

**UNIVERSIDADE TECNÓLOGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

ILDEMAR LUIS MORO VIANNA JUNIOR

**O IMPACTO DO CARREAMENTO DE SOLO NA DRENAGEM PLUVIAL DE VIAS
PAVIMENTADAS: ANÁLISE PRÁTICA E POR FERRAMENTAS DE PREVISÃO À
EROSÃO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2023

ILDEMAR LUIS MORO VIANNA JUNIOR

**O IMPACTO DO CARREAMENTO DE SOLO NA DRENAGEM PLUVIAL DE VIAS
PAVIMENTADAS: ANÁLISE PRÁTICA E POR FERRAMENTAS DE PREVISÃO À
EROSÃO**

***THE IMPACT OF SOIL LOADING ON THE RAINWATER DRAINAGE OF PAVED
STREETS: PRACTICAL ANALYSIS AND EROSION PREDICTION TOOLS***

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli.

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



ILDEMAR LUIS MORO VIANNA JUNIOR

**O IMPACTO DO CARREAMENTO DE SOLO NA DRENAGEM PLUVIAL DE VIAS PAVIMENTADAS:
ANÁLISE PRÁTICA E POR FERRAMENTAS DE PREVISÃO À EROSÃO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciência E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias E Processos Ambientais.

Data de aprovação: 31 de Agosto de 2023

Dr. Andre Nagalli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alessandro Bertolino, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Flavio Bentes Freire, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 31/08/2023.

Dedico esse trabalho à razão da minha vida, companheiro, amigo e pai, que infelizmente me deixou em meados da elaboração dessa dissertação. Ao homem que me deu a vida, assim como compartilhamos o DNA, a fisionomia e o nome, quero compartilhar e dedicar a você, meu pai!

AGRADECIMENTOS

Utilizo desse capítulo para agradecer aqueles que de alguma forma, me ajudaram nesta etapa e também para agradecer a vida que me deu um pai maravilhoso por 27 anos.

Inicialmente, gostaria de agradecer a minha esposa, Samantha, que não só me apoiou, mas também ajudou nas revisões, puxou minha orelha e sempre que precisava, me ajudava a lembrar dos nossos objetivos maiores.

Agradeço ao meu orientador, professor André, pela confiança em acreditar no meu trabalho, sempre muito objetivo em suas análises e apontamentos.

Agradeço a todos os professores e pesquisadores que tive a oportunidade de conhecer e que me ofereceram conhecimento. Valorização do professor e das universidades é fundamental para o bom desenvolvimento da qualidade de vida e uso sustentável do planeta.

Abro esse parágrafo em lágrimas, para agradecer ao meu precursor, meu pai. Você não foi apenas um pai, você foi o meu primeiro amigo, meu melhor amigo, o homem que me ensinou a caminhar, andar de bicicleta, a dirigir, a ser crítico, a falar menos e escutar mais. Eu já tinha vinte e cinco anos e muitas vezes você ainda arrumava minha cama, fazia o café e me esperava com expectativa para conversar sobre como foi o dia, conversar sobre política, futebol, economia, conversamos por anos, sobre tudo. Você com a mãe me ensinou que o caminho certo, é o da educação, do conhecimento. Nunca faltaram palavras de agradecimento, amor e carinho. Sigo aqui com você como exemplo e como razão para cada dia eu ser melhor e te dar mais orgulho. Pai, te carrego no nome, na fisionomia, na genética, nas lembranças e no coração. Mais uma vez, e agora sem você por aqui, muito obrigado por tudo, sou o que sou por você, 50% igual a você e os outros 50% foi você quem me mostrou o caminho.

"The air we breathe, the water we drink and the soil that grows our food are part of a delicate global ecosystem that is increasingly under pressure from human activities."

(Ban Ki-moon, 2014)

RESUMO

O sistema viário é essencial para o desenvolvimento de um país, utilizado diariamente para o deslocamento de cargas e pessoas. No Brasil, mais de 70% das vias não tem pavimento, trazendo impactos como o aumento de material particulado na atmosfera e a erosão do solo. Embora existam estudos que correlacionem o impacto da erosão e carreamento de solo em áreas rurais e florestais, não foram encontradas pesquisas que associem os danos da erosão de vias não pavimentadas e áreas ao entorno das vias pavimentadas e galerias de água pluvial. No meio urbano, os sistemas de drenagem pluvial são construídos para escoar águas superficiais, porém, quando mal projetados ou sobrecarregados, provocam alagamentos. Dessa forma, a drenagem pluvial de vias pavimentadas acaba sofrendo com o carreamento de solo derivado das vias não pavimentadas. Com isto, o objetivo do presente trabalho foi analisar o impacto do carreamento de solo de ruas não pavimentadas para a drenagem pluvial de ruas pavimentadas. Houve uma análise prática com a construção e instalação de um coletor de sedimentos dentro do bueiro, por um período de seis meses, a cada dez dias ou a cada precipitação (>5mm), mensurado a partir de pluviômetro instalado próximo ao trecho de análise. O sedimento foi retirado e pesado. Do mesmo solo, foi realizado um ensaio de granulométrico. Como ferramentas de previsão à erosão, foram escolhidas a Equação Universal de Perda de Solos (USLE) e o software FS-WEPP, elaborado pelo departamento de Serviços Florestais dos Estados Unidos. Este estudo demonstrou que o solo utilizado nas ruas não pavimentadas é ambientalmente inadequado, em razão de sua alta taxa de erodibilidade e sedimentação, com tendência a acelerar o assoreamento de galerias pluviais. Além disso, verificou-se que uma via não pavimentada pode carrear cerca de $3,99 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ de solo para a galeria pluvial, sendo de 4 a 20 vezes maior que em locais apenas com asfaltadas. Em uma estimativa, verificou-se essa porção de solo pode impactar mais de 19 metros de galerias pluviais por ano. Portanto, pode-se constatar que a erosão e carreamento de solo de vias não pavimentadas traz consequências à galeria de drenagem pluvial. A equação de USLE, superestimou o resultado em quase cinco vezes ao encontrado em campo ($14,16 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ ante a $3,99 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$), não sendo o mais adequado para estimar a erosão de vias não pavimentadas. Por outro lado, o modelo computacional apontou um valor de $2,38 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, próximo ao encontrado no trabalho de campo, mas com necessidade de ajuste para local. Conclui-se que a erosão e carreamento de solo de vias não pavimentadas gera danos à drenagem pluvial de vias pavimentadas, ocasionando o assoreamento acelerado do sistema, situação não prevista em normas e projetos construtivos. Ainda assim, deve-se aprofundar os estudos para outras regiões do país, além da necessidade de desenvolvimento de novos sistemas de contenção de erosão e Sistemas Sustentáveis de Drenagem Pluvial.

Palavras-chave: erosão; drenagem pluvial; vias não pavimentadas; USLE; WEPP.

ABSTRACT

The road system is essential for the development of a country, used daily for the movement of loads and people. In Brazil, more than 70% of the roads are not paved, bringing impacts such as the increase of particulate matter in the atmosphere and soil erosion. Although there are studies that correlate the impact of erosion and soil carry-over in rural and forest areas, no studies were found that associate the erosion damage of unpaved roads and areas around paved roads and rainwater galleries. In urban areas, storm drainage systems are built to drain surface water, but when poorly designed or overloaded, they cause flooding. In this way, the storm drainage of paved roads ends up suffering from the carry-over of soil derived from unpaved roads. With this, the objective of the present work was to analyze the impact of soil carry-over from unpaved streets in the storm drainage of paved streets. There was a practical analysis with the construction and installation of a sediment collector inside the storm drain for a period of six months, every ten days or every precipitation (>5mm), measured from a rain gauge installed near the analysis section. The collector was removed and the sediment was weighed. From the same soil, a granulometric test was carried out. As tools for predicting erosion, the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the FS-WEPP software, developed by the US Department of Forestry Services, were chosen. This study demonstrated that the soil used in unpaved streets is environmentally unsuitable, due to its high rate of erodibility and sedimentation, with a tendency to accelerate the silting up of storm water. In addition, it was found that an unpaved road can carry about 3.99 kg.m⁻².year⁻¹ of soil to storm water, which is 4 to 20 times greater than in places with only paved roads. In an estimation, it was found that portion of land can impact over 19 meters of storm water per year. Therefore, it can be seen that erosion and soil carry-over from unpaved roads has serious consequences for the storm drainage gallery. The USLE equation overestimated the result by almost five times that found in the field (14.16 kg.m⁻².year⁻¹ compared to 3.99 kg.m⁻².year⁻¹), not being the most adequate to estimate the erosion of unpaved roads. On the other hand, the computational model indicated a value of 2.38kg.m⁻².year⁻¹, close to that found in the field work, but with the need for adjustment for the location. Therefore, it can be seen that erosion and soil carry-over from unpaved roads has serious consequences for rainwater drainage from paved roads, causing accelerated silting of the system, a situation not foreseen in norms and construction projects. Even so, studies should be deepened for other regions of the country, in addition to the need to develop new erosion containment systems and Sustainable Rainwater Drainage Systems.

Keywords: erosion; storm drainage, unpaved roads; USLE, WEPP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Impacto do carreamento de solo na drenagem pluvial.....	20
Figura 2- Relação asfalto e meio ambiente	29
Figura 3 – Estrada com características de erosão laminar	38
Figura 4 - Estrada com características de erosão por sulcos.....	38
Figura 5 -Solo com características de erosão com ravinas.....	39
Figura 6 – Variantes envolvidas na erosão do solo.....	40
Figura 7 - Relação do tamanho do grão sedimentados na drenagem.....	44
Figura 8 - Relação do sólido com chuva	44
Figura 9 - Fator R para regiões do Brasil	48
Figura 10 - Interface online da ferramenta FS WEPP	52
Figura 11 - Fluxograma da metodologia.....	56
Figura 12 - Geolocalização.....	58
Figura 13 - Imagem do trecho de análise	59
Figura 14 - Dados climatológicos	60
Figura 15 - Mapa de solo.....	61
Figura 16 - Taxonomia de solos USDA.....	64
Figura 17 - Mapa do levantamento topográfico	65
Figura 18 - via pavimentada	66
Figura 19 - Localização do coletor de sedimentos	67
Figura 20 – Projeto do coletor	68
Figura 21 - Coletor de sedimentos	69
Figura 22 - Coletor instalado	69
Figura 23 - Pluviômetro instalado.....	70
Figura 24 - Caixa instalada em dia chuvoso.....	71
Figura 25 - Cálculo do volume da seção transversal.....	72
Figura 26 - Parametrização FS-WEPP.....	77
Figura 27 - Ensaio de granulometria do solo.....	78
Figura 28 - Curva Granulométrica	80
Figura 29 - Tipo de solo	80
Figura 30 - Classificação de tipo de solo.....	81
Figura 31 - Pesagem de 0,5L de solo	83

Figura 32 - Relação da pluviosidade com massa de material carreado	86
Figura 33 - Resultado da previsão de erosão pela ferramenta FS-WEPP	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pontos positivos e fatores que impactam a drenagem pluvial.....	32
Quadro 2- Relação entre Serviço Ecossistêmico, benefício e tipo de SUD.	34
Quadro 3- Classificação de solos SUCS.....	41
Quadro 4 – Tipo de solo e probabilidade de erodibilidade	42
Quadro 5 - Massa de sedimentos na drenagem	45
Quadro 6 - Fator de erodilidade do solo.....	49
Quadro 7 - Módulos do WEPP	51
Quadro 8 - Ferramentas de predição à erosão	54
Quadro 9 - Método científico	55
Quadro 10 - Fator de empolamento	63
Quadro 11 - Parâmetros do FS WEPP.....	75
Quadro 12 - Parâmetros pré-determinados.....	76
Quadro 13 - Objetivos específicos e resultados do trabalho	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Boletim estatístico CNT	23
Tabela 2 - Relação de tipo de solo com fator r.....	50
Tabela 3 – Dados coletados do amostrador.....	71
Tabela 4 - Caracterização do solo.....	79
Tabela 5 - Dados da coleta de solo retirado do amostrador.....	84
Tabela 6 - Cálculo do fator R.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de ciclo de vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DHSVM	<i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DSS	Sistemas de Apoio a Decisão
FS	<i>Forest Service Department</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
Kg	Quilograma
KINEROS2	<i>Cinematic Runoff and Erosion Model</i>
M	Metro
NBR	Norma Brasileira
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
READI	Índice de erosão e entrega à estrada
ROADMOD	Modelo de erosão da superfície da estrada baseado em GIS
SEDMODL2	Modelo de Entrega de Sedimentos Rodoviários
SIBICS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SUDS	<i>Sustainable drainage systems</i>
U\$\$	Dólar Americano
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	Equação Universal de Perda de Solo
WARSEM	Modelo de Erosão da Superfície Rodoviária de Washington
WEPP	Water erosion Prediction Project
WTP	Método de Valoração de Contingente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 AS ESTRADAS E OS IMPACTOS À SOCIEDADE	22
2.1.1 O impacto das rodovias	24
2.1.2 Os impactos ambientais inerentes às estradas	26
2.1.3 O processo de planejamento	28
2.1.4 Propostas sustentáveis	30
2.2 A DRENAGEM PLUVIAL URBANA	31
2.2.1 Sistemas tradicionais de drenagem pluvial	31
2.2.2 Sistemas sustentáveis de drenagem pluvial (SUDS)	33
2.3 POLUIÇÃO DERIVADA DA EROSÃO E CARREAMENTO DE SEDIMENTOS	37
2.3.1 Assoreamento no sistema de drenagem pluvial urbana	42
2.3.2 Modelos de previsão à erosão	46
2.3.2.1 Equação Universal de Perda de Solos - USLE	47
2.3.2.2 <i>Water Erosion Prediction Project - WEPP</i>	50
2.3.2.3 Outros modelos para previsão de erosão de solo	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA	55
3.2 DEFINIÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO DE CASO	57
3.2.1 Localização	57
3.2.2 Geografia	59
3.2.3 Solo	60
3.2.4 Fator de empolamento e densidade	62
3.2.5 Granulometria do solo	63
3.2.6 Declividade	64
3.2.7 Drenagem e uso da via	66
3.3 AMOSTRAGEM	68
3.3.1 Montagem do amostrador	68
3.3.2 Instalação do amostrador	69

3.3.3 Período de amostragem	70
3.3.4 Amostra de solo	71
3.3.5 Estimativa do assoreamento da galeria de drenagem pluvial	71
3.4 MODELOS DE PREVISÃO DE EROSÃO	72
3.4.1 Modelo de previsão de erosão USLE	73
3.4.2 Modelo de previsão de erosão WEPP	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	78
4.2 AMOSTRAGEM DO CARREAMENTO DE SOLO	83
4.3 ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DA GALERIA DE DRENAGEM PLUVIAL	87
4.4 PREVISÃO DE EROSÃO	88
4.4.1 Previsão de Erosão pela equação de USLE	88
4.4.2 Previsão de Perda de solo pelo software FS-WEPP	91
4.5 ALINHAMENTO DOS RESULTADOS DE ACORDO COM OS OBJETIVOS PROPOSTOS	93
5 CONCLUSÃO	95
REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é de alta complexidade e envolve mudanças sociais, econômicas e ambientais, que estão diretamente relacionadas e modificam o meio ambiente. Pode-se considerar como unidade de medida da urbanização, a economia, na qual, após a industrialização, houve uma transição de expansão, do setor primário para indústria contemporânea, com isto, o meio urbano passou a ser mais utilizado (TORRES; TIWARI; ATKINSON, 2022).

