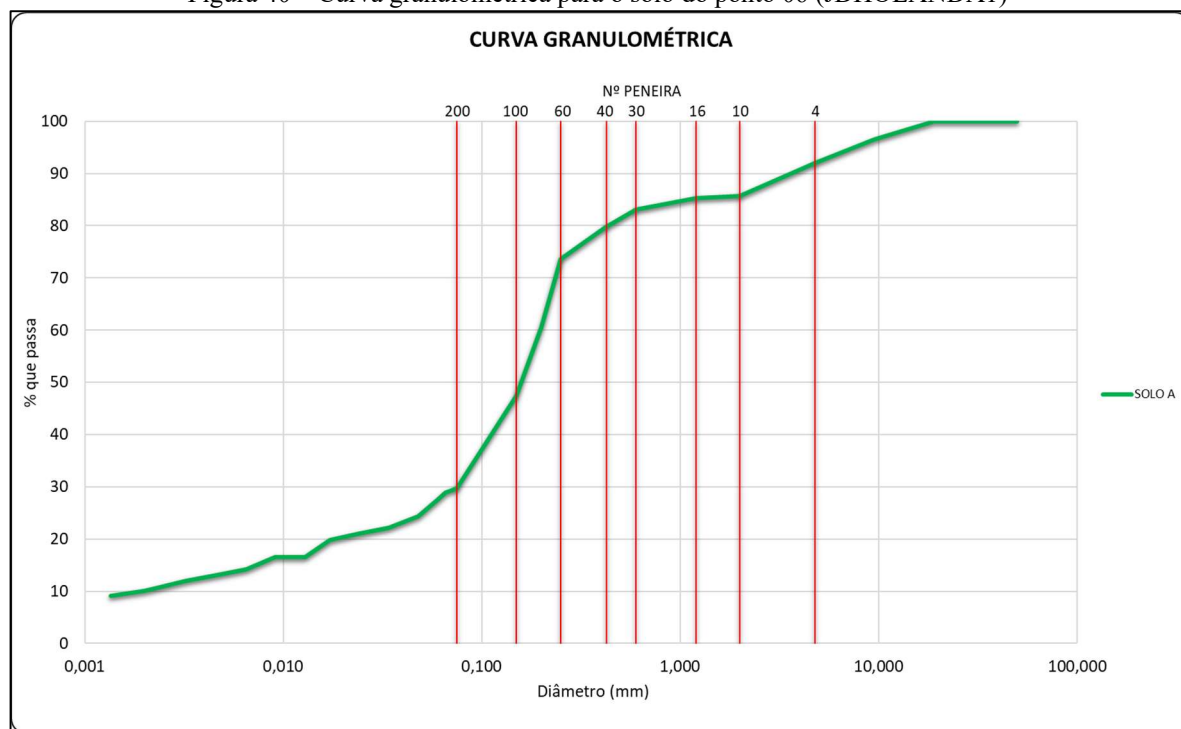
O resumo dos dados obtidos nos ensaios se apresenta na Tabela 6. Buscando exemplificar os resultados obtidos, a Figura 40 traz a curva granulométrica obtida para o solo coletado na região do ponto 06 (JDHOLANDA1), também elaborado conforme instrução normativa da ABNT NBR 7181:2025.

Tabela 8 – Resumo da granulometria das amostras

Nº ID	PEDREGULHO	AREIA GROSSA	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA
01	13,53	5,98	14,74	17,04	18,84	29,86
02	32,01	6,42	13,65	8,22	14,79	24,91
03	4,44	5,74	17,14	28,55	24,33	19,79
04	22,81	0,62	15,59	38,07	15,59	7,33
05	2,89	4,05	34,27	43,78	9,56	5,45
06	14,35	2,60	22,55	33,05	17,32	10,13
07	4,42	3,33	31,08	44,77	10,08	6,33
08	13,26	2,96	15,33	36,75	13,68	18,01

Fonte: Autor

Figura 40 – Curva granulométrica para o solo do ponto 06 (JDHOLANDA1)



Fonte: Autor

3.2.2.3 Aplicação do método proposto por Denardin (1990) modificado por Demarchi e Zimback (2014)

O presente trabalho utilizou o método proposto por Denardin (1990) adaptado por Demarchi e Zimback (2014) para a determinação do coeficiente de erodibilidade “k”. A escolha do método se dá por este fazer uso dos parâmetros obtidos pelos ensaios de granulometria dos solos e por não apresentar uma equação tão simplista como a proposta por Bouyoucos (1935). No mais, o método já foi utilizado e validado como uma boa opção de estimativa de coeficiente de erodibilidade “k” nos estudos abordados no tópico 2.4.1. Utiliza-se como base do método a Equação 8:

$$K = 0,00000748 \times M + 0,00448059 \times P - 0,0631175 \times DMP + 0,010399567 \times R \quad (8)$$

Na qual:

- M (%) é uma relação proposta por Denardin (1990) e posteriormente adaptada por Demarchi e Zimback (2014) (Equação 9):

$$M(\%) = (\text{areia fina} + \text{silte}) \times [(\text{areia fina} + \text{silte}) + \text{areia grossa}] \quad (9)$$

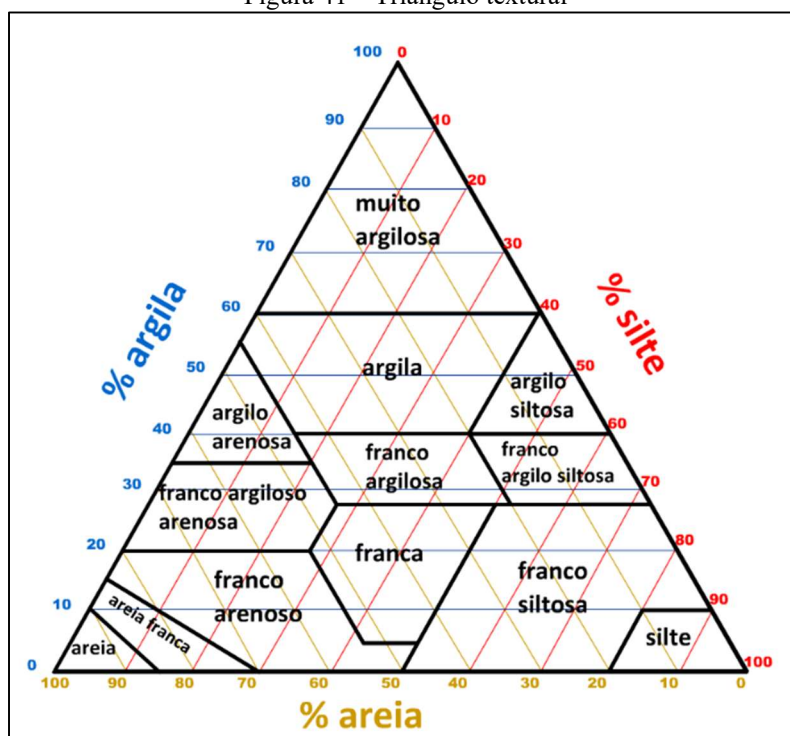
- P é a permeabilidade do solo apresentada na Tabela 9, que relaciona uma classe textural com a permeabilidade. As classes texturais são obtidas através do enquadramento do solo dentro do “triângulo textural”, elaborado pelo United States Department of Agriculture (USDA, 1999). O triângulo textural apresenta uma classificação considerando as porcentagens de areia, silte e argila no solo, desconsiderando o valor percentual de pedregulho (Figura 41).

Tabela 9 – Relação entre classe textural e permeabilidade do solo

CLASSE TEXTURAL	CLASSE	PERMEABILIDADE
muito argilosa, argilosa e argilo siltosa	6	Muito lenta
franco argilo siltosa e argilo arenosa	5	Lenta
franco argilo arenosa e franco argilosa	4	Lenta a moderada
franca, franco siltosa e siltosa	3	Moderada
areia franca e franco arenosa	2	Moderada a rápida
arenosa	1	Rápida

Fonte: Autor

Figura 41 – Triângulo textural



Fonte: IFSC (2025)

- DMP (mm) corresponde ao diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm, obtida pela equação adaptada apresentada em Demarchi e Zumbach (2014), elaborada por Arraes et al. (2010) (Equação 10):

$$DMP = \frac{[(0,65 \times \text{areia grossa}) + (0,15 \times \text{areia fina}) + (0,0117 \times \text{silte}) + (0,00024 \times \text{argila})]}{100} \quad (10)$$

- R é uma relação que envolve os percentuais de areia no solo com o teor de matéria orgânica (Equação 11):

$$R = \frac{[(\text{areia} - \text{areia muito fina}) \times \text{teor de matéria orgânica (\%)}]}{100} \quad (11)$$

TOGNON (1998) apresentou um estudo comparativo entre o teor e a distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil. A análise de 121 perfis de latossolo vermelho, com características semelhantes aos solos encontrados em Uberlândia, permitiu identificar que para o horizonte B1 do solo, com profundidade entre 35-60 cm, os teores de matéria orgânica apresentam valor médio de 1,2%, chegando a um valor mínimo de 0,3%.

Dessa forma, considerando-se os baixos teores de matéria orgânica desses solos e considerando a previsão de baixa variabilidade desse teor entre os solos analisados, optou-se no cálculo do coeficiente “k” por desprezar a última parcela da equação 8, relativa à relação entre matéria orgânica e areia (“R”), uma vez que este coeficiente tende a apresentar valores muito baixos.

Buscando exemplificar o procedimento do tópico 3.2.2.4, apresenta-se o procedimento passo a passo para o ponto de estudo BALAIADAS:

➤ Cálculo do M

Substituindo-se na Equação 9:

$$M = (17,045 + 18,840) \times [(17,045 + 18,840) + 5,983]$$

$$M = 1502,453$$

➤ Valor de P

Desconsiderando-se o percentual de pedregulho no solo, obtém-se a seguinte divisão para os demais tipos de grãos:

- Argila = 34,534%
- Areia = 43,678%
- Silte = 21,787%

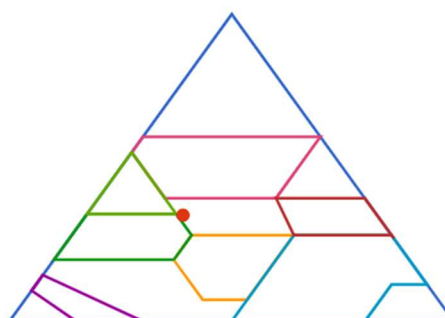
Com auxílio da ferramenta disponibilizada por GubianiSolos (2014), insere-se o valor percentual de finos de argila e areia, sendo já calculado pela ferramenta o valor percentual de silte e a classificação do solo dentro do triângulo textural (Figura 42).