De acordo com Ribeiro e Vargas (2015), o meio urbano, no final do século XIX, era visto como um lugar insalubre, com foco de doenças, pela falta de gestão ambiental e em virtude do adensamento de pessoas no mesmo espaço. Entretanto, ao passar do século XX, melhorias nas políticas, gestão e desenvolvimento de tecnologias fizeram com que esses problemas fossem menos danosos à saúde humana e a urbanização passou a ser vista com bons olhos. Nessa linha de pensamento, Kühner, Pinto e Amorin (2021), citam que após o crescimento da urbanização sem controle e perda da qualidade de vida em meados do século XX, estudiosos, cientistas, educadores, dentre outros passaram a se preocupar com desafios nas áreas de meio ambiente, saneamento e habitação.

Todavia, Calijuri e Cunha (2013) afirmam que quando o processo de urbanização não é bem planejado, passa a ser um dos grandes vilões do impacto e poluição das bacias hidrográficas, em razão das diversas atividades humanas, má gestão e falta de políticas públicas. Rosa et al. (2014) corroboram com os autores, citando que o crescimento urbano ocorreu de forma rápida e sem um correto planejamento, tendo como consequência o agravamento dos problemas ambientais e sociais. Huang, Sadiq e Chien (2021) ainda reforçam que a urbanização acelerou a emissão de gases de efeito estufa e causou maior degradação ambiental.

Conforme Amaral et al. (2016), no meio ambiente, a urbanização altera severamente os compartimentos ambientais, são exemplos, o solo por disposição irregular de resíduos, o ar por meio de emissão de gases poluentes, a biota pela supressão de vegetação e a água por conta do assoreamento dos corpos hídricos.

Segundo Pessoa e Steinke (2020), a urbanização reflete fortemente nos regimes hidrológicos das bacias hidrográficas. Dentre muitas das alterações, cita-se o assoreamento dos corpos d'água, linearização e impermeabilização dos córregos,

impactos gerados em uma bacia hidrográfica que causam as inundações e alagamentos (BRAGA, 2005).

No âmbito do assoreamento dos córregos, Guimarães (2008, p. 19) afirma que, a ocorrência se origina a partir do carreamento de sedimentos para o córrego. Tal ocorrência é mutável, podendo sofrer com a urbanização "...a erosão e o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas são fenômenos dinâmicos sujeitos a alterações diversas, das quais a ação antrópica exerce grande influência".

Estradas não pavimentadas também ocasionam erosão do solo e assoreamento de corpos hídricos. Wang et al. (2021) e Juško, Sedmák e Kúdela (2022) citam que as estradas não pavimentadas têm grande potencial de perda de sedimentos, por não haver a impermeabilização do solo, que fica exposto. Em casos de estradas mal projetadas, o alto fluxo de veículos (especialmente os pesados), a falta de manutenção, a drenagem deficiente, o tipo de uso e a própria natureza do solo podem acelerar o processo de assoreamento da bacia hidrográfica (XU et al., 2022).

O carreamento de sólidos aos corpos hídricos pode ser intensificado pelo sistema de drenagem pluvial urbano, devido às canalizações. De acordo com Garcia e Santamarta (2022), os sistemas sustentáveis de drenagem, como coberturas verdes e valas de infiltração são mais adequados por oferecerem dispositivos de contenção de carreamento de sólidos semelhantes à topografia natural.

Albuquerque et al. (2019) citam que a drenagem urbana é um conjunto de estruturas e ações que visam gerenciar o escoamento das águas pluviais dos meios populacionais, composta por equipamentos, como: boca de lobo, sarjeta e condutos hidráulicos que transportam a água até um ponto de deságue. Contudo, Souza (2013) e Seyedashraf, Busolin e Harou (2021) mencionam que os moldes atuais de drenagem urbana utilizados têm sido questionáveis pelos inúmeros impactos causados à população e ao meio ambiente.

Velocidade acelerada de escoamento das águas pluviais, impermeabilização do solo e inadequado uso e ocupação do solo, causam inundações mais rigorosas e alagamentos, além da poluição dos corpos hídricos receptores. Lisboa et al. (2017) cita que o assoreamento dos corpos hídricos, aumenta as ocorrências de inundações. Tucci (2007) ainda explana que os alagamentos passam a ser frequentes nos meios urbanos, quando os sistemas de drenagem são mal projetados ou há falta de manutenção.

Como exemplos práticos, nos últimos anos, grandes cidades como Curitiba e São Paulo desenvolveram seus próprios planos de drenagem. No entanto, mesmo anos após a aplicação das ações propostas, as cidades seguem tendo problemas de inundações, alagamentos e poluição em diversas localidades.

Segundo Tucci e Collischomn (1998), na maioria das vezes o sistema de drenagem é projetado após a ocorrência de problemas de alagamento ou inundação e, desse modo, torna-se mais difícil a resolução de possíveis falhas.

Ainda, no aspecto de medidas de planejamento, os autores citam que a expansão da malha viária pode trazer riscos à gestão das bacias hidrográficas, na qual resulta em: falta de controle e monitoramento de enchentes, desorganização política, escassez de informação técnica, baixo controle do zoneamento urbano, pouco investimento em educação ambiental e desinteresse público na resolução dos problemas (em razão do custo elevado das obras), quando aplicadas, as medidas de planejamento se tornam eficazes e menos custosas.

Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi analisar o impacto do carreamento de solo de vias não pavimentadas na drenagem pluvial de vias pavimentadas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é analisar o carreamento de solo de vias não pavimentadas e o impacto na drenagem pluvial de vias pavimentadas, com análise prática e por ferramentas de previsão à erosão.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar levantamento in loco do carreamento de solo de via não pavimentada para via pavimentada, com análise do tipo de sedimento.
- Correlacionar intensidade da pluviosidade com a erosão do solo;
- Correlacionar o tipo e volume de sedimento com o entupimento e diminuição da capacidade da rede de drenagem;
- Realizar a predição de erosão de solo de via não pavimentada por modelo matemático teórico e computacional com correlação do volume encontrado em campo.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a CNT (2023), no Brasil, mais de 70% das estradas não são pavimentadas. Esse grande percentual tem influência direta nos processos de erosão e carreamento de solo, resultando em problemas de trafegabilidade e assoreamento de corpos hídricos.

Além disso, no aspecto econômico, a erosão é uma das causas de falhas e depreciação dos veículos, na qual impõe que bens e cargas sejam transportados por outros caminhos, tornando o tráfego terrestre mais pesado e oneroso. No aspecto ambiental, o carreamento de solo é um dos principais fatores para o assoreamento de corpos hídricos, especialmente os lânticos (XU et al, 2022; WANG et al 2022; TUCCI; COLLISCHONN, 1998).

Conforme Fox e Wilson (2010) e Barbosa et al. (2015), desde os anos 50 cientistas têm estudado e desenvolvido modelos matemáticos de previsão ou estimativa de erosão como o modelo USLE e WEPP. Entretanto, esses modelos geralmente são eficazes apenas em regiões específicas, sendo necessárias adaptações para outras localidades. Os autores afirmam que os modelos de previsão precisam ser testados para verificar-se a eficiência em diversas regiões.

A análise da erosão de estradas é complexa, pois envolve inúmeros fatores relacionados à precipitação, clima, solo e ao modelo de uso das vias. Os fatores são físicos, químicos e biológicos. Autores citam que o impacto da erosão precisa ser entendido e estudado para se obter um banco de dados mais completo e maior entendimento do fluxo de desagregação e movimentos dos sólidos (NGEZAHAYO; S. GHATAORA; BURROW, 2019).

De acordo com Souza (2013) e Seyedashraf Busolin e Harou (2021), a drenagem pluvial foi um elemento criado para inibir os impactos das chuvas intensas, especialmente em centros urbanos. Porém, nos últimos anos, devido ao aumento descontrolado das áreas impermeabilizadas, pode-se perceber a ocorrência de alagamentos e poluição de rios (em consequência da ligação irregular de esgoto doméstico).

Os Sistemas Sustentáveis de Drenagem Pluvial (SUDS) surgiram com o objetivo de se obter uma drenagem pluvial com menor impacto ao meio ambiente e maior semelhança com a drenagem natural. No entanto, a instalação de SUDS

dependerá de aspectos físicos, sociais e culturais de cada região (GARCIA; SANTAMARTA, 2022; SELVAKUMAR; O'CONNOR, 2022).

De acordo com Tucci (2012) e Botelho (2017), os sistemas de drenagem são constituídos de diversos equipamentos, como: sarjetas, galerias, tubulações, bocas de lobo e poços de visita. Quando estas ferramentas são mal dimensionadas ou não há um planejamento adequado, pode ocorrer extrapolação do sistema e alagamento de locais.

Embora planos de drenagem determinem uma velocidade mínima de escoamento para limpeza dos sistemas, não há uma análise do tamanho dos grãos de sedimentos carregados para as galerias, sendo este um fator elementar para o assoreamento e entupimento dos sistemas e galerias (QIAN et al., 2022). É importante ressaltar que a velocidade de autolimpeza tem relação com declividade e rugosidade do tubo.

Ao caminhar por vias públicas, não é difícil se deparar com situações como as da Figura 1. No município de estudo, encontram-se bocas de lobo entupidas, asfalto encoberto por solo erodido e sistemas de drenagem comprometidos, devido à erosão de solo.

Figura 1 - Impacto do carregamento de solo na drenagem pluvial.



Fonte: autoria própria, 2021.

A revisão sistemática de Ngezahayo, Ghataora e Burrow (2019) analisou mais de 500 artigos científicos relacionados à erosão de estradas não pavimentadas. Não houve evidência de artigos científicos que relacione o impacto da erosão do solo de vias não pavimentadas com a drenagem pluvial. O carreamento de sedimentos para dentro das galerias da drenagem pluvial, além de ser um acelerador de assoreamento de corpos hídricos, ainda entope e diminui a vida útil das galerias (RIETVELD; CLEMENS; LANGEVELD, 2021; WEI et al., 2022).

De acordo com o problema de pesquisa, entende-se a necessidade de analisar a erosão e carreamento de sólidos oriundos de estradas não pavimentadas, como também seus impactos na drenagem pluvial de vias pavimentadas em meios urbanos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo consiste na revisão sistemática da literatura, que se deu por meio de análises bibliométricas em bases científicas de dados, para apresentar o estado da arte relacionado ao tema e oferecer embasamento e fundamentação a esta pesquisa.

2.1 AS ESTRADAS E OS IMPACTOS À SOCIEDADE

O sistema viário é uma vasta rede que conecta lugares e pessoas dentro e além das fronteiras nacionais. Planejadores e engenheiros desenvolveram elementos dessa rede com objetivos específicos de viagem em mente. Esses objetivos vão desde o atendimento de necessidades de passageiros e cargas de longa distância até o atendimento de viagens de bairro, de empreendimentos residenciais a shopping centers próximos. A classificação funcional das rodovias define o papel que cada elemento da rede viária desempenha no atendimento dessas necessidades de viagem (FHWA, 2013, p. 1, tradução nossa).

De acordo com Ferguson et al. (2012) e Abarca, Monteiro e O'Reilly (2022), o sistema viário é essencial para o crescimento econômico e desenvolvimento de uma localidade. Pelas estradas, grande parte das cargas, pessoas e bens se deslocam.

Segundo dados da CNT (2023), mais de 64% dos deslocamentos no Brasil são por meio das estradas. Nicolau, Chaves e Zanchetta (2020) corroboram, citando ainda que neste aspecto o Brasil se difere de países como China e Índia, em que apenas 21% e 39%, respectivamente, do transporte de pessoas e cargas são por meio rodoviário. Embora sejam países em desenvolvimento, possuem estratégias diferentes do Brasil em relação ao sistema viário.

O uso de rodovias no Brasil se assemelha à realidade dos Estados Unidos, pois, 70% da população utiliza carros próprios para deslocamento (NICOLAU, CHAVES E ZANCHETTA; 2020). Berg et al. (2016) sugerem em seu artigo de revisão que a realidade de políticas de transporte e sistema viário entre países desenvolvidos, em desenvolvimento e pobres são diferentes.

De acordo com Ferrari et al. (2019), a expansão e melhoria da malha viária é essencial para o crescimento econômico de países em desenvolvimento, principalmente, em razão do alto custo agregado do transporte.

Segundo Garcia-Escribano, Goes e Karpowicz (2015), as rodovias no Brasil possuem condições precárias. Mesmo após a criação de incentivos econômicos como o PAC, a rede rodoviária não cresceu como se esperava nos últimos 15 anos.

Autores como Li, Wu e Chen (2017), Agrawal, Galasso e Oettl (2017) e Baum-Snow et al. (2018) apresentam em seus estudos que, quando há o avanço na qualidade das estradas, o retorno para a economia ou para a indústria é positivo (embora, para longas distâncias, o transporte aéreo e náutico seja mais vantajosos). Ressalta ainda Bottasso et al. (2022), cidades mais distantes de regiões portuárias, precisam dar mais importância ao aperfeiçoamento das estradas.

Desde 2015, a Confederação Nacional de Transportes (CNT) emite boletins mensais de aspectos e indicadores referentes ao transporte no Brasil. De acordo com a Tabela 1, atualmente, a malha rodoviária brasileira passa de 1.721.000 km, sendo sua maior parte estradas estaduais e municipais (69%), e também não pavimentadas (78,5%).

Comparando os dados da CNT de 2015 e dos dias atuais, houve um aumento de 0,025% na extensão da malha rodoviária e, apenas 0,04% das estradas foram pavimentadas. Neste período, a relação entre estradas pavimentadas e não pavimentadas manteve-se praticamente a mesma, com uma variação negativa de 0,022%.

Tabela 1 - Boletim estatístico CNT

	Pavimentada	Não pavimentada	Total
Federal	66.119	8.457	74.576
Estadual e municipal	147.814	1.341.643	1.489.457
Em planejamento	-	-	157.309
Total	213.933	1.350.100	1.721.342

Fonte: adaptado de CNT, 2023

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2022), no ano de 2021, o Governo Federal investiu cerca de 5,8 bilhões de reais na infraestrutura rodoviária. Nos últimos dez anos, o investimento público esteve em queda. Ainda,

segundo a CNT (2022), em 2011 o valor investido foi de aproximadamente 11,2 bilhões de reais, enquanto no ano de 2022 caiu para 9 bilhões de reais.

O boletim da CNT (2018), dentre outros aspectos, aponta o número de projetos, extensão e valor investido em obras da malha rodoviária no ano de 2018. O valor máximo investido foi em duplicações de rodovias (297,4 bilhões de reais), já o maior número de projetos foi no aspecto de adequações de vias. No mesmo ano, o Brasil pavimentou cerca de onze mil quilômetros de rodovias, com um investimento de aproximadamente 46,07 bilhões de reais, cerca de 0,6% do valor total investido na infraestrutura de transporte rodoviário.

Em pesquisa com usuários das rodovias no Brasil, realizada pela Confederação Nacional de Transportes (2022), cerca de 38,2% das estradas são consideradas ótimas ou boas e, deste total, 74,2% estão sob concessão privada. Cerca de 38,6% das estradas são consideradas regulares e 21,6% delas são apontadas como ruins ou péssimas.

2.1.1 O impacto das rodovias

Santos et al. (2021) citam que cientistas têm dado maior atenção à pesquisa na área de infraestrutura de obras em vias públicas, por se tratarem de ações que causam perturbações ao meio ambiente, à sociedade e economia. Corroboram Velez (2021), afirmando que, embora a malha viária tenha fundamental importância econômica e social, nem sempre é sinônimo de desenvolvimento econômico. Estudos apontam diversos aspectos que deveriam ser considerados e estudados. Redding e Turner (2015) citam que o assunto deve ser amplamente discutido.

Onayev, Espey e Swei (2022) indicam que um dos problemas das obras viárias é o aumento do custo nos últimos anos, relacionado, dentre outros aspectos, com a demanda por melhores estruturas e aumento do valor agregado do material para construção.

Brooks e Liscow (2020) reforçam o mesmo ponto de vista, e ainda completam que o custo para a construção de rodovias saltou de U\$5,3 milhões.kilometro⁻¹ nos anos 80, para U\$15,5 milhões.kilometro⁻¹ nos dias atuais.

Gusmão e Ribeiro (2020) afirmam que um dos grandes problemas da malha viária é o congestionamento gerado pelo alto tráfego, que resulta em impactos como:

o crescimento no número de acidentes, os atrasos nas entregas de produtos e o aumento da poluição ambiental.

Na mesma linha de pensamento, Ruesch et al. (2012) citam que o transporte urbano é essencial para países como Estados Unidos, Canadá, Japão, mas que causam impactos negativos à sociedade, como aumento do custo, especialmente em áreas populosas.

No aspecto político, muitas vezes o retorno não é o mesmo que o planejado. Crescenzi e Rodríguez (2012) mostram em seus estudos que o investimento no sistema viário não trouxe o resultado esperado em mais de 120 regiões na Europa, uma vez é que a expectativa seria de uma melhoria na qualidade de vida e não aconteceu. Berg et al. (2016), em suas revisões, apontam impactos em diversos setores da sociedade, em países majoritariamente pobres que aplicam políticas públicas para crescimento do sistema de transporte, mas que reflete em outros pontos do país. Por exemplo, os autores descrevem que muitas vezes o alto custo do transporte na agricultura inviabiliza a continuidade de pequenos produtores.

A *Camera di Commercio de Genova* (2018) elaborou um estudo apontando que após a queda de uma importante ponte que ligava a cidade a outras regiões, houve um impacto de mais de um bilhão de euros após um ano do acidente. Depois da ocorrência, o governo italiano emitiu um Decreto² no qual obriga as organizações que realizam a gestão de viadutos e pontes a desenvolverem um relatório com classificação de risco das infraestruturas. Esse caso exemplifica o impacto econômico de uma estrutura já existente que passa a ser inutilizada ou inoperante.

Abarca, Monteiro e O'Reilly (2022) produziram uma metodologia simplificada em perdas indiretas na avaliação de risco de pontes rodoviárias. Por meio de um software, os autores relacionam os custos de obras de reparo de pontes, com tempo de congestionamento e aumento no consumo de combustível dos usuários.

Em virtude do desenvolvimento acelerado, intensificação do tráfego em centros urbanos e aumento do deslocamento de cargas, as estradas e demais estruturas tendem a ficar desgastadas e danificadas de forma mais acelerada, necessitando de recorrentes obras de recuperação (OUYANG; ZHOU; FANG, 2019). Corroboram Pesti et al. (2012), citando que os grandes centros urbanos podem sofrer

² Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Roma, 2020. Decreto M 578 del 17-12-2020

mais pressão devido às reformas de vias e, conseqüentemente, ao aumento dos congestionamentos.

De acordo com Chen et al. (2017), a análise dos impactos ainda no período de projeto da obra pode ser vista em três vieses: i-fonte do impacto; ii-natureza do impacto; iii-avaliação do impacto. O autor cita que, referente à fonte do impacto, foi realizada uma comparação relativa às normas e regulamentações. Já no aspecto da natureza do impacto, associa-se a obra com o meio interessado.

A título de exemplo, Alexanderson et al. (2010) relacionam o impacto econômico com obras de transporte de longas distâncias. Os autores citam que em geral, a avaliação do impacto de obras sob a sociedade, utiliza dados empíricos. Ressaltam que esta forma de analisar os impactos das obras rodoviárias acentua os impactos positivos, no aspecto gerencial, econômico, social ou sustentável, deixando de lado os impactos negativos.

Os autores Ouyang, Zhou e Fang (2019) destacam impactos físicos, como: congestionamento, aumento de acidentes e diminuição da eficiência do tráfego. Por outro lado, Hammad et al. (2016); e Ivaskova et al. (2015) trazem a análise de impactos de forma holística, citando o desconforto emocional, a falta de segurança e as poluições ambientais (visual, sonora e do ar) como aspectos que afetam de forma significativa a população.

Zou e Ergan (2019) abordam em seu estudo o impacto na qualidade de vida da sociedade, decorrente das obras em estradas. Por exemplo, a mudança de paisagem em razão da existência dos canteiros de obras ou até mesmo os riscos com acidentes e falta de segurança.

2.1.2 Os impactos ambientais inerentes às estradas

Os impactos ambientais gerados nos períodos de instalação de uma estrada podem ser pontuais ou contínuos. O ruído, a emissão de gases de efeito estufa e a mudança na qualidade da água, são contínuos. Ainda que os parâmetros mudem, o impacto segue ocorrendo na operação. Em contrapartida, a mudança de paisagem, a fragmentação do habitat natural e a alteração de solo ocorrem, geralmente, no período de instalação, de forma pontual, embora, muitas vezes, irreparável (LI et al., 2022; DING et al., 2021; VIGNISDOTTIRA et al., 2018).

Conforme Long et al. (2017), dentre os inúmeros impactos ambientais à fauna, causados pela construção e operação de rodovias, o ruído é um dos mais estudados. Costello e Symes (2014) apontam que o ruído antropogênico é o causador de perturbações ao comportamento de comunicação entre espécies de insetos. Já Shier, Lea e Owen (2012) citam que os veículos causam ruídos em baixas frequências, tornando-se um problema para o bem-estar de algumas espécies da fauna que também utilizam os sinais de baixa frequência para se comunicarem. Dessa forma, estes ruídos podem gerar informações falsas, causando gasto energético a esses animais, colocando-os em risco de se tornarem presa fácil.

Long et al. (2017) além de citarem a existência de uma gama de estudos sobre os impactos dos ruídos gerados por rodovias à avifauna, utilizando da metodologia BACI³, os autores também apontam que os ruídos podem mascarar a comunicação entre espécies.

Segundo Laurance e Arrea (2017) e Ibisch (2016), a construção de rodovias causa fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e facilitação de invasões biológicas. Estudos mostram a perda de comunidades aquáticas após instalação de sistemas rodoviários, assim como barragens e estradas também causam divisão de habitats e perda de diversidade ecológica, em alguns casos, levando a extinção de espécies (PAIK; YUN; Park 2018; YANG et al. 2021; YANG et al. 2022). Long et al. (2017) reforçam a dificuldade em se estudar os impactos causados na fauna, oriundo de rodovias.

A operação de estradas, especialmente aquelas de fluxo pesado, tende a aumentar os parâmetros básicos de análise de qualidade da água, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo e Nitrogênio, atrelado às emissões dos veículos, desgastes de peças e perda de cargas (PISTOCCHI, 2020; RAMÍSIO; AREZES; PINTO, 2021; KOU et al., 2021). .

Autores citam que a manutenção de estradas também é geradora de distúrbios ao meio ambiente (LIAO et al., 2018; BOOTO et al., 2017). Na mesma direção, Li e Zhang (2015); e Prosser et al. (2017) citam, por exemplo, que em estradas onde há recorrência de neve, existe a necessidade da retirada manual e também do degelo, acelerado por processos químicos nos quais, geralmente sais (NaCl, CaCl₂, MgCl₂)

³ Metodologia BACI: *Before-After Control-Impact method*, trata-se de uma metodologia de analisar um impacto antes e depois de determinada ação ou mudança.

são espalhados na pista para que o degelo ocorra mais rápido. Entretanto, esses sais podem alterar o pH da água e solo nas proximidades das estradas.

De acordo com os estudos de Vignisdottira et al. (2019), os descongelantes de estradas impactam todos os compartimentos ambientais.

Qian, Gao e Huang (2022) mencionam que o período de construção de pontes e túneis são fortes modificadores da qualidade da água, principalmente, por não haver barreiras naturais. Outros fatores que causam danos ao meio ambiente são: supressão floresta, construção de canteiro de obras nas beiras de águas lânticas ou lóaticas e modificação do fluxo da água. No período de operação, a lixiviação de produtos tóxicos derivados dos veículos, como óleos, sais e ácidos, degradam a qualidade do solo e de águas subterrâneas (VIGNISDOTTIRA et al., 2019).

Hahad et al. (2020), apontam os impactos e os riscos à saúde, em função das emissões de gases poluentes. Em uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) realizada por Araújo, Santos e Arguelles (2022), é possível notar que toda a cadeia do ciclo de vida do asfalto é causadora da emissão de gases poluentes, especialmente GEE (Gases de Efeito Estufa). Na extração do combustível fóssil, no beneficiamento, no transporte, na mistura com aditivos para a fabricação e no uso do asfalto.

O desenvolvimento de atividades de transportes, especialmente os terrestres, por meio de estradas, são grandes geradores de gases poluidores. Estudos mostram que até 2030, 97% das emissões atmosféricas de GEE estarão ligadas ao sistema rodoviário e transportes. No Brasil, 10,6% da emissão de GEE vem das estradas. Por outro lado, a China, em construção de estradas, gerou 1,1 giga toneladas de CO₂, apenas em 2013 (SANTOS; FERREIRA; FLINTSCH, 2015; CHEN et al., 2017).

2.1.3 O processo de planejamento

De acordo com Szeto et al. (2013), o tripé da sustentabilidade (dimensão social, ambiental e econômica) não é levado em consideração na maioria dos estudos e projetos de redes rodoviárias. O planejamento geralmente é embasado em uma ou no máximo duas dimensões e, com o passar do tempo, causa problemas que são complexos de serem mitigados. Corroboram Pessoa e Steinke (2020) citando que os planos de desenvolvimento urbano não consideram os impactos causados pelo meio urbano nas bacias hidrográficas.

Ainda no aspecto de planejamento de estradas, Pilger (2020) cita que as estradas mal planejadas, além de gerarem um aumento no custo, podem acarretar em impactos ambientais maiores dos que os previstos anteriormente. Tal situação pode acontecer no período de obras ou até mesmo na operação, gerando manutenção acelerada.

Segundo Spielger (2018), as principais falhas dos projetos são derivadas da falta de informações do local de estudo, como a inexistência de conhecimento geológico, volumes de corte e aterro, e distância de transporte. Dessa forma, o planejador faz estimativas nem sempre assertivas.

Pela Figura 2 pode-se verificar que a relação do meio ambiente e pavimentação asfáltica é um ciclo. A produção da massa asfáltica é impactante ao meio ambiente, gera GEE, polui o solo e causa danos à fauna.

O uso do asfalto causa aumento da emissão de GEE, impermeabiliza e polui o solo, gera resíduos. Esses impactos causam mudanças climáticas, como aumento de temperatura, chuvas intensas e intensificação das variações térmicas. Esses efeitos diminuem a vida útil do asfalto e fazem com que haja maior necessidade de manutenção, gerando maior produção de massa asfáltica. (VIGNISDOTTIRA et al., 2019; GUAN et al., 2021, LIAO et al., 2021).

Figura 2- Relação asfalto e meio ambiente



Os estudos de Selva et al. (2011) e Selva et al. (2015) demonstram que regiões sem rodovias são importantes para preservação de locais onde habitam espécies raras. Os autores ainda citam a redução da biodiversidade, após o avanço das estradas em áreas antes preservadas.

Polley et al. (2022) apontam que a manutenção de áreas sem estradas e rodovias é essencial para a preservação da biodiversidade, além de ajudar a minimizar as mudanças climáticas em algumas localidades.