Figura 42 – Interface da ferramenta para classificação do ponto BALAIADAS no triângulo textural

Digite os dados de argila e areia e clique no botão calcular
 OBS: use o ponto e não a vírgula como símbolo decimal

Argila (%) Areia (%) Silte (%)

Classe textural Tipo de solo



Fonte: GubianiSolos (2014)

Dessa forma, conforme Tabela 9, para solo com classificação franco argilosa considera-se a permeabilidade lenta a moderada, portanto $P = 4$;

➤ Cálculo do DMP

Substituindo-se na Equação 10:

$$DMP = \frac{[(0,65 \times 5,983) + (0,15 \times 17,045) + (0,0117 \times 18,840) + (0,00024 \times 29,863)]}{100}$$

$$DMP = 0,066732$$

➤ Cálculo do R

Conforme explicado anteriormente, adota-se $R = 0$;

➤ Substituindo-se os valores obtidos de M, P e DMP na Equação 8:

$$K = 0,00000748 \times 1502,453 + 0,00448059 \times 4 - 0,0631175 \times 0,066732 + 0,010399567 \times 0$$

$$K = 0,024948751$$

Dessa forma, para o solo coletado no ponto 1 (“BALAIADAS”) encontra-se um valor de 0,02495 para o coeficiente de erodibilidade calculado por Denardin (1990) modificado por Demarchi e Zimback (2014).

3.2.2.4 Classificação dos solos nos pontos de erosão

Mannigel (2002) fez um estudo sobre o fator erodibilidade dos solos do estado de São Paulo e nele apresentou uma divisão em 6 classes do fator “k”. Sua proposta foi adaptada para 5 classes, e com isso o fator solo foi categorizado conforme Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Categorização do fator “solo”

INTERVALO DO COEFICIENTE “K” DE ERODIBILIDADE	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
<0,02	Muito baixa	1
0,02 a 0,025	Baixa	2
0,025 a 0,0300	Média	3
0,030 a 0,035	Alta	4
>0,035	Muito alta	5

Fonte: Autor

Com a coleta das amostras nos pontos de interesse, a realização de ensaios e posteriormente a aplicação do método proposto no tópico 3.2.2.4 para obtenção do coeficiente de erodibilidade de todos os pontos, os locais de interesse foram então classificados quanto ao fator solo, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação dos pontos para o fator “solo”

Nº ID	“K”	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
01	0,02495	2
02	0,01946	1
03	0,03587	5
04	0,02677	3
05	0,02598	3
06	0,02459	2
07	0,02714	3
08	0,03326	4

Fonte: Autor

Os dados referentes aos ensaios para obtenção do fator solo são apresentados no Anexo A.

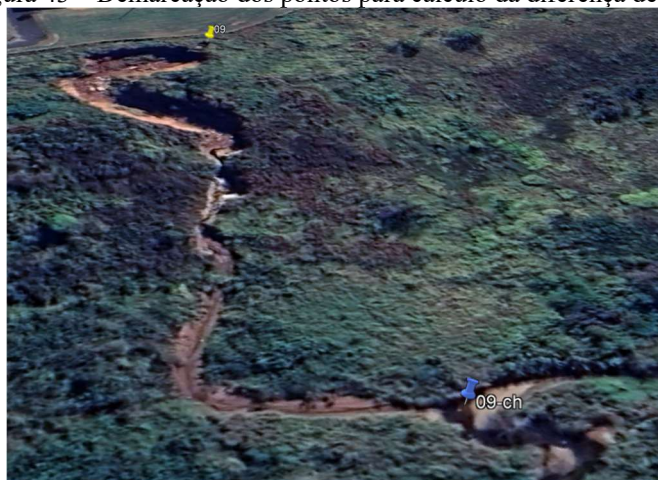
3.2.3 Fator topográfico

Para análise da topografia nos pontos de interesse, utilizou-se os dados obtidos pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) fornecidos pelo Topodata, um projeto do Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE que apresenta um elaborado banco de dados geomorfométricos do Brasil (INPE). Os dados estão todos estruturados em quadriculas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude (Forest Gis, 2011). Ainda conforme descrito no site Forest Gis (2011), as folhas estão identificadas seguindo o prefixo de 6 letras LAHLON, em que LA é a latitude do canto superior esquerdo da quadricula, H refere-se ao hemisfério desta posição (S, Sul, ou N, Norte) e LON sua longitude. Portanto, para a região em questão adotou-se o uso da folha 18S495, que descreve a folha a 18° graus de latitude no bordo esquerdo, hemisfério sul e 49,5° de longitude.

Para processamento dos dados relativos aos fatores topográficos no QGIS, utilizou-se as folhas referentes as variáveis altitude e declividade, fornecidas no próprio site do projeto. Conforme informação apresentada dentro do QGIS, as folhas fornecidas apresentam pixels de tamanho 0,00027777. Considerando a região da Linha do Equador onde 1 grau de latitude equivale a 1 grau de longitude e que cada grau corresponde a aproximadamente 111.320 metros, o pixel representaria cerca de 30,9 x 30,9 metros. Contudo, considerando que quanto mais afastado da região da Linha do Equador menor é a distância de cada grau em sentido latitudinal e que Uberlândia/MG tem latitude aproximada -18.9°, cada pixel na região estudada representa uma área de cerca 30,9 x 29,3 metros.

Para cálculo da diferença de cota entre lançamento e corpo hídrico receptor, utilizou-se a folha de altitude do Topodata. Com auxílio do Google Earth, além da demarcação dos pontos de erosão, foram definidos também os pontos do corpo hídrico mais próximos do lançamento pluvial. A Figura 43 traz um exemplo das demarcações dos pontos.

Figura 43 – Demarcação dos pontos para cálculo da diferença de cota



Fonte: Google Earth (2024)

Com os pontos transferidos ao QGIS, o *plugin* LF Tools foi utilizado para estimar a altitude de cada ponto através de sua função “*estimar valor de ponto para camada raster*”. A partir daí uma coluna é gerada na tabela de atributos da camada de pontos, com o valor de cota extraído da camada raster. Os valores de cota dos lançamentos e seus respectivos córregos foram então obtidos e dispostos conforme Tabela 13. A diferença de cota foi categorizada em 5 classes diferentes, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Categorização do fator “topográfico”

DIFERENÇA DE COTA (metros)	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO DA DIFERENÇA DE COTA
<2	Muito baixa	1
2-5	Baixa	2
5-10	Média	3
10-15	Alta	4
>15	Muito alta	5

Fonte: Autor

Tabela 13 – Classificação dos pontos para o fator “topográfico”

Nº ID	COTA LANÇAMENTO	COTA CORPO HÍDRICO	DIFERENÇA DE COTA (metros)	CLASSIFICAÇÃO DA DIFERENÇA DE COTA
01	887,884	878,328	9,556	3
02	889,173	883,303	5,870	3
03	816,673	798,996	17,676	5
04	866,107	854,457	11,650	4
05	838,149	832,905	5,245	3
06	824,831	814,115	10,716	4
07	825,888	817,389	8,499	3
08	855,032	849,317	5,715	3

Fonte: Autor

3.2.4 Fator temporal

O tempo desempenha um papel crucial no desenvolvimento e intensificação das erosões, influenciando diretamente no seu crescimento e na sua extensão. Com o passar dos anos, a água da chuva (canalizada ou superficial) tende a aumentar o transporte de sedimentos, agravando o processo erosivo. A análise de imagens de satélite ao longo dos anos permite identificar de forma clara a evolução desse fenômeno, como mostra a Figura 44. O local em questão se situa na zona norte de Uberlândia (-18.857967, -48.256799) e apresentou um elevado crescimento desde 2016, quando o problema ainda se encontrava em estágio inicial. Em 2024 (última imagem) a voçoroca já atingia uma área de cerca de 3.000 m². Destaca-se ainda que o local em questão não foi utilizado como um ponto de estudo no trabalho pelo fato que, embora sua origem seja pluvial, a erosão em questão não é ocasionada por um deságue de rede, mas sim pelo escoamento superficial da região ainda não urbanizada.

Figura 44 - Evolução de erosão na zona norte de Uberlândia entre 2016 e 2024



Fonte: Google Earth (2024)

Diante disso, a análise do período desde o surgimento da erosão torna-se um fator chave para compreender a dimensão desse fenômeno. Para essa análise, foram utilizadas imagens de satélite fornecidas pelo Google Earth. Como as erosões iniciaram em diversas épocas, a Tabela

15 foi utilizada para organizar e classificar cada erosão de acordo com sua idade desde o surgimento, com base nas informações apresentadas no tópico 3.1.2. O fator temporal das erosões foi categorizado em 5 classes diferentes, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Categorização do fator “temporal”

TEMPO DESDE O SURGIMENTO	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO DA IDADE DA EROSÃO
Até 1 ano	Muito baixa	1
1 a 2 anos	Baixa	2
2 a 5 anos	Média	3
5 a 10 anos	Alta	4
+10 anos	Muito alta	5

Fonte: Autor

Tabela 15 – Classificação dos pontos para o fator “temporal”

Nº ID	IMAGEM UTILIZADA	SURGIMENTO ESTIMADO	PERÍODO DESDE O SURGIMENTO	CLASSIFICAÇÃO DA IDADE DA EROSÃO
01	abr/24	abr/15	9 anos	4
02	ago/20	jan/16	4,5 anos	3
03	abr/24	jan/13	11,5 anos	5
04	abr/22	jan/20	2,5 anos	3
05	abr/24	jan/24	3 meses	1
06	jun/22	jan/20	2,5 anos	3
07	mai/23	dez/22	6 meses	1
08	mai/23	jan/21	2,5 anos	3

Fonte: Autor

3.3 POTENCIALIDADE EROSIVA

Com os 4 fatores levantados, obtém-se uma tabela com as informações para todos os pontos levantados (Tabela 16). Essa tabela viabilizou a análise multicritérios, uma vez que permitiu extrair de um mesmo ponto, diferentes informações relacionadas a diferentes variáveis.