Pfeifer et al. (2017) citam que as estradas são altamente danosas às florestas, devido ao efeito de borda. Essa alteração ocorre quando há a supressão de parte da floresta, expondo fauna e flora a outros fatores químicos e biológicos, tornando-as mais sensíveis e vulneráveis.

2.1.4 Propostas sustentáveis

Nos últimos anos, as pesquisas científicas têm trazido à tona o implemento da análise do ciclo de vida para projetos de redes rodoviárias (MORETTI et al., 2014; PARK; KIM, 2019).

Autores como Kather et al. (2021) citam em seus estudos que, de acordo com a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), os compostos de lignina e fibra de vidro na composição do asfalto melhoram a durabilidade do pavimento e não aumentam de forma significativa os impactos ambientais.

Apesar de existirem inúmeros estudos científicos referentes ao ACV do asfalto, Zheng et al. (2021) apontam que sua pesquisa é uma das primeiras a oferecer ACV da manutenção preventiva de pavimentos.

Uma das grandes conquistas oriundas do ACV foi a inserção do pneu usado na produção de asfalto. A tecnologia já é utilizada em larga escala há algumas décadas, dando destinação adequada ao resíduo de borracha e aprimorando a capacidade de durabilidade e qualidade do asfalto (DONGDONG et al., 2020; CHEN et al., 2020).

O Brasil é pioneiro no uso de massa asfáltica com pneus usados, existindo inclusive normas específicas para a atividade, como é o caso da norma DNIT 111/2009, *“Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo Terminal Blending”* (CURITIBA, 2013; DNIT, 2009).

Após a descoberta da capacidade do pneu em potencializar a massa asfáltica, autores passaram a pesquisar outros materiais e compostos com o intuito de aprimorar o processo produtivo e diminuir os impactos ambientais causados pela cadeia do asfalto. Jin et al. (2022) mostraram em seu estudo que a inserção da fibra de nylon nos compostos asfálticos melhora de 2 a 5 vezes o ponto de decapagem.

Embora as taxas de implemento de borracha de pneu usado nas massas asfálticas sejam de 1% a 3%, os estudos de Chen et al. (2020) apontaram implementos de até 4,5% de borracha de pneus em massas asfálticas quentes, que mantêm os padrões de qualidade ou até melhoram a performance no aspecto de abaloamento e rachaduras.

Nos últimos anos, autores têm realizado estudos com implemento do polímero nas misturas asfálticas. Pesquisas mostram resultados promissores, como a melhora da estabilidade do pavimento em altas temperaturas, menor suscetibilidade ao envelhecimento do asfalto em termos de oxirredução e a mistura de polímeros específicos que diminuem os níveis de fraturas em ambientes úmidos.

2.2 A DRENAGEM PLUVIAL URBANA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os estudos recentes relativos à drenagem pluvial, abordando o cenário atual, os principais impactos, os desafios para gestão e, por fim, propostas sustentáveis para a área.

2.2.1 Sistemas tradicionais de drenagem pluvial

De acordo com Hou et al. (2021) e Cheng et al. (2020), os núcleos urbanos passaram a ser os locais onde vive a maior parte da população. Os meios urbanizados tendem a ter equipamentos urbanos para oferecer maior conforto, saúde e segurança à população.

No Brasil, abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, drenagem pluvial, coleta e destinação de resíduos são itens obrigatórios previstos na Lei Federal 11.445/2007, como parte constante do saneamento básico (Brasil, 2007).

Conforme Tucci (2012) e Botelho (2017), a drenagem pluvial é um sistema que tem a capacidade de coletar água da chuva e encaminhá-la por meio de tubos e canais a corpos hídricos. Segundo os autores, os sistemas podem ser classificados em microdrenagem (do telhado até a galeria pública) e macrodrenagem (que consiste

em todo o sistema de transporte até o corpo hídrico, considerando toda a bacia hidrográfica), entretanto, a definição de micro e macrodrenagem não é definida em normas ou regras, tendo interpretações diferentes de autores para autores.

Segundo Canholi (2014), os sistemas de drenagem pluvial podem ser classificados em dois tipos: o sistema unitário e separador absoluto. O primeiro, recebe esgoto sanitário acompanhado de água da chuva. Já o segundo, recebe a água da chuva em um sistema separado do efluente doméstico.

Shrestha e Garcia (2023) e Swain et al. (2020) reforçam que as diversas transformações ocorridas na realidade das cidades nas últimas décadas, como o aumento da impermeabilização do solo, as constantes mudanças climáticas e a intensificação das chuvas foram alguns dos fatores que levaram à adaptação e aprimoramento dos sistemas de drenagem pluvial.

De acordo com os autores, na maioria das vezes, as adequações foram realizadas após a ocorrência de impactos à população ou ao meio ambiente. Por outro lado, Li et al. (2022) citam que, atualmente, os modelos matemáticos estão mais calibrados para calcular o sistema, considerando as chuvas intensas.

Conforme Tucci (2016) e Botelho (2017), embora a drenagem pluvial seja um dispositivo para trazer conforto à população, devido ao inadequado uso do solo, os sistemas têm sofrido com falta de manutenção, carga excessiva, entupimentos frequentes e interligação irregular de esgoto. Esses problemas são vistos como as principais causas de alagamentos, atraindo vetores e assoreando corpos hídricos. O Quadro 1 apresenta alguns aspectos que podem causar impactos à sociedade e ao meio ambiente quando não há uma gestão adequada.

Quadro 1 - Pontos positivos e fatores que impactam a drenagem pluvial

Pontos positivos	Fatores relacionados à má gestão dos sistemas de drenagem pluvial
Manejo de águas pluviais	Carreamento de sedimentos ao corpo hídrico
Diminuição de doenças de veiculação hídrica	Risco de assoreamento de corpos hídricos
Diminuição de custos de manutenção de vias	Aumento da velocidade de escoamento
Escoamento rápido de águas pluviais de núcleos urbanos	Diminuição da água infiltrada
Oferece condição de circulação em áreas após chuvas intensas	Aumento das ocorrências de inundação e alagamentos

Fonte: adaptado de Tucci (2012), Vignisdottira et al. (2019) e Zhang et al. (2017)

A canalização da água da chuva, somada à impermeabilização do solo, tende a aumentar o coeficiente de *runoff*, caracterizado pela capacidade de escoamento superficial de águas. Essa modificação acelera e potencializa a inundação de córregos, já que a água chega mais rápido e em maior volume aos corpos hídricos (HOU et al. 2021; CHENG et al. 2020).

Conforme Tucci (2012) e Vignisdottira et al. (2019), em geral, os sistemas de drenagem pluvial não possuem filtros, transportando para os rios sedimentos, resíduos, metais pesados, dentre outros materiais que causam a perda de qualidade da água. Por essa razão, é fundamental que órgãos gestores implementem medidas para contenção de fatores causadores de poluição, especialmente, nos sistemas viários.

A poluição dos rios é agravada pelo lixiviamento de resíduos de veículos automotores e a ligação irregular de efluentes à drenagem pluvial. Por ser considerada uma poluição difusa, o tratamento e descontaminação são agravados (VIGNISDOTTIRA et al., 2019; ZHANG et al., 2017; OLECHNOWICZ, WEINEROWSKA-BORDS, 2014).

Segundo Kunkel et al. (2020) e Swain et al. (2020), outro fator de impacto proveniente da instalação dos sistemas de drenagem pluvial são os alagamentos. Quando os sistemas são mal projetados, sobrecarregados ou não há manutenção, na ocorrência de eventos extremos, ocorre o extravasamento do sistema, causando danos à população e ao meio ambiente.

Em virtude do adensamento populacional em área urbana, falta de planejamento e uso inadequado do solo, cientistas têm estudado e oferecido auxílio na implantação de novas tecnologias (SHRESTHA; GARCIA, 2023; SWAIN et al., 2020; KUNKEL et al., 2020; SWAIN et al., 2020).

2.2.2 Sistemas sustentáveis de drenagem pluvial (SUDS)

O processo de urbanização provocou inúmeros impactos ao meio ambiente. Quando o viés é voltado para o ciclo da água, observa-se a linearização de córregos, impermeabilização do solo, aumento da velocidade da água, perda da qualidade de águas superficiais, entre outros impactos. Assim, os sistemas convencionais de drenagem pluvial acabam não sendo eficazes (BRAGA, 2021).

Nas últimas três décadas, cientistas vêm realizando estudos e desenvolvendo tecnologias que possam reduzir os impactos da drenagem convencional. Essas inovações são conhecidas como sistemas sustentáveis de drenagem pluvial (SUDS⁴), termo genérico para conjuntos de drenagem que simulam os sistemas naturais (BRAGA, 2021; TUCCI, 2012)

Bertolino (2020) cita a existência de outras terminologias, como: *Best Management Practices* (BMPs); *Integrated Urban Water Management* (IUWM); *Sustainable Urban Water Management* (SUWM) que, embora com características diferentes, são conceitos pautados na gestão integrada e planejamento, com o objetivo de compensar e diminuir às áreas impermeáveis nas cidades.

De acordo com Oladunjoye, Proverbs e Xiao (2022), há diversos exemplos de SUDS, como: coberturas verdes, valas de infiltração, asfalto permeável, sumidouros, jardins de chuva, microreservatórios, dentre outros. Conforme Andersen (2020) e Razzaghamanesh e Borst (2019), a instalação de dois ou mais sistemas sustentáveis de drenagem podem suscitar em uma melhor eficiência no processo.

Conforme Wang et al. (2021) e Winston et al. (2020), os SUDS não se concentram apenas na retenção de águas pluviais e pode oferecer maior recarga de lençol freático, melhora da qualidade da água superficial e inibição de carreamento de sedimentos.

Garcia e Santamarta (2022) vão além, quando citam que os sistemas sustentáveis de drenagem pluvial prestam serviços ecossistêmicos, como a melhoria da paisagem, redução e sequestro de carbono, construção de habitats da fauna, dentre outros. O Quadro 2 apresenta como as autoras relacionaram cada tipo de sistema com o serviço sistêmico prestado.

Quadro 2- Relação entre Serviço Ecossistêmico, benefício e tipo de SUD.

Serviço Ecossistêmico	Benefício	SUD
Serviços Culturais	Melhoria da paisagem urbana Espaços abertos multifuncionais Desenvolvimento cognitivo e preservação do conhecimento, incentivo à educação ambiental	Zonas húmidas, sistemas de biorretenção, retenção, vala verdes, em geral SUD visível.

⁴ SUDS: do inglês, *Sustainable Urban Drainage System*.

Serviços de provisão	Abastecimento de água Produção de alimentos	Cisternas e demais SUDS de retenção de água, sistemas de biorretenção e áreas úmidas
Serviços de Suporte	Recarga de águas subterrâneas Redução de ruído Melhoria da qualidade do ar Redução e sequestro de carbono	SUDS de infiltração SUDS com vegetação e pavimentos permeáveis
Serviços de Regulação	Manutenção do ciclo hidrológico Purificação da água Polinização, criação de novos habitats urbanos, aumento de espécies em áreas urbanas	Todos SUDS

Fonte: adaptado de Garcia e Santamarta (2022)

Segundo os estudos de Selvakumar e O'Connor (2022), o pavimento asfáltico permeável, além de ter potencial de infiltração e recarga de aquíferos, realizam a filtragem da água, com a redução da concentração de indicadores da qualidade da água como, coliformes fecais, enterococos e *Escherichia coli*.

Ainda que os sistemas sustentáveis de drenagem pluvial sejam eficientes para manejo de águas pluviais, não se vê uma grande adesão por parte do poder público, ou mesmo dos cidadãos. Isso se deve à preocupação com o custo, desconhecimento dos SUDS e medo de ineficácia (EVERETT et al., 2015; O'DONNELL; LAMOND; THORNE, 2017).

Além do custo e falta de conhecimento do sistemas de drenagem sustentável, não há amparo legal, como por exemplo normativas que obriguem a instalação em determinados portes ou tipos de empreendimentos, como no caso de reaproveitamento de água da chuva, por exemplo.

Embora existam sistemas sustentáveis de drenagem pluvial, autores como Cipolla, Maglionico e Stojkov (2016) e Everett et al. (2016) citam que existem poucos estudos qualitativos referentes à eficiência dos sistemas, além da escassez de pesquisas sobre a viabilidade econômica.

Autores citam que para o uso adequado de sistemas sustentáveis de drenagem pluvial, o ideal é realizar a análise do sistema de acordo com a localidade, uma vez que não são todos os terrenos aptos a receberem sistemas de drenagem pluvial, a depender do tipo de solo, ocupação, declividade e outros aspectos físicos, biológicos e sociais (FERRANS et al., 2022; FAILACHE et al., 2022).

Uma boa forma de se avaliar os SUDS é por meio da correlação com Sistemas de Apoio a Decisão (DSS), criando os sistemas SUDS-DSS. São maneiras de sistematizarem os critérios para escolha de determinado sistema (FERRANS et al., 2022).

Bertolino (2020) desenvolveu um sistema de suporte à tomada de decisão para implantação de medidas alternativas de microdrenagem pluvial, para mitigação de alagamentos. O autor utilizou de seis SUDS (pavimentos permeáveis, valas vegetadas, sistemas de biorretenção, bacias de detenção, bacias de retenção e wetlands) com métricas construídas a partir de cinco aspectos físicos do solo (condutividade hidráulica do solo, condutividade hidráulica do subsolo, profundidade do lençol freático, erodibilidade do solo e declividade) para obter o SUDS mais propício, conforme o tipo de solo.

Xu et al. (2020) apresentam em seus estudos uma modelagem de DSS, chamada SOCU, na qual se trata de um modelo hidrológico que oferece a construção de sistemas de drenagem por etapas, menos custoso, com maior facilidade de instalação e maior chance de sucesso na retenção de cheias. Gao et al. (2022) também trazem um modelo que aponta a construção de sistemas por etapas mais vantajoso.

Os estudos de Oladunjoye, Proverbs e Xiao (2022) usaram o método financeiro WTP para mensurar o tempo de retorno de um sistema sustentável de drenagem. A metodologia WTP, está relacionada a intervalo de valor que o consumidor está disposto a pagar. As análises constataram que seria de aproximadamente três anos e que em dez anos haveria um retorno superior a 5 vezes o valor investido.