Tabela 16 – Classificação dos pontos para os 4 fatores

Nº ID	CLASSIFICAÇÃO FATOR REDE	CLASSIFICAÇÃO FATOR SOLO	CLASSIFICAÇÃO FATOR TOPOGRÁFICO	CLASSIFICAÇÃO FATOR TEMPORAL
01	4	2	3	4
02	4	1	2	3
03	2	5	5	5
04	2	3	3	3
05	1	3	2	1
06	3	2	3	3
07	5	3	3	1
08	3	4	2	3

Fonte: Autor

A análise comparativa dessa tabela com a situação real de cada erosão permite identificar qual fator apresenta maior importância e qual apresenta menor importância no desenvolvimento potencial de uma erosão. Para isso, define-se 4 variáveis “peso”, que representam uma parcela multiplicativa de cada fator. Dessa forma, propõe-se neste trabalho a criação de uma equação de potencialidade erosiva (PE), obtida por meio da Equação 12:

$$PE = FR \times P_{fr} + FS \times P_{fs} + FTO \times P_{fto} + FTE \times P_{fte} \quad (12)$$

Na qual:

PE = Potencialidade erosiva;

FR = classificação do fator rede;

P_{fr} = peso do fator rede;

FS = classificação do fator solo;

P_{fs} = peso do fator solo;

FTO = classificação do fator topográfico;

P_{fto} = peso do fator topográfico;

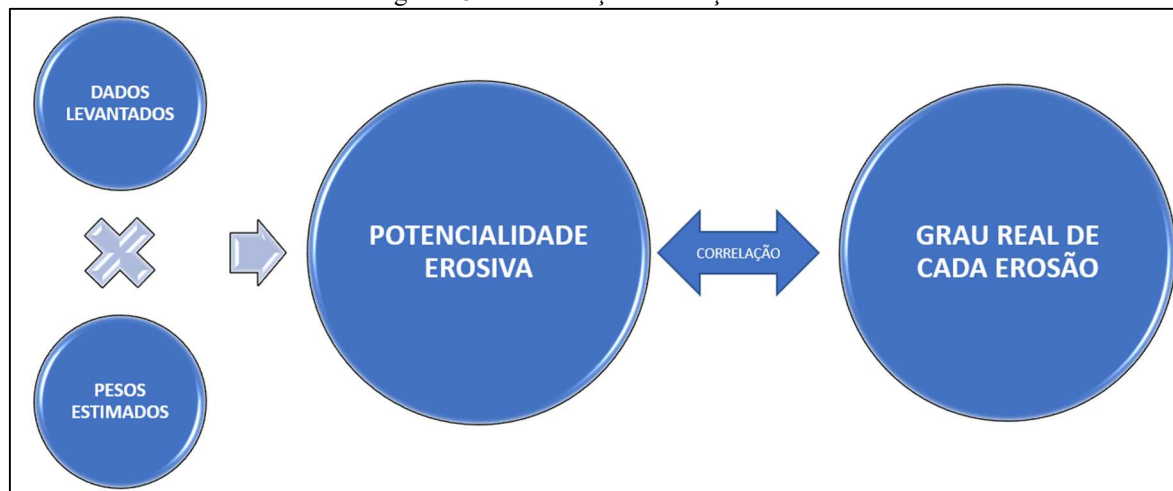
FTE = classificação do fator temporal;

P_{fte} = peso do fator temporal.

As variáveis P_{fr} , P_{fs} , P_{fto} e P_{fte} são inicialmente desconhecidas, e o propósito é que sua variação, através de tentativas, permita a obtenção da melhor relação possível entre os valores “PE” de cada ponto – obtidos pela Equação 12 e os parâmetros da Tabela 16 – e o grau real de cada erosão – disposto na Tabela 3. Conforme sintetizado na Figura 45, essa comparação visa

a identificação dos fatores com maior influência no desenvolvimento de uma erosão de origem pluvial.

Figura 45 – Sintetização da relação obtida



Fonte: Autor

Para verificar a correlação entre as duas variáveis (“potencialidade” e “grau real”), propõe-se a utilização do Coeficiente de Correlação Amostral de Pearson ou coeficiente de correlação “ r ”. Martins (2014) descreve as seguintes características desse coeficiente:

- O coeficiente de correlação assume valores entre -1 e 1;
- Quanto maior for o valor de r , em módulo, maior será o grau de associação linear entre as variáveis;
- Um valor de r positivo indica uma associação linear positiva entre as duas variáveis, isto é, quando os valores de uma das variáveis aumentam, existe tendência para que os valores da outra variável também aumentem. Um valor de “ r ” negativo indica uma associação linear negativa entre as duas variáveis, isto é, quando os valores de uma das variáveis aumentam, existe tendência para que os valores da outra variável diminuam.

Na análise de dados dispostos na forma de duas variáveis, o passo inicial consiste na apresentação desses valores em diagramas de dispersão. A disposição na forma de nuvem de pontos permite uma rápida identificação de uma possível relação de linearidade entre duas variáveis. Dessa forma, para uma análise mais completa dos resultados, propõe-se a realização das seguintes análises:

- Análise individual da relação de linearidade entre cada um dos 4 fatores e o grau de cada erosão;
- Análise manual da relação de linearidade entre a potencialidade erosiva e o grau de cada erosão, assumindo peso 1 para todos os fatores inseridos na equação de potencialidade erosiva (Equação 12).
- Análise manual da relação de linearidade entre a potencialidade erosiva e o grau de cada erosão, assumindo pesos distintos para os fatores inseridos na equação de potencialidade erosiva (Equação 12);
- Análise automatizada da relação de linearidade entre a potencialidade erosiva e o grau de cada erosão, assumindo pesos distintos e a possibilidade de exclusão de uma ou dois pesos.

Todas as análises foram feitas com a utilização do Coeficiente de Pearson e com o auxílio de gráficos de dispersão. QUAGLIO (2021) apresenta que o coeficiente “ r ” pode ser categorizado na forma disposta na Tabela 17. A partir dessa classificação, as relações obtidas nas análises poderão ser classificadas de bem fracas/desprezíveis até bem forte.

Tabela 17 – Classificação do Coeficiente de Pearson

VALOR OBTIDO DO r	RELAÇÃO ENTRE AS DUAS VARIÁVEIS
0,00 a 0,19	Bem fraca/Desprezível
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,690	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Bem forte

Fonte: QUAGLIO (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS DE DISSIPAÇÃO

Embora o foco da metodologia deste trabalho seja a análise dos fatores que contribuem para o processo erosivo de origem pluvial, é de grande relevância a discussão sobre as estruturas de dissipação observadas nas visitas em campo realizadas para coleta de dados e desenvolvimento da metodologia de trabalho. Dessa forma, além dos resultados obtidos pelo desenvolvimento da metodologia, algumas considerações importantes no tocante ao funcionamento das estruturas de dissipação merecem ser discutidas, uma vez que o efeito produzido pelas mesmas não foi incorporado no fator rede, dadas as condições identificadas de inexistência ou precariedade. Para uma análise mais completa dessas estruturas, outros pontos de deságue de redes pluviais foram visitados além dos 8 pontos utilizados para desenvolvimento da metodologia, e em alguns desses pontos foi possível identificar algumas condições que podem até mesmo desencadear o início do processo erosivo conforme descrito a seguir.

Conforme apresentado na Tabela 2 (tópico 3.1.1), 5 dos 8 pontos analisados com processo erosivo já avançado faziam uso de canais com soleiras na dissipação da energia da água pluvial. Descrito no item 2.2.5.4, a estrutura de vertimento dotada de soleira apresenta um bom funcionamento teórico. Contudo, a prática mostra que essas estruturas demandam grande atenção, uma vez que apresentam elevada sensibilidade a dois fatores: falhas na execução e falhas na manutenção.

- Falhas de execução

Como explicado no tópico 2.2.4.4, essas estruturas trabalham com o enchimento do canal e o vertimento da água por uma lâmina pré-fixada em projeto. Dessa forma, a execução de uma soleira em concreto nivelada é de extrema importância, uma vez que qualquer desnível ao longo de seu comprimento pode indicar um ponto de maior concentração do fluxo de água. A partir daí, a criação de um caminho preferencial propicia o surgimento de pequenos sulcos e ravinas no solo, que podem evoluir para uma erosão significativa. Na Figura 46 é possível observar um dissipador de soleira com desnível considerável ao longo da soleira no Loteamento Mansour III, na Zona Oeste de Uberlândia (-18.927441, -48.357266).

Figura 46 – Desnível ao longo da soleira



Fonte: Autor

Em outros casos, a má estruturação da fundação da soleira pode ser responsável pelo seu rompimento e consequente criação de um ponto de vulnerabilidade. A Figura 47 ilustra essa situação, observada no bairro Jardim Holanda (-18.959885, -48.323079).

Figura 47 – Erosão sob a soleira



Fonte: Autor

Em ambos os casos citados as situações observadas foram corrigidas antes que um processo erosivo mais significativo fosse deflagrado.

- Falhas de manutenção

Além do entupimento de galerias e bocas de lobo, descritos no tópico 2.3, o carreamento de resíduos sólidos pelas redes de drenagem é também facilmente observável nas regiões de deságue das redes. Nesse sentido, o canal vertedor se apresenta como uma boa solução, uma vez que o acúmulo de resíduos ao longo do canal possibilita que seja feita a retirada do lixo antes que o mesmo seja direcionado para o corpo hídrico. Contudo, essa manutenção deve ser frequente, uma vez que os elevados volumes de terra e areia que chegam pelas redes de drenagem apresentam a capacidade de rápido enchimento do canal, e com isso a criação de pontos preferenciais de vertimento da água. Essa situação é ainda mais crítica em regiões novas, de recente urbanização, em que a grande quantidade de obras faz com que grandes volumes de areia sejam depositados em frente as construções sem nenhum tipo de barreira que impeça a chuva de realizar seu carreamento até as redes pluviais.

A Figura 48 ilustra a situação de um dissipador no Loteamento Mansour II (-18.925051° , -48.348907°), onde é possível identificar que o volume de terra e areia ao longo do canal é tão grande que impossibilita que a água verta ao longo de todo seu comprimento, apresentando um ponto de concentração do fluxo.

Figura 48 – Canal vertedor com grande volume de terra acumulada



Fonte: Autor

Além do problema de enchimento do canal, o excesso de resíduos que vem pela rede pode provocar ainda um entupimento da estrutura de drenos do canal (Figura 49). Esses drenos, localizados próximos ao fundo da estrutura tem como função realizar o esvaziamento da estrutura após a chuva, não deixando água parada no local. No entanto, a terra que é trazida junto a rede pode provocar o entupimento dos furos, impossibilitando seu esvaziamento.

Figura 49 – Dreno entupido



Fonte: Autor

A Figura 50 ilustra o caso de uma estrutura no bairro São Bento (-18.968379, -48.337405), em que além do fechamento dos drenos por entupimento, foi possível registrar a ocorrência de esgoto na rede de drenagem (problema de ligações cruzadas, descrita no tópico 2.3). Trata-se de uma condição grave, uma vez que mesmo em períodos de seca os canais continuam cheios e com grande volume de esgoto, favorecendo a proliferação de vetores de doenças, como mosquitos e ratos, que podem carregar doenças graves. Além disso, o mau cheiro e a poluição impactam diretamente na qualidade dos moradores próximos e do meio ambiente local.

Figura 50 – Canal com volume de esgoto



Fonte: Autor

Conforme apresentado, as estruturas de dissipação em canal de soleira que vem sendo muito utilizadas em Uberlândia/MG apresentam, em teoria, uma ótima eficiência na dissipação dos escoamentos pluviais. Contudo esses dispositivos demandam de um grande controle na sua fase de execução e também de uma cuidadosa manutenção periódica após sua implantação, uma vez que foi possível identificar em vários casos, que a falha nessas duas etapas é o estopim de um processo erosivo deflagrado pelo volume de água pluvial desaguada nas estruturas.

4.2 ANÁLISE DOS FATORES PREPONDERANTES NAS EROSÕES

Fazendo uso da metodologia apresentada, e tomando como base a Equação 12 e os valores de cada fator apresentados na Tabela 16, pode-se estimar o valor de potencialidade erosiva para os 8 pontos da seguinte forma:

$$PE_{P01} = 4 \times P_{fr} + 2 \times P_{fs} + 3 \times P_{fto} + 4 \times P_{fte}$$

$$PE_{P02} = 4 \times P_{fr} + 1 \times P_{fs} + 2 \times P_{fto} + 3 \times P_{fte}$$

$$PE_{P0} = 2 \times P_{fr} + 5 \times P_{fs} + 5 \times P_{fto} + 5 \times P_{fte}$$

$$PE_{P04} = 2 \times P_{fr} + 3 \times P_{fs} + 3 \times P_{fto} + 3 \times P_{fte}$$

$$PE_{P05} = 1 \times P_{fr} + 3 \times P_{fs} + 2 \times P_{fto} + 1 \times P_{fte}$$

$$PE_{P06} = 3 \times P_{fr} + 2 \times P_{fs} + 3 \times P_{fto} + 3 \times P_{fte}$$

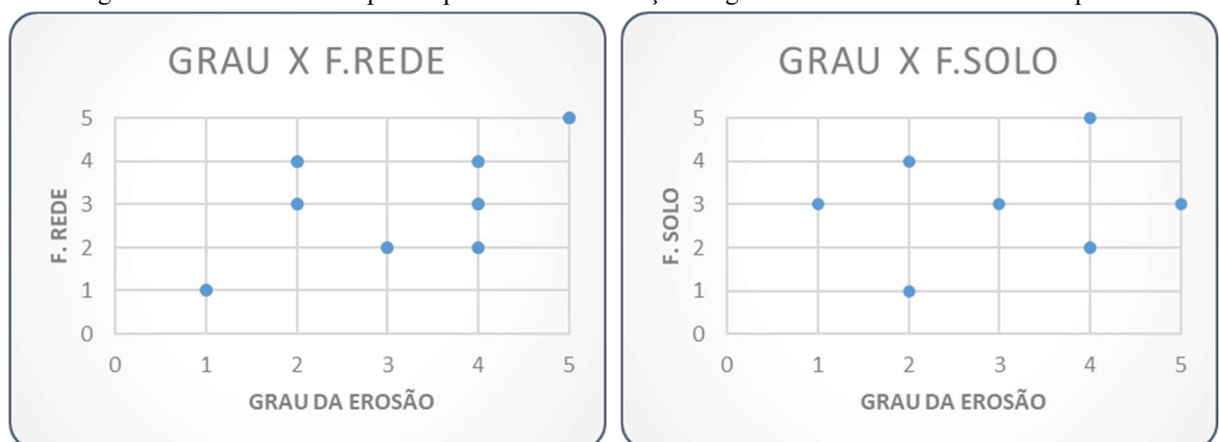
$$PE_{P07} = 5 \times P_{fr} + 3 \times P_{fs} + 3 \times P_{fto} + 1 \times P_{fte}$$

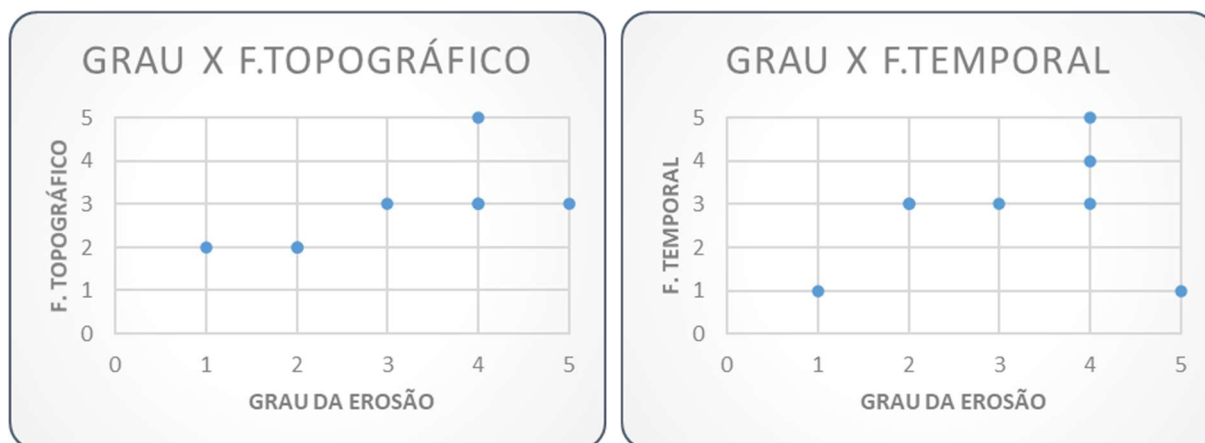
$$PE_{P08} = 3 \times P_{fr} + 4 \times P_{fs} + 2 \times P_{fto} + 3 \times P_{fte}$$

4.2.1 Análise de cada fator como variável independente

Inicialmente, a fim de investigar possíveis relações de linearidade entre a classe atribuída a cada fator, e o grau real de cada erosão de forma isolada, é feito o cálculo do coeficiente de correlação “r” para cada fator de forma independente (fator rede, fator solo, fator topográfico e fator temporal). Essa análise apresentada em forma de gráfico de dispersão é feita na Figura 51.

Figura 51 – Gráficos de dispersão para análise da relação do grau de erosão com cada fator separado





Fonte: Autor

Os valores obtidos de correlação para cada fator são:

- Fator rede – $r = 0,5632$;
- Fator solo – $r = 0,0951$;
- Fator topográfico – $r = 0,6510$;
- Fator temporal – $r = 0,2427$.

A análise desses coeficientes junto a Tabela 17 permite identificar que os fatores rede e topográfico apresentam relação moderada com o grau de cada erosão. Já o fator temporal apresenta relação fraca e o fator solo apresenta relação bem fraca/desprezível.

4.2.2 Análise conjunta dos fatores com mesmo peso

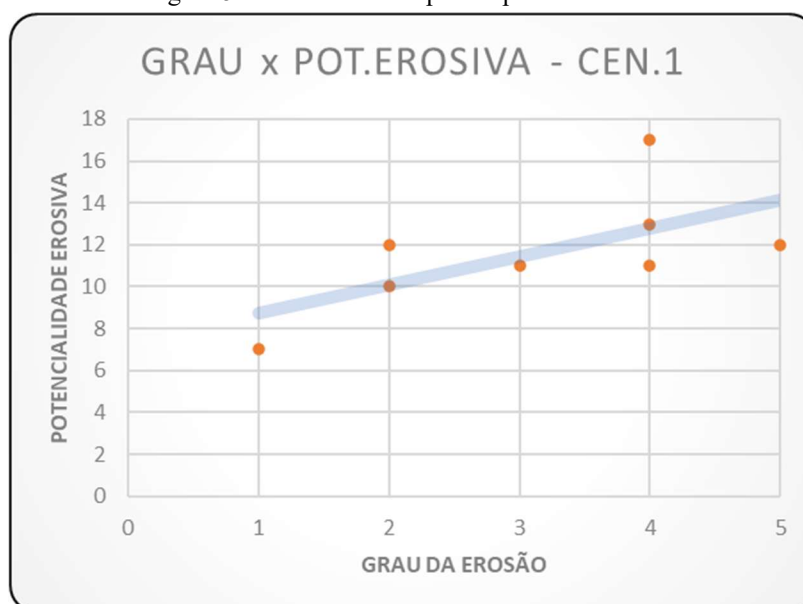
Prosseguindo com a análise manual dos dados, imputa-se o peso 1 para todas as variáveis descritas na equação de potencialidade erosiva. Para esta situação, dá-se o nome “Cenário 1”. Assim, para este cenário, os valores da potencialidade erosiva de cada ponto são apresentados na Tabela 18. Traçando-se o gráfico de dispersão dos pontos, relacionando o grau de erosão com o valor da potencialidade erosiva e inserindo uma linha de tendência linear (Figura 52), é possível identificar uma moderada aglomeração dos pontos junto a linha de tendência. Essa aglomeração mostra que os pontos não se encontram dispersos no gráfico e já começa a indicar a existência de uma relação linear entre as duas grandezas analisadas (grau real da erosão e potencialidade erosiva).

Tabela 18 – Potencialidade erosiva para o Cenário 1

Nº ID	POTENCIALIDADE EROSIVA (Cenário 1)
01	13
02	10
03	17
04	11
05	7
06	11
07	12
08	12

Fonte: Autor

Figura 52 – Gráfico de dispersão para o Cenário 1



Fonte: Autor

A análise conjunta dos 4 fatores com peso semelhante permitiu identificar uma relação moderada ($r = 0,6478$) entre as variáveis “potencialidade erosiva” e “grau da erosão”, conforme classificação da Tabela 17.

4.2.3 Análise conjunta dos fatores com diferentes pesos

A análise com imputação de pesos visa realizar uma aglomeração da nuvem de pontos do gráfico da Figura 52. Ou seja, ao se traçar uma linha de tendência em um gráfico de dispersão com 2 variáveis lineares correlatas, espera-se que os dados se apresentem na forma mais próxima possível de uma reta, o que indica uma correlação forte entre as mesmas.

Desse modo, com auxílio do *software* Microsoft Excel, tentativas foram feitas de forma a se imputar diferentes valores para as variáveis peso, buscando-se sempre um coeficiente de Pearson o mais próximo possível de 1. Buscando facilitar a estimativa dos coeficientes peso, foi proposta a utilização de apenas números inteiros.

Nesta etapa de análise, buscou-se também evitar o uso de valores discrepantes entre as variáveis peso (valores muito altos ou nulos), uma vez que nesta análise a proposta é de que os quatro fatores sejam levados em conta para a obtenção de um gráfico com boa correlação.

Isto posto, após sucessivas tentativas, dois cenários foram propostos, onde foram definidos os seguintes valores para as variáveis peso:

- Cenário 2 - $P_{fr} = 4$; $P_{fs} = 1$; $P_{fto} = 4$; $P_{fte} = 1$.
- Cenário 3 - $P_{fr} = 5$; $P_{fs} = 1$; $P_{fto} = 5$; $P_{fte} = 1$.

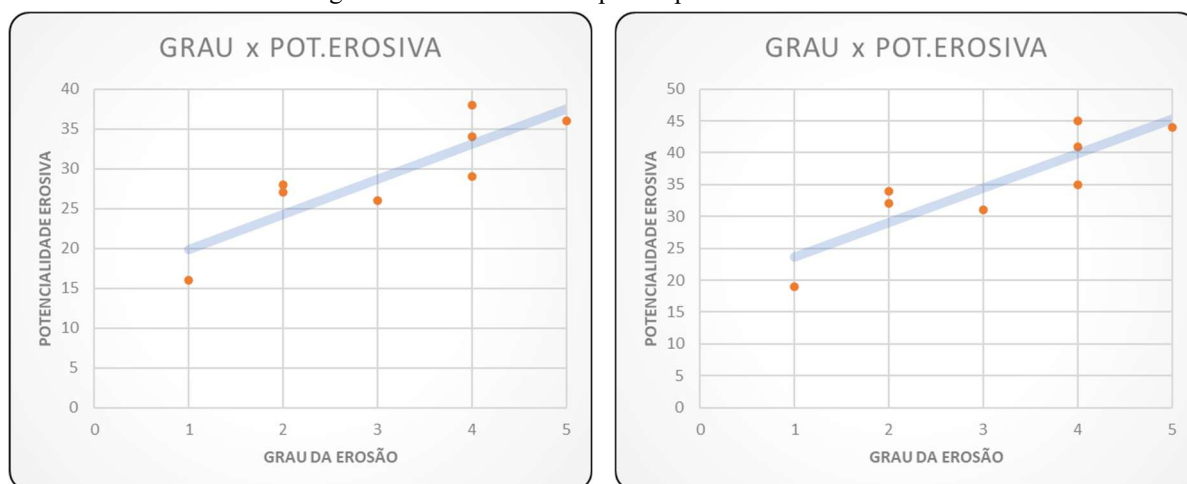
Dessa forma, a Tabela 19 sintetiza os valores de potencialidade erosiva encontradas para os Cenários 2 e 3. Da mesma forma, a Figura 53 apresenta a nuvem de pontos para os dois cenários

Tabela 19 – Potencialidade erosiva para os Cenários 2 e 3

Nº ID	POTENCIALIDA DE EROSIVA (Cenário 2)	POTENCIALIDA DE EROSIVA (Cenário 3)
01	34	41
02	28	34
03	38	45
04	26	31
05	16	19
06	29	35
07	36	44
08	27	32

Fonte: Autor

Figura 53 – Gráficos de dispersão para os Cenário 2 e 3



Fonte: Autor

Para os cenários 2 e 3 os coeficientes de correlação “r” apresentam valores de 0,8609 e 0,8719 respectivamente, o que segundo a Tabela 17 já mostra uma correlação forte (próxima a “bem forte”) entre as variáveis.