A percepção dos usuários no uso de SUDS também é essencial para adesão dos sistemas. O estudo de Mcewan et al. (2022) aponta que após a implementação de SUDS, houve um aumento de 17% nos comportamentos sustentáveis de vizinhos. Alves et al. (2018) apresentam em seus estudos que SUDS também cria à população mais oportunidades de recreação. Em contraponto, Gazzard e Booth (2020) comprovam que a população pode presumir que SUDS servem apenas para embelezamento, sem conhecer a real importância nos sistemas de drenagem.

Os sistemas sustentáveis de drenagem pluvial precisam ser comprovadamente viáveis no âmbito econômico, mas poucos estudos trazem essa realidade. Entretanto, sabe-se que os SUDS reduzem os gastos públicos com recuperação de áreas alagadas e inundadas, e pesquisas mostram que após instalação de SUDS,

estabelecimentos comerciais passaram a reter seus clientes por mais tempo (LAMOND, 2016, OSSA-MORENO; SMITH; MIJIC, 2017; OLADUNJOYE; PROVERBS; COLLINS, 2017).

2.3 POLUIÇÃO DERIVADA DA EROSÃO E CARREAMENTO DE SEDIMENTOS.

De acordo com Panagos et al. (2020) a erosão é uma ameaça ao meio ambiente, em razão da degradação e inutilização do solo. Corrobora Xu et al. (2022) que, além do risco à terra, a erosão traz riscos às estradas, principalmente as não pavimentadas. Seutloali e Reinhard Beckedahl (2015) relatam que existem poucos estudos relacionando erosão com estradas pavimentadas.

A erosão está intimamente ligada às estradas não pavimentadas, por não haver a impermeabilização do solo, que fica exposto. Geralmente são vias que têm carência de manutenção, devido ao fluxo de veículos, especialmente os pesados, tornando-se inadequadas ao uso (ZHAO et al., 2023; NGEZAHAYO; GHATAORA; BURROW, 2019; SEUTLOALI; REINHARD BECKEDAHL, 2015).

Cao et al. (2013) e Yang et al. (2019) apontam a erosão de estradas como uma das principais razões do impacto ambiental de assoreamento de bacias hidrográficas. Reforça Appelboom (2002), afirmando que mais de 90% sedimentos não naturais carregados aos corpos hídricos são decorrentes das estradas.

Conforme Guerra, Silva, Botelho (2012), a erosão pluvial pode ser classificada em pelo menos quatro tipos: erosão por salpico (ou *Splash*), por sulcos, por ravina e voçoroca.

A erosão por salpico, também conhecida como laminar, está relacionada com a desagregação do solo, em virtude da energia cinética da gota de chuva. Em geral, ela causa uma desagregação e erosão do solo de forma linear, sem provocar “caminhos” no solo (NGEZAHAYO; S. GHATAORA; BURROW, 2019). A Figura 3 exemplifica uma estrada com características de erosão laminar.

~

Figura 3 – Estrada com características de erosão laminar



Fonte: autoria própria, 2023

De acordo com Guerra, Silva, Botelho (2012), a erosão entre sulcos é responsável por carregar o solo desprendido, geralmente com marcações e caminhos no solo. A Figura 4 exemplifica uma estrada com características de erosão por sulcos.

Figura 4 - Estrada com características de erosão por sulcos



Fonte: autoria própria, 2023

A erosão por ravina trata-se de um processo mais agudo, com abertura de cavidades superiores a 30 cm. Quando esse processo ocorre em vias e estradas, normalmente inviabiliza a passagem de veículos, especialmente os leves (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 2014; SILVA, 1995). A Figura 5 exemplifica uma estrada com características de erosão por ravinas.

Por fim, a voçoroca, quando ocorre a fratura do solo alcançando o lençol freático, tratando-se da erosão em seu maior estágio e de maior complexidade de recuperação (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 2014; SILVA, 1995).

Figura 5 -Solo com características de erosão com ravinas



Fonte: autoria própria, 2023

Segundo Ferreira et al. (2020), o departamento de serviços florestais dos Estados Unidos é pioneiro em pesquisas de erosão derivadas de estradas. No final dos anos 60, surgiram os primeiros autores a publicar estimativas de erosão e perda de solo. Com o passar dos anos foram realizadas inúmeras pesquisas que desenvolveram estudos teóricos e empíricos para cálculo de erosão e perda de solo.

Conforme Ngezahayo, Ghataora, Burrow (2019) e Ramos Scharrón (2010), observa-se que os valores de perda de solo ou estimativa de erosão têm uma alta variação, com uma discrepância de até 100% de um modelo para o outro. A disparidade nos valores está ligada ao grande número de fatores envolvidos, como pluviosidade, tipo de solo, intensidade da chuva, uso do solo, inclinação do terreno, dentre outros.

Ngezahayo, Ghataora, Burrow (2019) definiram em seu artigo quais são os fatores que podem interferir no processo de erosão do solo em estradas. Os autores classificam em três partes: fatores ambientais e climáticos, uso da estrada e fatores geológicos, conforme descrito na Figura 6.

Figura 6 – Variantes envolvidas na erosão do solo



Fonte: adaptado de Ngezahayo; S, Ghataora e Burrow (2019)

No Brasil, existe a SiBCS⁵, classificação brasileira de tipos de solos, como Argisolo, Cambisolo, Latosolo, dentre outros. Entretanto, existem poucos estudos relacionando esses tipos de solo com a capacidade de erodibilidade. Isso ocorre, pois, a erosão pode ter relação com o horizonte exposto e também a existência ou não de vegetação (NGEZAHAYO; S. GHATAORA; BURROW, 2019; SOARES et al., 2019; VALADARES; COELHO; OLIVEIRA, 2019).

Em geral, existe um sistema unificado de classificação de solos, USCS⁶, categorizando o solo conforme seu grau de areia, silte, argila, capacidade de plasticidade e teor orgânico (CHENG LIU; EVETT, 2014; VALADARES; COELHO; OLIVEIRA, 2019). O Quadro 3 apresenta a classificação de solos, conforme USCS.

Quadro 3- Classificação de solos SUCS

Sigla	Tipo de solo
GW	Pedregulho bem graduado com areia
GP	Pedregulho mal graduado com areia
SW	Areia bem graduada
GM	Pedregulho com silte
CH	Argila de alta plasticidade
CL	Argila de baixa plasticidade, argila arenosa e siltosa
OL	Silte argilos e silte orgânico
MH	Silte inorgânico e silte finos e elástico
SC	Areia Argilosa
SM	Areia siltosa
ML	Areia fina e siltosa pequena plasticidade

Fonte: adaptado de ASTM D-2487, 2017

O estudo de Gray e Sotir (1996), a partir da classificação USCS, determinou os solos de maior e menor chance de erodibilidade, conforme Quadro 4. O eixo vertical é adimensional.

⁵ SiBCS: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

⁶ USCS: Unified Soil Classification System.

Quadro 4 – Tipo de solo e probabilidade de erodibilidade



Fonte: adaptado de Gray e Sotir (1996)

No Brasil, a norma que parametriza a classificação de solos é a ABNT NBR 6502/95, enquanto a norma internacional de classificação de solos é a ASTM d-2487. Ambas levam em consideração os fatores de areia, silte, argila, capacidade de plasticidade e teor orgânico.

2.3.1 Assoreamento no sistema de drenagem pluvial urbana.

Embora os sistemas de drenagem sejam uma forma rápida e adequada de escoar a água da chuva do meio urbano para o corpo hídrico receptor, quando os canais de drenagem são mal projetados, sobrecarregados ou não há manutenção, na ocorrência de precipitações intensas, ocorre o extravasamento do sistema, alagando a região. Por isso, a manutenção para vida útil do sistema torna-se imprescindível (KUNKEL et al., 2020; SWAIN et al., 2020).

Além da erosão ser a causadora de degradabilidade do solo, tornar estradas intransitáveis e assorear córregos, no meio urbano é um fator determinante para redução da vida útil das galerias de água pluvial. O carreamento de solo para dentro dos sistemas acelera o processo de assoreamento e perda capacidade de vazão do sistema.

De acordo com Yin et al. (2016), Rietveld, Clemens e Langeveld (2021) e Qian et al. (2022), embora os canais de drenagem sejam calculados com um coeficiente de

velocidade para autolimpeza, este muitas vezes não é suficiente quando há forte carregamento de sólidos para o sistema. Períodos chuvosos são danosos pelo lixiviamento do solo. Períodos de seca também pela desagregação do solo.

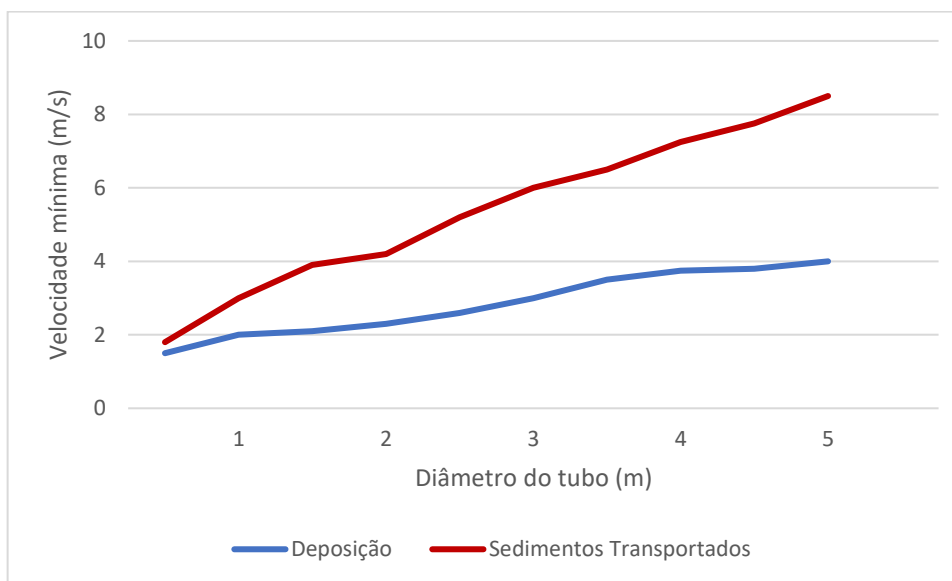
O estudo de Qian et al. (2022) apontou que a velocidade de autolimpeza, conhecido também como velocidade mínima de escoamento, deveria ser de no mínimo $0,88 \text{ m.s}^{-1}$ a $1,44 \text{ m.s}^{-1}$, e que fatores não considerados no projeto de drenagem (como diâmetro de sedimento, estrutura rodoviária e tipo de solo) são fundamentais para a agregação dos sólidos nas galerias.

Butler, May e Ackers (2003) citam que os projetos de drenagem pluvial consideram em média $0,6$ a $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ a velocidade mínima ou de autolimpeza nos sistemas. Por exemplo, o manual de drenagem da cidade de São Paulo prevê uma velocidade mínima de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$. Considerar a velocidade mínima superior ao previsto nos projetos poderia causar dificuldades de implementação, especialmente, em regiões planas, como as litorâneas.

Ackers (1991) relacionou a velocidade de escoamento para carregamento dos sedimentos dos canais de drenagem. Já Ota e Nalluri (2003) relacionaram velocidade de escoamento para deposição dos sedimentos dos canais de drenagem. Conforme a Figura 7, os estudos dos autores mostram que quanto maior o diâmetro do solo, maior será a velocidade mínima de escoamento para evitar a deposição de sólidos nas galerias.

Conforme Qian (2022), o diâmetro do grão do sedimento é fundamental para a determinação de sedimentos assoreados na tubulação. Segundo Ashley et al. (1994) sedimentos com diâmetro de 2 a 10 mm são carregados com enxurradas, a Figura 6 demonstra a relação dos dois estudos. May (2003) e Ghani (1993) afirmam que partículas superiores a $0,4\text{mm}$ são transportadas com a carga de fundo da drenagem. O principal problema dos sistemas está relacionado às partículas de tamanhos médios, que a carga de fundo não é capaz de carregar.

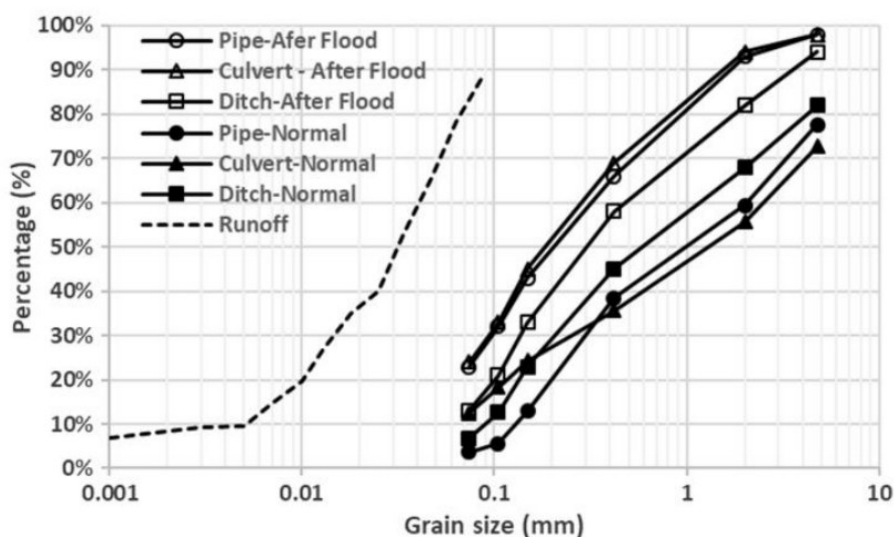
Figura 7 - Relação do tamanho do grão sedimentados na drenagem



Fonte: adaptado de Ackers (1991) e Ota e Nalluri (2003)

Conforme a Figura 8, o estudo de Qian (2022) apontou em suas análises, sólidos com diâmetros de 0,1 a 1mm sedimentados nas tubulações. O autor cita também que a porcentagem de sólidos sedimentados após enxurradas é superior aos períodos sem chuva.

Figura 8 - Relação do sólido com chuva



Fonte: Qian et al., 2022

Estudos de Wei et al. (2022), Rietveld et al. (2021) e Karlsson e Viklander (2008) levantaram o volume de sedimentos conforme uso do solo. A massa de

sedimentos na drenagem pluvial pode chegar a $0,8 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ em áreas residenciais. No Quadro 5 é possível analisar os estudos.

Quadro 5 - Massa de sedimentos na drenagem

Tipo de Uso	Taxa de carreamento de solo ($\text{kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$)	Método de medição	Referência
Residencial	0,009–0,043	Coletor na erosão	Wei et al. (2022)
Estrada de tráfego intenso	0,176–0,819	Rede nylon na entrada da drenagem	Wei et al. (2022)
Rodovia	0,0012–0,0402	Coletor na erosão	Ellis and Harrop (1984)
Estrada com trânsito intenso e residencial	0,086–0,093	Coletor na erosão	Grottker (1990)
Residencial	0,004–0,014	Coletor na erosão	Karlsson and Viklander (2008)
Estrada com tráfego intenso	0,011–0,118	Coletor na erosão	Karlsson and Viklander (2008)
Residencial	0,0017–0,110	Rede nylon na entrada da drenagem	Rietveld et al. (2021)

Fonte: adaptado de Wei et al., 2022

Wei et al. (2022), Klein et al. (2021) e Rietveld, Clemens e Langeveld (2020) constataram que os sedimentos carreados para dentro dos sistemas de drenagem não são unicamente de solo, podendo ser também resíduos domésticos, desgaste de veículos, esgoto doméstico, resíduos verdes, dejetos de animais, entre outros.

No caso dos resíduos oriundos de desgaste veicular, carregam metais pesados e outros complexos químicos prejudiciais à saúde. Resíduos verdes aumentam a taxa de matéria orgânica da água pluvial e, em geral, ocorrem de forma periódica, no período de queda das folhas. Resíduos sólidos, esgoto domiciliar e dejetos de animais, além de aumentarem a taxa de matéria orgânica na água pluvial, têm potencial infectante, são causadores de doenças e outros problemas à saúde (RIETVELD; CLEMENS; LANGEVELD, 2021).

2.3.2 Modelos de previsão à erosão

Como citado anteriormente, a ocorrência da erosão, intensificada pelas precipitações intensas, é um fator de risco ao meio ambiente, especialmente ao solo e hidrografia. Entretanto, além do risco ao meio ambiente, a erosão traz impactos econômicos, ao transporte, à produção agrícola e à população urbana (DAMBROZ et al., 2022; JUŠKO; SEDMÁK; KÚDELA, 2022).

Devido aos problemas inerentes à erosão, nas últimas décadas a comunidade científica tem estudado as ocorrências e tentado definir padrões por meio da modelagem de equações e softwares que tenham capacidade de presumir o volume e tipo de erosão. Entender a suscetibilidade de determinado solo ou bacia hidrográfica à erosão, abre a possibilidade de tentar, ainda no projeto, criar maneiras de conter ou atenuar a erosão e seu impacto (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

De acordo com Carvalho, Ribeiro e Rocha (2014), desenvolver modelagem matemática para análise do potencial erosivo é uma tarefa árdua, por dois motivos: em razão do número de fatores envolvidos e da falta de padrão nas ocorrências estudadas.

Comprimento, declividade, precipitação, intensidade da precipitação, horizonte do solo exposto, tipo de uso e fator de erodibilidade, são alguns dos fatores envolvidos na modelagem matemática para cálculo da suscetibilidade à erosão. A erodibilidade do solo talvez seja o fator mais complexo a ser encontrado, por estar ligado à desagregação do solo (CHUENCHUM; XU; TANG, 2019; JUŠKO; SEDMÁK; KÚDELA, 2022).

O dimensionamento de métricas para previsão e gestão da erosão do solo, é difícil devido a quantidade de variáveis físicas e ambientais, mesmo em estudos exaustivos como no *Loess Plateau*, que trata-se de um planalto no centro-norte da China, uma região muito estudada em virtude de suas características naturais de erosão e potencialização, provenientes de ações antrópicas. Diversos autores realizam monitoramento ou previsão de erosão no Planalto de Loess, mesmo em estudos com solo de características semelhantes, os resultados de erosão são diferentes (CHEN et al., 2023; XU et al., 2022; WANG et al., 2021).

Outro fato é que, de acordo com USDA (2023), modelos de previsão à erosão precisam de dados de entrada (*inputs*) de qualidade, para se obter resultados

(*outputs*) confiáveis. A precisão dos modelos mais desenvolvidos como o WEPP é de 50%.

Os próximos subcapítulos abordam as principais modelagens matemáticas encontradas: previsão do volume de solo a ser erodido em determinada área.

2.3.2.1 Equação Universal de Perda de Solos - USLE

De acordo com Fox e Wilson (2010), até os anos 40, estudos sobre erosão se limitavam aos quesitos qualitativos, entretanto, os cientistas das áreas de geologia e solo, principalmente nos Estados Unidos, passaram a tentar entender os tipos de erosão e estimar suas quantidades.

A partir de estudos empíricos, Wischmeier e Smith (1978), obtiveram a equação Universal da Perda de Solos. Segundo Barbosa et al. (2015), na equação de USLE são considerados diversos fatores que regem o processo erosivo, como a precipitação, o comprimento e declividade da rampa ou encosta, a erodibilidade do solo, o uso do solo e as práticas de conservação do solo.

Bertoni e Lombardi Neto (2017) citam que a equação Universal de Perda de Solos não considera sedimento nos sopés das encostas e não tem assertividade para rampas longas ou declivosas (superiores a 9%). A equação de USLE é específica para erosão laminar, não sendo precisa para erosão de ravina.

A equação de USLE foi estudada por diversos autores, até que nos anos 80 foi calibrada e conhecida como RUSLE, onde é possível calcular fatores por softwares computacionais (ZHANG et al., 2013; Barbosa et al., 2015). Carvalho, Ribeiro e Rocha (2014) apontam que diversos autores propuseram ajustes para os fatores da RUSLE, especialmente pelas características da localidade de estudo.

Atualmente, com o desenvolvimento do geoprocessamento, os estudos levam em consideração a equação RUSLE, que é definida por:

$$A = R.K.(L.S).(C.P), \text{ onde}$$

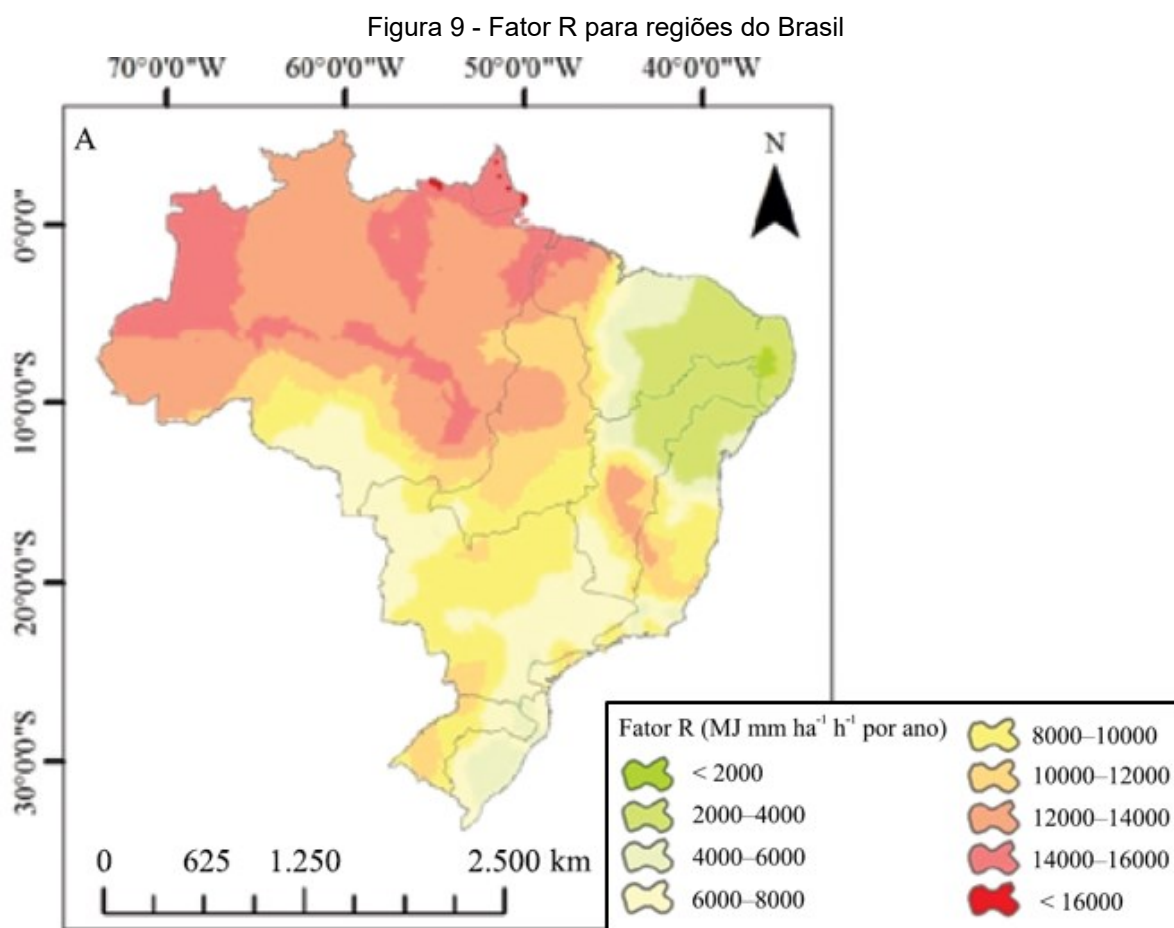
A = perda média anual de solo por unidade de área ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); R = erosividade da chuva ($\text{Mj} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); K = erodibilidade do solo; L = comprimento da vertente; S = declividade da vertente; C = uso e manejo do solo; e P = práticas conservacionistas.

O fator R está relacionado com a capacidade de erosão da chuva do local estudado, definido em $(\text{Mj} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1})$. A proposta de Fournier (1956), modificada por Lombardi Neto (1977) é que o fator R seja encontrado relacionando de forma empírica à precipitação média mensal com a precipitação média anual, pela seguinte fórmula:

$$EI = 67,355 (r^2 \cdot P^{-1})^{0,85}, \text{ onde}$$

EI = média mensal do índice de erosão, $\text{Mj} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; r = precipitação média mensal, mm; P = precipitação média anual, mm.

Foster et al. (1981), evidenciaram em seus estudos o fator R para o Brasil, conforme Figura 9.



Fonte: adaptado de Foster et al. 1981

O fator K (fator de erodibilidade) é o de maior complexidade da equação, geralmente calculado a partir de ensaios em campo ou em laboratório. O fator de erodibilidade é mais sensível e pode ocasionar variações nos resultados das

estimativas de erosão. Paranhos Filho (2000) conseguiu encontrar valores para a erodibilidade do solo, conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Fator de erodibilidade do solo

Classificação anterior	Prado, 2011	Fator K, em ton.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm
Areias Quartzosas	Neossolo Quartzarênico	0,045
Areais Quartzosas Hidromórficas	Neossolo Quartzarênico Hidromórfico	0,0047
Glei Pouco Húmico	Gleissolo Háptico	0,01
Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho	0,016
Latossolo Roxo	Latossolo Vermelho	0,012
Terra Roxa Estruturada	Nitossolo Vermelho	0,018

Fonte: adaptado de Paranhos Filho (2000) e Prado (2011).

De acordo com Antoneli et al. (2022), o fator LS está relacionado com o comprimento e declividade da vertente ou encosta. Segundo Lombardi (2010), o cálculo do fator LS não prevê a concavidade do trecho, simplificando para uma declividade linear. Foster et al. (1981), definem o fator LS na seguinte equação:

$$LS = \sqrt{L/100} \cdot (1,36 + 0,97S + 0,1385S^2)$$

Onde: L = comprimento do declive, m; S = grau do declive, %.

O fator C e P são relacionados com o uso do solo. O fator C é adimensional e definido conforme a cobertura do solo, com o valor máximo 1, para solos expostos. O fator P tem relação com possíveis estruturas ou formas de uso do solo que possam conter a erosão, chamadas de práticas conservacionistas. Por exemplo, no plantio em platôs que inibem a erosão, no caso de não haver práticas conservacionistas, o valor de P é 1 (CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

Wischmeier e Smith (1978) apontaram em seus estudos que a erosão no solo é natural e que uma tolerância na perda de solo. O objetivo do cálculo de tolerância de perda de solo é revelar quando um solo não é atrativo pela quantidade de

sedimentos perdidos. A equação de Bertoni e Lombardi Neto (1975) está relacionada com a quantidade de argila entre horizonte A e B. Definido na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação de tipo de solo com fator r

Situação	Fator r
Para uma relação inferior a 1,5, ou seja, se a porcentagem de argila do horizonte A dividida pela porcentagem de argila do horizonte B for inferior a 1,5, considera-se a espessura total dos horizontes A e B	1
Para uma relação textural entre 1,5 e 2,5, considera-se 75% da espessura desses horizontes	0,75
Para uma relação textural superior a 2,5 considera-se apenas 50% da espessura desses horizontes.	0,5

Fonte: adaptado de Bertoni e Lombardi Neto (1975)

$$C = h \cdot r$$

Onde: C = camada de solo tolerada de ser removida do horizonte (mm.ano⁻¹); h = espessura dos horizontes A e B (m); r = fator que expressa o efeito relação textural, conforme tabela 2. Para se encontrar o volume, basta dividir C por 1000 e multiplicar pela área de análise.

2.3.2.2 *Water Erosion Prediction Project - WEPP*

Com o advento do Geoprocessamento, por meio das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica – SIG, do inglês GIS⁷, devido à interação de dados georreferenciados com ferramentas computadorizadas, Lane e Nearing (1989) desenvolveram o modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), no qual utiliza-se os fundamentos da USLE com aprimoramento, levando em consideração a deposição de sedimentos nas encostas.

O WEPP foi desenvolvido por cientistas do USDA, Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. O modelo utiliza fatores como hidrologia, botânica, mecânica e hidráulica dos solos, para se obter as estimativas de erosão em bacias hidrográficas (USDA, 2023).

⁷ GIS: Geographical Information System.