Observa-se que ainda na análise conjunta dos fatores com os valores de pesos propostos já identifica uma tendência apresentada no item 4.2.1. Os fatores “rede” e “topográfico” apresentam maior potencial de contribuir para a potencialidade erosiva. Já os fatores “solo” e “temporal” apresentam menor potencial de contribuição no agravamento da erosão pluvial.

4.2.4 Análise conjunta dos fatores de forma automatizada

Considerando que toda análise de dados elaborada até então foi feita de forma manual, propõe-se ainda uma análise automatizada dos dados, na qual são definidos cenários em que, por meio de simulações computacionais, sejam obtidos valores das variáveis peso capazes de otimizar o coeficiente de correlação. Ou seja, a aplicação de métodos numéricos computacionais permite a identificação dos melhores valores dos coeficientes peso para obtenção do maior valor possível correlação “r”. Para essa análise foi utilizado a função *Solver* do *software* Microsoft Excel, que permite a manipulação de múltiplas variáveis simultaneamente.

Assim como proposto anteriormente, foram utilizados apenas números inteiros, buscando facilitar o entendimento e aplicação do método. Além disso, os cenários propostos baseiam-se em duas premissas condicionantes:

- Propõe-se inicialmente o uso de pesos com valores inteiros limitados entre 1 e 10 e posteriormente entre 1 e 100;
- Propõe-se três situações onde duas, uma ou nenhuma variável possa apresentar valor nulo.

Diante disso, a Tabela 20 sintetiza os valores dos coeficientes peso encontrados para as condições propostas e o respectivo valor do coeficiente de correlação.

Tabela 20 – Configuração dos cenários e coeficientes de correlação “ r ”

CENÁRIO	CONDIÇÃO	P_{fr}	P_{fs}	P_{fto}	P_{fte}	r
VALORES DAS VARIÁVEIS DE PESO ALTERNANDO ENTRE 1 E 10						
4	4 variáveis não nulas	8	1	10	1	0,8911
5	3 variáveis não nulas e 1 nula	8	1	10	0	0,9067
6	2 variáveis não nulas e 2 nulas	2	0	3	0	0,9120
VALORES DAS VARIÁVEIS DE PESO ALTERNANDO ENTRE 1 E 100						
7	4 variáveis não nulas	69	1	100	1	0,9100
8	3 variáveis não nulas e 1 nula	68	1	100	0	0,9117
9	2 variáveis não nulas e 2 nulas	31	0	46	0	0,9120

Fonte: Autor

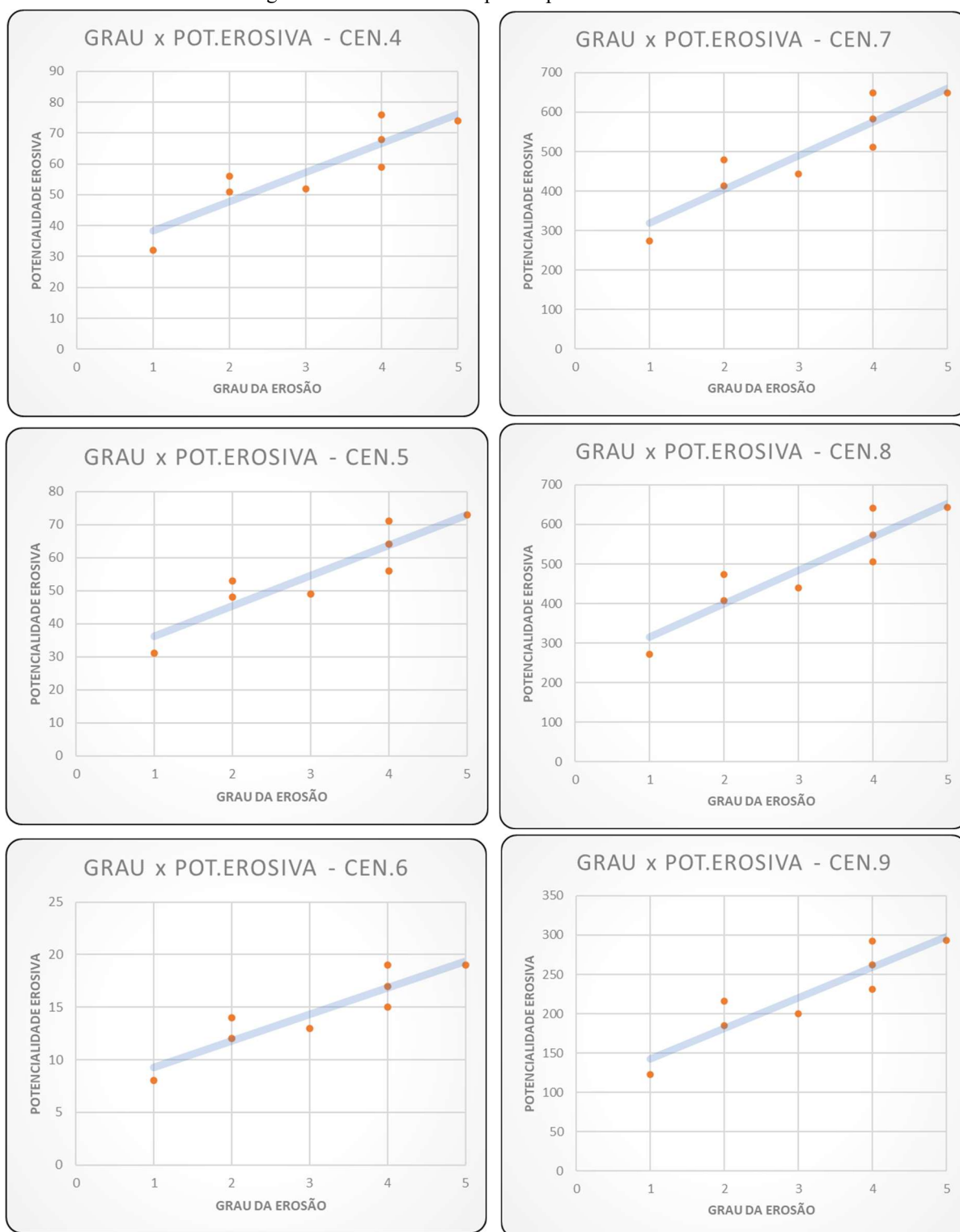
Já a Tabela 21, apresenta os valores de potencialidade erosiva calculada para os 8 pontos com os pesos definidos nos cenários 4 a 9. Elucidando essas informações, a Figura 54 apresenta os gráficos de dispersão para os cenários 4 a 9.

Tabela 21 – Potencialidade erosiva para os Cenários 4 a 9

Nº ID	PE (Cenário 4)	PE (Cenário 5)	PE (Cenário 6)	PE (Cenário 7)	PE (Cenário 8)	PE (Cenário 9)
01	68	64	17	582	574	262
02	56	53	14	480	473	216
03	76	71	19	648	641	292
04	52	49	13	444	439	200
05	32	31	8	273	271	123
06	59	56	15	512	506	231
07	74	73	19	649	643	293
08	51	48	12	414	408	185

Fonte: Autor

Figura 54 – Gráficos de dispersão para os Cenário 4 a 9



Fonte: Autor

É notório que nas simulações automatizadas, o coeficiente de correlação apresentou valores significativamente bons, sendo que em 5 dos 6 cenários simulados, o coeficiente de correlação pode ser classificado como “muito forte” conforme a Tabela 17. Isso mostra que a metodologia desenvolvida apresentou bons resultados, se mostrando uma boa ferramenta na definição dos

parâmetros capazes de prever um aumento em erosões de origem pluvial. No mais, destaca-se que nestes cenários os resultados obtidos já mostram uma tendência observada nas análises iniciais do tópico 4.2.1, que mostrou que os fatores “solo” e “temporal” representaram menor parcela de relevância no método

4.2.5 Análise geral dos resultados obtidos

As análises dos resultados foram feitas de diferentes formas, objetivando a apresentação de cenários com diferentes condições. Em todas as análises descritas nos tópicos 4.2.1 a 4.2.4 foi utilizado o *software* Microsoft Excel, sendo que para as análises dos tópicos 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 os valores foram trabalhados de forma manual. Já para a análise do tópico 4.2.4 foi feita uma atualização com a função “*solver*” do programa (Figura 55).

Figura 55 – Recorte do Excel utilizado para elaboração das análises

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ID	DESCRICAO	FR	FS	FTO	FTE		PE	GRAU	
2	1	BALAIADAS	4	2	3	4		68	4	
3	2	INTEGRAÇÃO	4	1	2	3		56	2	
4	3	BOMJARDIM	2	5	5	5		76	4	
5	4	JDBOTANICO	2	3	3	3		52	3	
6	5	PEQUIS	1	3	2	1		32	1	
7	6	JDHOLANDA1	3	2	3	3		59	4	
8	7	JDHOLANDA2	5	3	3	1		74	5	
9	8	MONTEHEBRON	3	4	2	3		51	2	
10								r =	0,89108486	
11		FATOR	FR	FS	FTO	FTE				
12		PESO	8	1	10	1				
13										
14										
15	FR = 1		1	0	0	0				
16	FS = 1		0	1	0	0				
17	FTO = 1		0	0	1	0				
18	FTE = 1		0	0	0	1				
19										
20	FR=FS=FTO=FTE=1		1	1	1	1		1	0,6478	moderada
21										
22	bom valor 1 a 10		4	1	4	1		2	0,8609	forte
23	bom valor 1 a 10		5	1	5	1		3	0,8719	forte
24										
25	pesos 1 a 10		8	1	10	1		4	0,8911	forte
26	pesos 1 a 10 com 0		8	1	10	0		5	0,9067	bem forte
27	pesos 1 a 10 com 0 e 0		2	0	3	0		6	0,9120	bem forte
28	pesos 1 a 100		69	1	100	1		7	0,9100	bem forte
29	pesos 1 a 100 com 0		68	1	100	0		8	0,9117	bem forte
30	pesos 1 a 100 com 0 e 0		31	0	46	0		9	0,9120	bem forte
31										

Fonte: Autor

A observação inicial de cada fator de forma isolada permitiu identificar uma moderada correlação entre os fatores “rede” e “topográfico”, já dando indícios de que esses fatores apresentariam maior relevância na metodologia desenvolvida. Já a análise conjunta dos fatores com mesmo peso (Cenário 1), embora não tenha apresentado resultados satisfatórios, foi importante na apresentação inicial da aplicação da Equação 12. Por fim, a análise conjunta dos fatores, feita de forma manual (Cenários 2 e 3) e automatizada (Cenários 4 a 9), demonstrou ótimos resultados, com o índice de correlação apresentando valores classificados como “forte” em 3 cenários e “muito forte” em 5 conforme classificação da Tabela 17.