Segundo Oliveira et al. (2021), o WEPP é um modelo matemático que simula a erosão considerando conceitos físicos associados aos mecanismos erosivos e dividindo o processo erosivo em: erosão intersticial causada por salpicos (erosão laminar) e por erosão em sulcos resultante dos efeitos de energia hidráulica da água. O WEPP é diferente da USLE, pois não leva em consideração os sulcos, apenas a erosão laminar.

O estudo de Piscoya et al. (2020) mostra que a aplicação do modelo WEPP em solo com erosão por sulcos se mostra adequada. Na mesma direção, Ferreira et al. (2020) compararam em seu estudo valores de erosão observado em campo com valor estimado no WEPP para Latossolos Vermelhos descobertos, a diferença do observado para o estimado pelo modelo foi inferior a 4%.

Por outro lado, Garcia (2001) aponta que, em seus estudos, a aplicação do WEPP teve uma variação superior a dez vezes para previsão de perda de solo em estradas com 20 metros e declividade de até 1%, ou seja, não se mostrando eficiente em trecho curtos e de baixa declividade.

Numerosos estudos como o de Barbosa et al. (2019) e Ferreira et al. (2020) realizaram a calibração do modelo para determinados solos, regiões ou uso do solo. De acordo com a USDA (2023), o WEPP é integrado ou tem interface com diversos softwares à base de dados, o que aprimora a capacidade de resposta do modelo.

Segundo USDA (2023) e Machado et al. (2003), o WEPP oferece diretamente cinco módulos, conforme Quadro 7.

Quadro 7 - Módulos do WEPP

Modelo	Especificidade
WEPP-ROAD	Estimativas de sedimentos de erosão em estradas
<i>Disturbed WEPP</i>	Previsão de erosão em encostas após alguma perturbação
ERMiT	Modelo específico para bacias afetadas pelo queimadas
<i>Tahoe Basin</i>	Modelo específico para bacia hidrográfica do lago Tahoe;
<i>Rock-Clim</i>	Da origem a conjuntos de dados Climáticos para outros aplicativos

Fonte: adaptado de USDA, 2023















Conforme Carvalho, Ribeiro e Rocha (2014); e Ferreira et al. (2020), existem diversos modelos e interfaces derivados do WEPP, mas não se pode afirmar que há

algum mais preciso que o outro, em função da variedade de parâmetros de entrada, como: solo, pluviosidade, erodibilidade, relevo, uso do solo, entre outros.

O modelo *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), é um software a ser instalado no computador. Cientistas da USDA, desenvolveram uma interface online na qual adiciona-se informações de entrada (*input data*), sendo possível obter como resultados as estimativas de erosão de uma estrada não pavimentada. A Figura 10 ilustra o software *FS WEPP*.

Figura 10 - Interface online da ferramenta FS WEPP

Forest Service WEPP Interfaces

	WEPP:Road 1756 runs YTD	WEPP:Road Batch 246 runs, 17704 segments YTD	
	ERMiT 1258 runs YTD	ERMiT batch (download) 11 runs YTD	
	Disturbed WEPP 4570 runs YTD	Disturbed WEPP batch (download) 38 runs YTD	
	FuME (Fuel Management) 37 runs YTD	Rock:Clime	
	Tahoe Basin Sediment Model 25 runs YTD	Lake Tahoe WEPP Watershed GIS Interface	
	WEPPcloud	WEPPcloud Postfire Erosion Prediction (PEP)	
	QWEPP	Peak Flow Calculator	

Units: metric U.S. customary [personality](#) (a to z)

Fonte: adaptado de FS-USDA, 2023

Embora o modelo WEPP seja de alta capacidade de previsão de erosão, ainda há limitações. O modelo não possui boa aplicabilidade para áreas superiores a 2,6km², nesses casos, existe a necessidade de compilar dois ou mais estudos. O WEPP não foi desenvolvido para estimar erosão por voçorocas ou movimento de massa. No caso de canteiro de obras, pastagens e trilhas esportivas, haverá a necessidade de desenvolver extensões para o ajuste do modelo (FERREIRA et al., 2020; USDA, 2016).

2.3.2.3 Outros modelos para previsão de erosão de solo.

Com a elaboração e calibração de modelagens de previsão de erosão tradicionais como USLE, RUSLE e WEPP, surgiram inúmeros outros que são extensões ou aperfeiçoamento. Com o passar do tempo verificou-se que os modelos são assertivos nas regiões onde são criados, mas há incerteza na aplicação em outras áreas (JAAFARI et al., 2014; CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

Cada modelo de previsão tem seus pontos fortes e fracos. Neste sentido, cabe ao pesquisador determinar qual é mais conveniente para o estudo em questão (JAAFARI et al., 2014; CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014). Por exemplo, Parsakhoo et al. (2014) citam que o WEPP é incerto para cálculo de erosão de longas estradas, já o modelo SEDMODL é assertivo em calcular a erosão em segmentos de estradas.

Zhao et al. (2023) apontam inúmeros modelos de previsão de erosão, modelos físicos como o recente *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) e *Cinematic Runoff and Erosion Model* (KINEROS2). Modelos empíricos, como o Modelo de Entrega de Sedimentos Rodoviários (SEDMODL2), modelo de Erosão da Superfície Rodoviária de Washington (WARSEM), modelo de erosão da superfície da estrada baseado em GIS (ROADMOD), índice de erosão e entrega da estrada (READI).

Os modelos citados por Zhao et al. (2023) estão no Quadro 8, com os objetivos de cada um e suas limitações.

Quadro 8 - Ferramentas de predição à erosão

Modelo	Tipo	Objetivo	Limitações	Autor
USLE	Físico	Primeiro modelo	Não leva em consideração Sulcos e deposição nas laterais Frágil para grandes declividades	Wischmeier e Smith (1978) e Fox e Wilson (2010)
WEPP	Físico	Vários modelos, para encostas, estradas, áreas modificadas por perturbações	Não assertivo para grandes estradas ou bacias superiores a 2,6km ²	USDA (2023) e PARSAKHOO et al., 2014
KINEROS	Empírico	Útil para cálculo de deposição em tanques	Não aplicável para plantio em encostas	Ziegler, Giambelluca e Sutherland (2002)
SEDMODL	Empírico	Variação comparada com métodos diretos, inferior a 10% em estradas	Aplicado apenas para estradas	Naghdi et al. (2017)
WARSEN	Empírico	Tem interação com GIS, assertivo dentro das estradas de Washington	Tende a superestimar erosão fora do estado de Washington, necessita de calibração	Fu, Newham e Field (2009)

Fonte: com base em Zhao et al. (2023)

Jaafari et al. (2014) e Carvalho; Ribeiro e Rocha (2014) evidenciam que os métodos físicos são assertivos e servem de base para o desenvolvimento de outros modelos. Entretanto, são mais demorados, possuem custo elevado e dependem de testes laboratoriais. Já os métodos empíricos são rápidos de serem aplicados com parâmetros pré-dimensionados, porém, são assertivos na localidade que foram desenvolvidos, precisando ser calibrados para outras regiões.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Consta neste capítulo a metodologia empregada, bem como materiais utilizados e caracterização do local de estudo com o objetivo de responder ao problema de pesquisa apresentado.

3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA

Segundo Marconi e Lakatos (2017, p. 33), define-se método científico como “o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo conhecimento válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista”.

Ou seja, um conjunto de procedimentos definidos, os quais podem ser aplicados em outros conjuntos de amostras, devendo alcançar resultados proporcionais. Caramelli (2012, p. 2) afirma que o método científico é a “receita do bolo” na pesquisa.

Conforme Silva e Menezes (2005), o método científico é classificado quanto a sua natureza, abordagem do problema, objetivo e procedimento técnico. O método científico do presente trabalho foi apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Método científico

Tipo	Classificação	Razão
Natureza	Aplicada	Porque a pesquisa construiu conhecimentos voltados à solução de problemas específicos.
Abordagem do Problema	Quantitativa	Porque foram utilizados dados numéricos e tabulados, havendo a interpretação destes e a especulação de suas causas e resultados.
Objetivo	Explicativa	Porque a pesquisa indicou e avaliou as causas de um fenômeno.
Procedimento Técnico	Experimental	Porque havia um objeto de estudo com o controle de variáveis, teste, comparação e avaliação

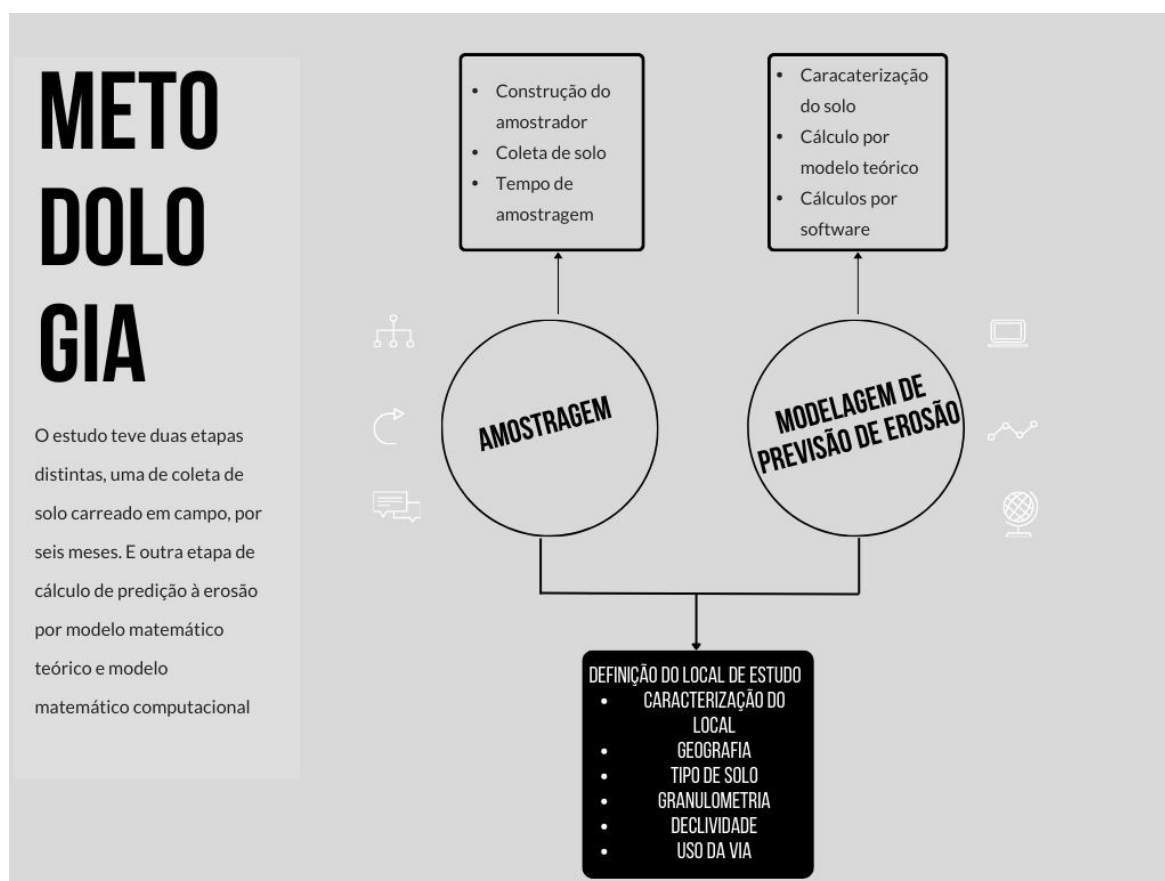
Fonte: com base em Gil, 2017.

O presente estudo foi realizado em duas etapas, para alcance dos objetivos geral e específico. As duas etapas percorreram trajetórias diferentes.

Inicialmente, foi realizada uma coleta de dados em campo, com instalação de equipamento para obter-se o volume de solo erodido de uma via não pavimentada, carreado para uma via pavimentada.

Em um segundo momento, realizou-se o cálculo da estimativa de perda de solo por erosão diante de modelos matemáticos. Foi escolhido um modelo teórico, por meio da Equação Universal de Perda de Solo, e outro modelo digital, por meio do software *Water Erosion Prediction Project* (WEPP).

Figura 11 - Fluxograma da metodologia



Fonte: autoria própria, 2023

3.2 DEFINIÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO DE CASO

O local escolhido foi a rua Francisco Ferreira da Cruz (antiga Rua Quatorze), na cidade de Almirante Tamandaré, Paraná, Brasil. O trecho utilizado foi delimitado entre as ruas José Gavelike e Leonardo Muraski.

Houve três razões para a escolha do local: I - declividade mediana da rua, mais assertiva para previsão de erosão pelos métodos escolhidos⁸; II - cruzamento de rua não pavimentada com rua pavimentada, para entender a extensão do impacto na drenagem pluvial; III - na via pavimentada onde o sólido é carregado, existe um redutor de velocidade, tornando-se uma contenção natural do carregamento de solo, na qual facilita a instalação de equipamento para coleta de sedimentos erodidos.

3.2.1 Localização

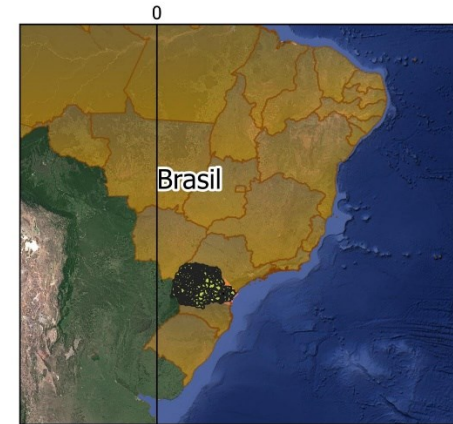
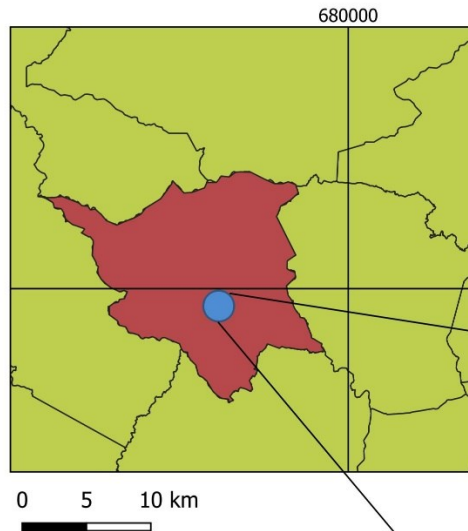
O trecho de análise está localizado na rua Francisco Ferreira da Cruz (antiga Rua Quatorze), Almirante Tamandaré, Paraná, Brasil. Para simplificação da descrição do trecho, será adotada a sigla Tx.