Diferentemente de vários estudos observados na literatura, a análise das feições erosivas neste trabalho apresenta duas características peculiares: o estudo foi elaborado envolvendo a influência de drenagem pluvial sobre o escoamento da bacia e teve todo seu desenvolvimento dentro do perímetro urbano da cidade de Uberlândia/MG. A utilização do perímetro urbano como área de estudo representa uma região de análise pequena se comparada a estudos de grandes macrobacias hidrográficas, como a do Rio Ibicuí/RS, apresentada por Dias (2021), ou o estudo apresentado por Pereira (2021), que abordou o mapeamento de voçorocas em toda a extensão do Município de Uberlândia. Além disso, enquanto em grande parte estes estudos trabalham na combinação de diferentes fatores para elaboração de mapas de suscetibilidade erosiva, a metodologia desenvolvida buscou quantificar esses fatores de modo a se obter a melhor relação possível entre a potencialidade erosiva calculada e a observada em campo. Como exemplo disso, além dos trabalhos apresentados por Dias (2021) e Pereira (2021), diversos outros autores trabalharam na elaboração de mapas de suscetibilidade erosiva como Dotto (2023), Raspini (2017) e Pavanin (2017).

Apesar dessas diferenças, realizar uma comparação entre os métodos desenvolvidos é de grande interesse, especialmente na verificação da escolha dos fatores utilizados. Embora alguns autores, como Lima (2014), Demarchi e Zimback (2014) e Mannigel (2002) apresentem estudos específicos e aprofundados mostrando a mensuração da erodibilidade a partir da caracterização do solo, outros autores como Oliveira (2020) e Dias (2021) partiram para investigações multidisciplinares no diagnóstico de processos erosivos.

Oliveira (2020) utilizou como base para seu estudo análises relacionadas a 5 fatores: clima, geomorfologia, solo, cobertura vegetal e uso do solo. Já no estudo apresentado por Dias (2021) foi feito um levantamento para definição dos fatores que geralmente estão relacionados à

suscetibilidade, fragilidade e/ou vulnerabilidade das áreas de estudo (áreas com processos erosivos). Esse levantamento foi feito com base em 55 artigos publicados em revistas nacionais com Qualis A1 a B2, entre os anos de 2005 e 2020, que tinham como objetivo o estudo da erosão sob diversas formas, tendo os processos erosivos sido relacionados a seis grupos: Relevo (55x), Solos (53x), Uso e Ocupação (23x), Geologia (30x), Clima (24x) e Vegetação (26x).

Conforme demonstrado no levantamento feito por Dias (2021), a escolha pelos fatores “solo” e “topográfico” neste trabalho foi ao encontro do que é amplamente abordado nos estudos que fazem uso de análises multidisciplinares dos processos erosivos. Já a inclusão dos fatores “rede” e “temporal” foram apresentados em uma abordagem diferente da usual, mas contribuem significativamente para uma compreensão mais abrangente e dinâmica dos processos erosivos relacionados ao deságue de redes pluviais. A inclusão destes fatores amplia o escopo tradicional da análise, não focando apenas em fatores estáticos relacionados as características das regiões existentes, mas também em fatores mais dinâmicas como a vazão escoada em uma rede pluvial.

5 CONCLUSÕES

Alinhado ao objetivo principal deste trabalho, que foi propor uma metodologia para identificar o potencial de agravamento das erosões causadas por deságues de redes de drenagem pluvial, o método desenvolvido apresentou resultados estatisticamente satisfatórios. Os valores do Coeficiente de Correlação Amostral de Pearson entre 0,86 e 0,92 obtidos para os cenários 2 a 9 identificam que os fatores levantados puderam ser considerados como bons indicadores do desenvolvimento dos processos erosivos de origem pluvial. O método demonstrou que para as 8 erosões oriundas de redes de drenagem utilizadas como amostragem, fatores como o volume pluvial escoado e a cota do lançamento em relação ao corpo hídrico apresentaram maior impacto no desenvolvimento e crescimento das voçorocas. Já o tempo corrido desde o início do processo erosivo e o tipo de solo encontrado nas erosões não demonstraram apresentar a mesma influência.

É importante reforçar que o método foi desenvolvido a partir de erosões já deflagradas. A menor influência do fator “solo” foi observada no desenvolvimento da erosão, mas é sem dúvidas um fator de grande importância na escolha de uma eficaz estrutura de dissipação. A busca pela melhor solução de engenharia deve ser sempre o objetivo de um projeto e o estudo dos fatores apresentados neste trabalho é de suma importância nas concepções de drenagem pluvial. Não existe um melhor modelo de dissipador de energia, mas a melhor solução passa por uma análise técnica cuidadosa, que considera fatores hidráulicos, geotécnicos e ambientais. Sem uma correta dissipação, o escoamento pluvial pode ser o responsável pela desestabilização de margens de rios e córregos, carreamento de resíduos e devastação da fauna e floral local. Somente um estudo aprofundado é capaz de detalhar uma solução que garanta um funcionamento eficiente, seguro e sustentável. Assim, além da mitigação de danos, essas estruturas se tornam um elo entre engenharia civil e meio ambiente.

Dessa forma, reforça-se através deste estudo a necessidade de desenvolvimento de trabalhos focados nessa vertente do saneamento. A drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas devem ser tratados com elementos essenciais no planejamento urbano e no saneamento de uma cidade, especialmente no contexto da atualidade, em que é crescente a busca por modelos de cidades sustentáveis, seguras e adaptadas ao meio ambiente.

Como contribuição para trabalhos futuros, sugere-se:

- A aplicação de análise multicritérios em feições erosivas tem ganhado destaque na literatura. Contudo, a análise dos fenômenos erosivos frente aos escoamentos pluviais ainda é pouco abordada. Em virtude disso, este trabalho apresentou grande foco no desenvolvimento da metodologia e nas dificuldades de obtenção dos dados, tanto em campo quanto em ambiente digital. Desse modo, o enfoque no desenvolvimento da metodologia acabou resultando em espaço amostral reduzido de pontos. Sendo assim, para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de um maior número amostral, uma vez que isso contribuirá para uma maior robustez nos resultados. Além disso, um conjunto amostral mais extenso permite a redução de influência de flutuações aleatórias, contribuindo para uma estimativa mais estável dos parâmetros;
- A análise dos fatores “rede” e “solo” foram feitas através de métodos derivados de outros estudos e por esta razão podem ser ajustadas ou adaptadas na otimização do trabalho. Como exemplo, o uso de uma base de dados de solos da região de estudo possibilitaria a eliminação da parte laboratorial do estudo, possibilitando um foco maior no desenvolvimento do método e no levantamento de amostras/pontos;
- Os 4 fatores propostos na identificação das expansões erosivas foram definidos através de estudos e na experiência prática adquirida no dia a dia com redes de drenagem. Contudo, o estudo das erosões pluviais não deve estar focado apenas nesses fatores, uma vez que a análise desses fenômenos pode ser feita sob diferentes óticas, abordando por exemplo outras características relativas às regiões de deságue, como relevo ou vegetação;
- O desenvolvimento da metodologia foi feito com base na dimensão das erosões em escala linear. Conforme apontado na identificação e caracterização dos pontos de erosão, é possível o desenvolvimento de um método a partir de outras características, como sua dimensão em área ou volume ou até mesmo em relação a sua intensidade ao longo do tempo.

Além da análise do método proposto, o estudo das estruturas de dissipação foi feito dentro dos resultados do trabalho objetivando demonstrar os cuidados necessários de serem tomadas com os deságues de drenagem pluvial. A disciplina, muitas vezes posta em quarto plano dentro do saneamento, tem ganhado maior destaque nas últimas décadas. Aliado a isso, a necessidade de

preservação dos corpos hídricos mostra que os sistemas de dissipação e as redes de drenagem pluvial devem apresentar cada vez menor impacto nas Áreas de Proteção Permanente (APP's).

Por fim, tendo em vista a metodologia proposta e considerando-se os cuidados reportados na implantação de estruturas de dissipação, fica também como sugestão para trabalhos futuros:

- Considerando que neste trabalho foi feita a identificação de dois fatores preponderantes no crescimento das erosões de origem pluvial (“rede” e “topografia”), sugere-se que as estruturas de dissipação sejam melhor estudadas frente a estes dois parâmetros.

É possível propor a identificação de quais as melhores estruturas de dissipação para redes com elevado volume pluvial e quais as melhores práticas em redes com volumes menos consideráveis.

Além disso, estudos mais específicos sobre as cotas de lançamento das redes pluviais e seus impactos nos corpos hídricos, podem identificar que, ainda que apresentem boa dissipação de energia, redes com cotas elevadas podem apresentar elevada energia cinética capaz de agravar processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERO ENGENHARIA. **O que é: Álgebra de Mapas.** Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-algebra-de-mapas/> Acesso em 09 Jun. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2025. 14p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8890: tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário - requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2020. 35p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10844: instalações prediais de águas pluviais.** Rio de Janeiro, 1989. 13p

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. **Norma DNIT 022 de 2023. Drenagem – Dissipadores de energia – Especificação de serviço.**

BRASIL. **Lei Nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2007.

BRASIL. **Lei Nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020.

BEDUSCHI, Luís. **Manual de drenagem:** Caderno 1. Blumenau: Prefeitura de Blumenau, 2020

BELLO, I. P. **Regionalização de Chuva Intensa para o Estado de Minas Gerais.** Lavras, 2018

BEVEN, K J, **Rainfall-runoff modelling: the Primer**, Wiley, Chichester. 2012
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>

BRIAUD, Jean-Louis. **Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils**. John Wiley & Sons, 2023.

CARDOSO, Carlos HA; GENOVEZ, Ana IB; GENOVEZ, Abel M. **Eficiência de captação de águas pluviais em boca-de-lobo com defletores**. 2003. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.

CBN – Rádio e Televisão CBN. Forte chuva deixa uma pessoa morta em Uberlândia (MG) neste domingo. CBN. 24 nov. 2024. Disponível em: <https://cbn.globo.com/brasil/noticia/2024/11/24/forte-chuva-deixa-uma-pessoa-morta-em-uberlandia-mg-neste-domingo.ghtml> . Acesso em: 21 jun. 2025.

CICLO VIVO. **Morador de Blumenau instala sistema que barra resíduos em bueiro**. 13 nov. 2018 Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/design/bueiro-lixo-sistema-blumenau/> Acesso em: 27 Abr. 2024

COPERNICUS. **A European wide-swath, high-resolution, multi-spectral imaging mission**. Disponível em: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2> Acesso em: 27 Mai. 2025

DE ABREU, Elivania Silva; DA SILVA, Izanilde Barbosa; THOMAS, Habila Yusuf. **Drenagem de águas pluviais e uso de técnicas de geoprocessamento para avaliação de indicadores de saneamento básico no Município de Macapá-AP;**

DE OLIVEIRA SILVA, Nilton Ricardo; TEIXEIRA, Luiza Carla Girard Mendes. **O cenário legislativo brasileiro no uso de tecnologias de Low Impact Development'(LID) em drenagem urbana**. Labor e Engenho, v. 17, p. e023013-e023013, 2023. <https://doi.org/10.20396/labore.v17i00.8673911>

DE SOUZA, Talita Silvia et al. **Estudos de tecnologias em Sponge City para drenagem da água pluvial: aplicação no Rio Arrudas em BH**. 2020.

DEMARCHI, Julio Cesar; ZIMBACK, Célia Regina Lopes. **Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas**. Energia na Agricultura, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014.

<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p102-114>

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos Piracicaba**: ESALQ, 1990. 81p. Tese de Doutorado.

DEP – DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS DA PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Plano Diretor de Drenagem Urbana – Manual de Drenagem Urbana**. Porto Alegre, 2005

DIAS, Daniéli Flores et al. **Utilização da análise hierárquica ponderada para o estudo dos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Ibicuí–RS**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

DOS SANTOS, Daniel Britto; DALLMANN, Daiane Kath; LEANDRO, Diuliana. **Uso e ocupação do solo no município de Cristal/RS**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 10, n. 2, p. 340-350, 2019.

DOTTO, Antônio Von Ende; GABERTI, Marinéli Moraes; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. **Aplicação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) para o Mapeamento de Suscetibilidade ao Voçorocamento no município de Capão do Cipó–RS/Brasil**. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia, n. 60, 2023.

<https://doi.org/10.4000/confins.53318>

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição. Brasília/DF, 2018

FARMONAUT. **NDWI Range Explained: Boost Water Management Accuracy**. Disponível em: <https://farmonaut.com/remote-sensing/ndwi-range-explained-boost-water-management-accuracy>. Acesso em: 27 maio 2025.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Orientações básicas para drenagem urbana**. Belo Horizonte, FEAM, 2006

FOREST GIS. **Mapa índice TOPODATA: seu MDE nacional pronto para download.** Forest-GIS, 06 maio 2024. Disponível em: <https://forest-gis.com/2024/05/mapa-indice-topodata.html>. Acesso em: 02 jun. 2025.

FRAGASSI, Plínio Fabrício Mendonça. **Estudo da Erodibilidade dos solos Residuais de Gnaise da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG).** 2001.

FREIRE, Josefa Rafaela Pessoa et al. **Análise do sistema separador absoluto no âmbito da drenagem pluvial da cidade de Campina Grande-Estudo de caso do Canal das Piabas.** 2014.
<https://doi.org/10.5902/2236130815178>

FREITAS, Clarissa; GOMES, Viridiana Gabriel; BORGES, Marcos. **Planejamento urbano com uso de sistema de informação geográfica: o caso de Feira de Santana, BA.** Universitas: Arquitetura e Comunicação Social, v. 10, n. 1, 2013.
<https://doi.org/10.5102/uc.v10i1.1947>

GOOGLE EARTH. **Google Earth.** Mountain View, CA: Google, [2025]. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

GORELICK, Noel et al. **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.** Remote sensing of Environment, v. 202, p. 18-27, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Gubianisolos. **Determinar classe textural e o tipo de solo.** Disponível em: <https://gubianisolos.blogspot.com/2014/03/classe-textural-e-tipo-de-solo.html> Acesso em 26 Abr. 2025

HENRIQUES, Tânia Margarida Sequeira. **Dimensionamento de obras de dissipação de energia em drenagem de vias de comunicação.** 2014. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro. IBGE, 2022

IDE SISEMA - INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Existência de Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (PDDMAPU)**. Brasília, 2022

IDE SISEMA - INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Mapa de solos de Minas Gerais**. Brasília, 2010

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Topodata: Modelo Digital de Elevação SRTM**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

IFSC. *Textura do Solo*. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/joao.quoos/textura_solo/textura.html. Acesso em: 6 jun. 2025.

JESUS, Andreilisa Santos de. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis-GO**. 2013.

KIRPICH, T.P. **Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds**. J. of Civ. Eng., v.10, n.6, p. 362, 1940.

KSHETRI, Tek. **NDVI, NDBI & NDWI calculation using landsat 7, 8**. GeoWorld, v. 2, p. 32-34, 2018.

LIMA, César Gustavo da Rocha et al. **Metodologias Indiretas De Mensuração Da Erodibilidade Do Solo E Caracterização Da Variabilidade Espacial**. 2021.

MANNIGEL, Anny Rosi et al. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo**. 2008.

<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>

MARTINS, Francisco José Paulos. **Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais**. 2000. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Especialidade de Hidráulica e Recursos Hídricos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MARTINS, Maria Eugénia Graça; RODRIGUES, J. F. **Coefficiente de correlação amostral**. Revista de Ciência Elementar, v. 2, n. 2, p. 34-36, 2014.
<https://doi.org/10.24927/rce2014.042>

MENDES, Alesi Teixeira; SANTOS, Gesmar Rosa dos. **Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?**. 2022.
<https://doi.org/10.38116/td2791>

MENESES, P. R., & ALMEIDA, T. (2012). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto (1a ed.)**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 266 p.

NEVES, Marllus Gustavo Ferreira Passos das. **Quantificação de resíduos sólidos na drenagem urbana**. 2006.

OLIVEIRA, Felipe Ferreira; ARAUJO, RC de. **Uso de investigação multidisciplinar para diagnóstico de processos erosivos lineares urbanos em uma voçoroca no bairro do Bequimão–São Luís-MA**. Geografia Ensino e Pesquisa, Santa Maria/RS, v. 22, n. 38, p. 1-30, 2020
<https://doi.org/10.5902/2236499437160>

OSGEO. **Announcing the release of QGIS 1.0 ‘Kore’**. Disponível em: <https://lists.osgeo.org/pipermail/qgis-developer/2009-January/005774.html> Acesso em: 20 Mai. 2024

PAVANIN, Erich Vectore et al. **Geoprocessamento aplicado ao diagnóstico de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do córrego Guaribas em Uberlândia–MG**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 3, n. 2, p. 24-38, 2016.
<https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n2p24-38>

PEREIRA, Juliana Sousa et al. **Mapeamento das voçorocas e análise da susceptibilidade erosiva no município de Uberlândia, MG.** 2021.

PICCOLI, MARIANA. **Reservatório de retenção de águas pluviais em áreas urbanas.** 2017.

POLIDORO, M. et al. **Análise dos índices de impermeabilização do solo utilizando geoprocessamento: proposta de atualização do Decreto n.º 402/1980 para projetos de drenagem no município de Londrina – PR.** *Seminário de Iniciação Científica da UEL*, 2013.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Prefeitura anuncia projeto para reduzir em 4 vezes impacto da chuva na Rondon Pacheco. **Prefeitura de Uberlândia**, 9 fev. 2022. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2022/02/09/prefeitura-anuncia-projeto-para-reduzir-em-4-vezes-impacto-da-chuva-na-rondon-pacheco/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Prefeitura interliga bolsões no Morumbi e amplia capacidade de drenagem pluvial no Setor Leste. **Prefeitura de Uberlândia**, 1 out. 2024. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2024/10/01/prefeitura-interliga-bolsoes-no-morumbi-e-amplia-capacidade-de-drenagem-pluvial-no-setor-leste/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Prefeitura realiza últimos reparos e finaliza obra da represa do Camaru. **Prefeitura de Uberlândia**, 25 set. 2024. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2024/09/25/prefeitura-realiza-ultimos-reparos-e-finaliza-obra-da-represa-do-camaru/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Prefeitura apresenta Plano de Emergência Pluviométrica (PEP) 2024/2025. **Prefeitura de Uberlândia**, 21 nov. 2024. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2024/11/21/prefeitura-apresenta-plano-de-emergencia-pluviometrica-pep-2024-2025/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Prefeitura realiza primeiro disparo real do novo alerta da Defesa Civil de eventos climáticos em Uberlândia. **Prefeitura de Uberlândia**, 14 fev. 2025. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/02/14/prefeitura-realiza-primeiro->

[disparo-real-do-novo-alerta-da-defesa-civil-de-eventos-climaticos-em-uberlandia/](#). Acesso em: 21 jun. 2025.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Dmae oficializa ordem de serviço para elaboração do novo Plano Diretor de Drenagem Pluvial. **Prefeitura de Uberlândia**, 06 ago. 2025. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/08/06/dmae-oficializa-ordem-de-servico-para-elaboracao-do-novo-plano-diretor-de-drenagem-pluvial/>. Acesso em: 13 set. 2025.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. Secretaria de Planejamento Urbano. **Prefeitura de Uberlândia** Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/secretarias/planejamento-urbano/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

QGIS. **Commercial support.** Disponível em: https://www.qgis.org/en/site/forusers/commercial_support.html Acesso em: 20 Mai. 2024

QUAGLIO, Gislaine. *Prática 4 - Inferencial*. 2021. Disponível em: https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/723801_7fdf3b36c59941bfb5b9f2af41d0abf3.html. Acesso em: 1 jun. 2025.

RASPINI, Jéssica Prats. **Proposta de metodologia de estudo da vulnerabilidade ambiental aos desastres naturais-caso rodovia BR-280, em Santa Catarina**. 2017.

SUDERHSA – SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO. **Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002.

TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, José Luiz Ioriatti; DEMATTÊ, José Alexandre Melo. **Teor e distribuição da matéria orgânica em Latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central**. Scientia Agricola, v. 55, n. 3, p. 343-354, 1998.
<https://doi.org/10.1590/S0103-90161998000300001>

TUCCI, C.E.M. (1993), **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH:EDUSP. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v:4.

TUCCI, C.E.M. (1997), **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção**. RBRH, Vol 2, jul./dez.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v2n2.p5-12>

TUCCI, C. E. M. (2016), **Regulamentação da drenagem urbana no Brasil**. Revista de Gestão de água da América Latina, v. 13, n. 1, p. 29-42, 2016.

<https://doi.org/10.21168/reg.v13n1.p29-42>

UBERLÂNDIA. **Lei Nº 12.622**, de 18 de janeiro de 2017. Altera a Lei nº 11.451 de 2 de agosto de 2013, que “Dispõe sobre a estrutura administrativa da Secretaria Municipal de Obras” e dá outras providências. Uberlândia, MG: Diário Oficial do Município, 2017

UDDIN, S. et al. **A remote sensing classification for land-cover changes and micro-climate in Kuwait**. International Journal of Sustainable Development and Planning, v. 5, n. 4, p. 367-377, 2010.

<https://doi.org/10.2495/SDP-V5-N4-367-377>

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Texture Triangle**. Washington, D.C., 1999. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/soil-texture-triangle.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ANEXO A – Resultados ensaios de solos

			JDHOLANDA1	JDHOLANDA2	MONTEHEBRON	PEQUIS	BOMIARDIM	BALAIADAS	JDBOTANICO	INTEGRAÇÃO
			Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F	Amostra G	Amostra H
ENSAIO UNIDADE	Recip. 1	Nº recp.	27	15	119	235	22	272	22	235
		M1 (g) =	28,5	32,8	29,99	36,87	32,71	27,05	32,56	31,79
		M2 (g) =	28,28	32,65	29,44	36,75	30,01	26,37	32,54	31,76
		M3 (g) =	11,17	7,33	15,65	15,86	12,36	14,5	12,36	15,86
	Recip. 2	Nº recp.	172	62	172	265	44	276	44	265
		M1 (g) =	34,67	33,52	36	33,08	30,84	29,85	33,96	27,66
		M2 (g) =	38,45	33,36	35,17	32,98	28,84	29,12	33,94	27,66
		M3 (g) =	15,3	11,98	14,9	15,13	15,01	15,47	15,01	15,12
	Recip. 3	Nº recp.	176	162	194	266	68	284	68	272
		M1 (g) =	31,1	34,53	30,82	36,6	25,04	31,6	21,7	26,46
		M2 (g) =	30,78	34,38	30,22	36,47	23,23	30,85	21,7	26,43
		M3 (g) =	13,63	14,85	14,57	14,44	10,62	16,02	10,68	14,5
	RECIP. 1	w1 =	0,0129	0,0059	0,0399	0,0057	0,1530	0,0573	0,0010	0,0019
	RECIP. 2	w2 =	-0,1633	0,0075	0,0409	0,0056	0,1446	0,0535	0,0011	0,0000
	RECIP. 3	w3 =	0,01866	0,00768	0,03834	0,00590	0,14354	0,05057	0,00000	0,00251

*possível erro de leitura no W2 para o solo A. Valor descartado e utilizado média de w1 e w2

PENEIRAMENTO GROSSO	Mt (g) =	1000	1000,1	1000,8	1000,3	1000,5	1000	1000,2	1000,5
	50	0	0	0	0	0	0	0	0
	38	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	11,3	0	0	13,1	0
	9,52	35,41	0,77	10,2	11,3	1,5	2,7	56,7	6,9
	4,76	80,35	3,95	43,3	16,5	12,6	48,8	122,8	104,1
	2 (Mg) =	143,46	44,25	132,7	28,9	44,4	135,2	228,1	320,3
	PASSANTE	856,54	955,85	868,1	971,4	956,1	864,8	772,1	680,2

PENEIRAMENTO FINO	1,2	0,615	1,26	1,8	1,4	3,5	3,6	0,14	2,41
	0,6	3,642	4,176	4,1	5	7,2	8,3	0,96	11,34
	0,42	8,511	9,935	7,3	11,7	10,5	15,7	2,45	20,09
	0,25	16,912	29,783	12,2	31,4	17,4	25,2	12,08	26,91
	0,15	53,647	56,631	38,4	63,3	40	32,3	38,36	43,98
	0,075	78,526	91,422	64	98,4	52,3	39,1	76,24	50,01
	PASSANTE*	83,704	100,802	76,4	106,2	55,8	41,3	87,73	52,48

SEDIMENTAÇÃO	Mw (g) =	120,18	120,03	120	120,02	120,01	120,02	120,14	120,03
	Dia	12/09/2024	12/09/2024	20/10/2024	20/10/2024	20/10/2024	12/09/2024	20/11/2024	20/11/2024
	Início	08:48	09:20	08:34	08:49	09:07	09:25	07:37	07:53
	Densim. Nº=	7	7	7	7	7	7	7	7
	0,5 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,026	26,5 1,015	26 1,029	26 1,015	26 1,036	26,5 1,043	26,5 1,044
	1 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,022	26,5 1,012	26 1,0265	26,5 1,01	26 1,032	26,5 1,04	26,5 1,04
	2 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,02	26,5 1,011	26 1,024	26 1,008	26 1,03	26,5 1,037	26,5 1,038
	4 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,019	26,5 1,011	26 1,0215	26 1,0075	26 1,028	26,5 1,035	26,5 1,036
	8 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,018	26,5 1,01	26 1,0205	26 1,007	26 1,027	26,5 1,0335	26,5 1,035
	15 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,015	26,5 1,009	26 1,02	26 1,007	26 1,025	26,5 1,033	26,5 1,0345
	30 min	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,015	26,5 1,008	26 1,019	26 1,007	26 1,023	26,5 1,031	26,5 1,034
	1 h	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,013	26,5 1,007	26 1,019	26 1,0065	26 1,0225	26,5 1,03	26,5 1,033
	2 h	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,012	27 1,007	26 1,0185	26 1,006	26 1,02	26,5 1,0295	26,5 1,0315
	4 h	Temp (°C) = Densim. =	27,5 1,0105	27,5 1,006	26 1,0175	26 1,006	26 1,019	27 1,028	27 1,0095
	8 h	Temp (°C) = Densim. =	28 1,009	28 1,005	24,5 1,0175	26 1,0055	26 1,017	27 1,027	27 1,008
	24 h	Temp (°C) = Densim. =	26,5 1,0085	26,5 1,0048	24,5 1,0165	24,5 1,005	24,5 1,0155	26,5 1,0265	26,5 1,027

RESUMO	Mt (g) =	1000	1000,1	1000,8	1000,3	1000,5	1000	1000,2	1000,5
	Mg (g) =	143,46	44,25	132,7	28,9	44,4	135,2	228,1	320,3
	w (g) =	0,0158	0,0070	0,0397	0,0057	0,1470	0,0538	0,0007	0,0015
	Ms (g) =	999,865044	1000,03281	1000,4553	1000,24416	999,0962	999,53516	1000,19473	1000,49002
	Mw (g) =	120,18	120,03	120	120,02	120,01	120,02	120,14	120,03

CURVA [% passante] - eixo Y	TIPO	D (mm)	JDHOLANDA1	JDHOLANDA2	MONTEHEBRON	PEQUIS	BOMIARDIM	BALAIADAS	JDBOTANICO	INTEGRAÇÃO
			Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F	Amostra G	Amostra H
	PENEIRAMENTO GROSSO	50	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
		38	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
		25	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
		19	100,000	100,000	100,000	98,870	100,000	100,000	98,690	100,000
		9,52	96,459	99,923	98,980	98,870	99,850	99,730	94,331	99,310
		4,8	91,964	99,605	95,672	98,350	98,739	95,118	87,722	89,595
	PENEIRAMENTO FINO	2	85,652	95,575	86,736	97,111	95,556	86,474	77,194	67,986
		1,2	85,214	94,572	85,434	95,978	92,765	83,879	77,104	66,621
		0,6	83,056	92,250	83,771	93,065	89,815	80,490	76,578	61,563
		0,42	79,585	87,664	81,458	87,643	87,183	75,156	75,620	56,606
		0,25	73,597	71,858	77,914	71,703	81,681	68,307	69,433	52,743
		0,2*	60,504	61,169	68,442	58,797	72,670	65,748	60,990	47,909
	SEDIMENTAÇÃO	0,15	47,412	50,479	58,969	45,890	63,660	63,189	52,547	43,075
		0,075	29,678	22,774	40,458	17,489	53,852	58,287	28,207	39,659
		t 0,5	28,907	18,382	32,457	18,329	44,659	48,387	24,017	39,163
		0,06*	27,453	16,403	31,687	15,013	44,120	48,703	22,925	39,693
		t 1	24,379	14,588	29,586	12,253	39,593	44,953	20,955	35,565
		t 2	22,115	13,323	26,715	9,333	37,060	41,518	17,894	33,766
		t 4	20,983	13,323	23,844	8,691	34,527	39,228	16,873	31,966
		t 8	19,850	12,058	22,696	8,048	33,260	37,511	14,832	31,067
		t 15	16,454	10,793	22,122	8,048	30,727	36,938	13,812	30,617
		t 30	16,454	9,529	20,973	8,048	28,195	34,648	13,301	30,167
		t 60	14,190	8,264	20,973	7,406	27,561	33,503	11,771	29,268
		t 120	13,058	8,615	20,399	6,763	24,395	32,931	10,240	27,918
		t 240	11,995	7,709	19,250	6,763	23,129	31,214	9,503	26,819
		t 480	10,625	6,810	18,357	6,120	20,596	30,069	7,972	25,019
		0,002*	10,133	6,327	18,011	5,453	19,792	29,863	7,331	24,907
		t 1440	9,095	5,481	17,209	4,478	17,711	28,605	6,158	23,870

* valores interpolados para 0,2 0,06 e 0,002

CURVA (diâmetro) - eixo X	TIPO	D (mm)	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F	Amostra G	Amostra H
	PENEIRAMENTO GROSSO	50	50	50	50	50	50	50	50	50
		38	38	38	38	38	38	38	38	38
		25	25	25	25	25	25	25	25	25
		19	19	19	19	19	19	19	19	19
		9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52
		4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
	PENEIRAMENTO FINO	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	SEDIMENTAÇÃO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
		d (t 0,5)	0,06581	0,07031	0,06490	0,07070	0,06179	0,05852	0,06665	0,05771
		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
		d (t 1)	0,04772	0,05055	0,04665	0,05109	0,04496	0,04238	0,04801	0,04215
		d (t 2)	0,03415	0,03594	0,03351	0,03672	0,03223	0,03067	0,03455	0,03026
		d (t 4)	0,02429	0,02541	0,02407	0,02603	0,02310	0,02201	0,02458	0,02172
		d (t 8)	0,01728	0,01806	0,01712	0,01845	0,01644	0,01573	0,01758	0,01547
		d (t 15)	0,01284	0,01326	0,01254	0,01348	0,01216	0,01153	0,01291	0,01134
		d (t 30)	0,00908	0,00943	0,00892	0,00953	0,00871	0,00827	0,00915	0,00805
		d (t 60)	0,00649	0,00670	0,00631	0,00676	0,00618	0,00588	0,00653	0,00573
		d (t 120)	0,00461	0,00471	0,00447	0,00479	0,00443	0,00418	0,00465	0,00410
		d (t 240)	0,00325	0,00333	0,00318	0,00339	0,00315	0,00298	0,00329	0,00291
		d (t 480)	0,00230	0,00235	0,00229	0,00240	0,00226	0,00212	0,00234	0,00208
		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
		d (t 1440)	0,00136	0,00138	0,00133	0,00141	0,00134	0,00125	0,00137	0,00122

	A	B	C	D	E	F	G	I
PEDREGULHO (%)	14,35	4,42	13,26	2,89	4,44	13,53	22,81	32,01
AREIA GROSSA (%)	2,60	3,33	2,96	4,05	5,74	5,98	0,62	6,42
AREIA MÉDIA (%)	22,55	31,08	15,33	34,27	17,14	14,74	15,59	13,65
AREIA FINA (%)	33,05	44,77	36,75	43,78	28,55	17,04	38,07	8,22
SILTE (%)	17,32	10,08	13,68	9,56	24,33	18,84	15,59	14,79
ARGILA (%)	10,13	6,33	18,01	5,45	19,79	29,86	7,33	24,91