Trata-se de uma rua irregular, não pavimentada, com 80 metros de comprimento. A largura da rua é irregular, variando de 5 a 8 metros. Com área de 480m². A Figura 12 refere-se à localização do local de estudo, já a Figura 13 está relacionada à imagem do local.

⁸ Conforme Barbosa et al. (2015).

Figura 12 - Geolocalização

Localização da área de estudo



Legenda

- Pluviômetro
- Trecho de estudo
- Bueiro

Univerisdade Tecnológica do Paraná (UTFPR)
 Programa de Pós Graduação em Ciências e
 Tecnologia Ambiental (PPGCTA)
 Aluno: ildemar Luis Moro Vianna Junior

Curitiba, 01 de agosto de 2023

Fonte: ITCG
 Sistema de Coordenadas UTM - Sirgas 2000

Fonte: autoria própria com base QGIS, IBGE, 2023

Figura 13 - Imagem do trecho de análise



Fonte: autoria própria, 2023

3.2.2 Geografia

A cidade de Almirante Tamandaré está localizada a 950 metros acima do nível do mar. O clima, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger é Cfb. A região possui clima mesotérmico com temperatura média de 18 °C, com chuvas bem distribuídas durante todo o ano, verões frescos e invernos frios (Almirante Tamandaré, 2023; Riberio et al., 2021). O Tx está localizado a 979 metros do nível do mar. Os dados climatológicos de Almirante Tamandaré constam na Figura 14.

Figura 14 - Dados climatológicos

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	20.3	20.4	19.6	18	14.8	13.7	13.3	14.4	15.8	17.4	18.1	19.7
Temperatura mínima (°C)	17.4	17.5	16.8	15	11.8	10.5	9.8	10.4	12.2	14	14.9	16.5
Temperatura máxima (°C)	24.5	24.7	23.8	22.2	18.8	18.1	17.9	19.6	20.9	22.3	22.6	24.2
Chuva (mm)	245	197	135	79	93	95	95	74	132	130	131	168
Umidade(%)	85%	85%	84%	83%	82%	83%	82%	79%	79%	82%	82%	83%
Dias chuvosos (d)	17	15	14	8	7	6	6	5	8	11	11	14
Horas de sol (h)	6.1	6.4	5.7	5.5	5.1	5.8	6.1	6.8	6.0	5.5	5.6	6.3

Fonte: adaptado de INPE (2023) e Climate-data (2019)

Para alcance do objetivo de correlacionar a precipitação com a quantidade de solo erodido, houve a necessidade de monitorar a pluviosidade no período de análise. Foi instalado um pluviômetro da marca Multitec, do tipo manual, com capacidade de 150mm. Instalado a cerca de 100 metros do ponto de monitoramento a três metros de altura, sem nenhum tipo de interferência.

3.2.3 Solo

O trecho do local de estudo (Tx) está localizado sobre o solo de classe Latossolo Bruno Distrófico, que tem como particularidade ser pobre em nutrientes, com características de solo argiloso, com aumento do teor de argila proporcional à profundidade, com alta capacidade de perda de umidade (Embrapa, 2021).

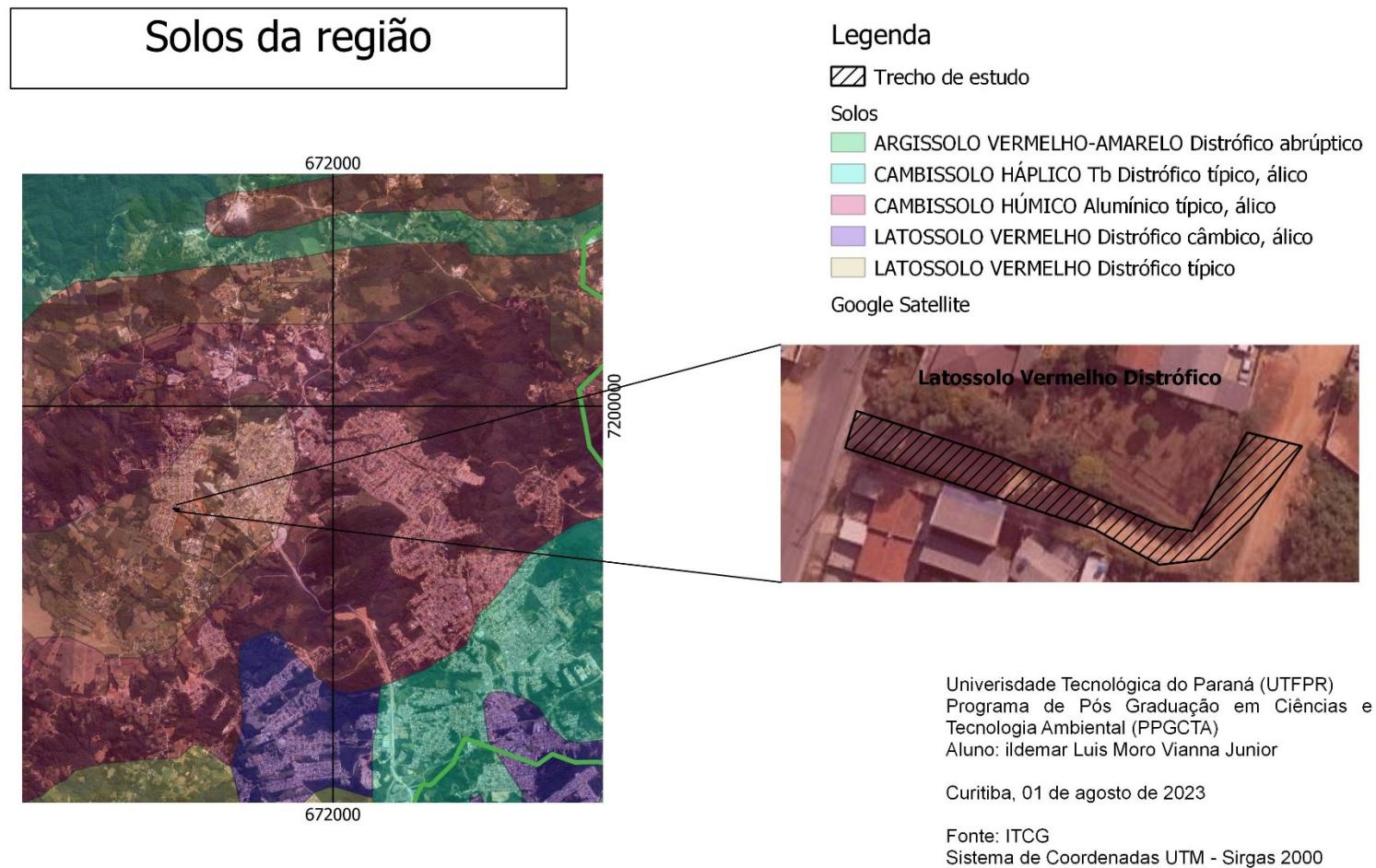
O local de estudo tem um horizonte antrópico de 0,40m e horizonte b latossólico de 0,88m⁹.

$$C = h \cdot r$$

Onde, C = camada de solo tolerada de ser removida do horizonte (mm.ano⁻¹); h = espessura dos horizontes A e B (m); r = fator que expressa o efeito relação textural, conforme tabela 2. Para se encontrar o volume, basta dividir C por 1000 e multiplicar pela área de análise. A Figura 15 demonstra os solos da região e o tipo de solo do trecho de estudo.

⁹ Dado mensurado pelo autor.

Figura 15 - Mapa de solo



Fonte: autoria própria, com base em QGIS, IAT, 2023

De acordo com Wischmeier e Smith (1978) é comum que ocorra erosão em qualquer tipo de solo. Bertoni e Lombardi Neto (1975) desenvolveram uma equação de tolerância de perda de solo. A equação de perda de solo está relacionada com a quantidade de argila entre os horizontes A e B. Definido na tabela 2.

3.2.4 Fator de empolamento e densidade

Para cálculo e discussão do volume e massa do material carregado para dentro da drenagem pluvial, foi necessário realizar o cálculo do fator da densidade e empolamento do solo.

A densidade é um fator que relaciona massa e volume de determinado material. Quanto maior a massa e menor volume, maior será a densidade do material.

A densidade é definida pela seguinte equação:

$$d = \frac{m}{v}, \text{ onde:}$$

d: Densidade do material;

m: massa do material;

v: volume do material.

O empolamento é a expansão do volume de solo pós escavação (ROCHA; BARROS; VIEIRA, 2012). De acordo com Ricardo e Catalini (2013), pode-se calcular o fator de empolamento pela equação a seguir:

$$V_s = V_c (1 + E), \text{ onde:}$$

V_s: volume de solo expandido;

V_c: volume de solo compactado;

E: fator de empolamento.

O fator de empolamento é definido por Ricardo e Catalini (2013), conforme Quadro 10.

Quadro 10 - Fator de empolamento

Tipo de solo	Fator E
Rocha detonada	50%
Solo argiloso	40%
Solo comum (terra)	25%
Solo arenoso e seco	12%

Fonte: adaptado de Ricardo e Catalini, 2013

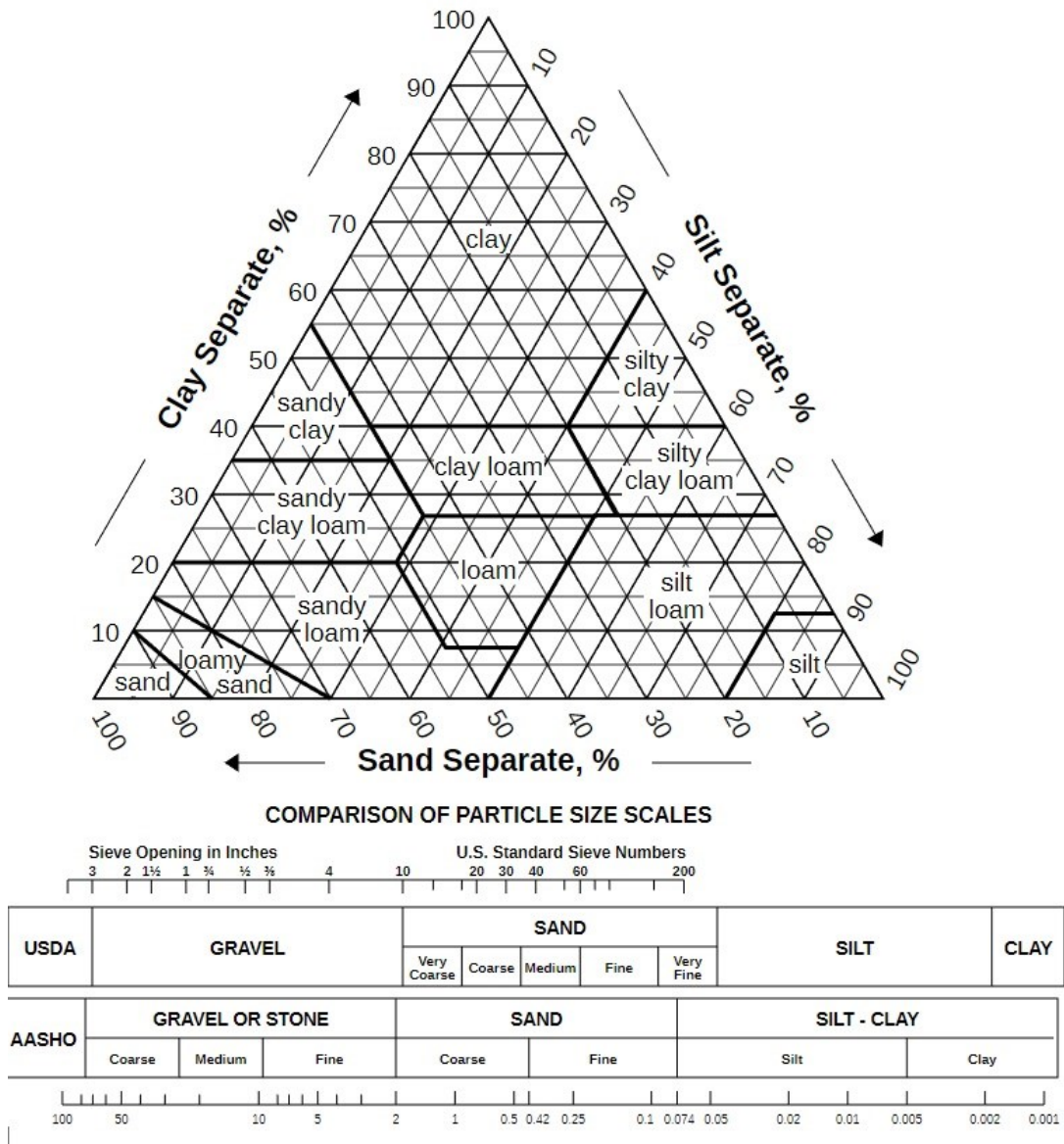
3.2.5 Granulometria do solo

Foi preciso realizar a caracterização da granulometria do solo para que se possa estudar o fator de erodibilidade (GRAY; SOTIR, 1996; PARANHOS FILHO, 2000), impacto do carreamento de sólidos na drenagem pluvial (WEI et al., 2022) e caracterização do tipo de solo para ferramenta FS-WEPP (USDA, 2023).

Para a caracterização, houve a coleta de 0,02m³ de solo do trecho de estudo, realizado o quarteamento e peneiramento, conforme a norma ASTM D-2487. Após encontradas as porcentagens de pedregulhos, areia, silte e argila, a caracterização foi realizada de acordo com a taxonomia de solos USDA, conforme Figura 16. Dado o área, inferior a 3.000m², o solo foi coletado em um ponto.

A amostra de solo foi submetida ao ensaio de granulometria, com passagem de material em peneiras de 25,4 mm (1 polegada) até a de 0,075 mm. A porção que passou na peneira de 0,075mm foi analisada por meio de laser, conforme ISO 13320:2009.

Figura 16 - Taxonomia de solos USDA



Fonte: USDA, 2023

3.2.6 Declividade

A declividade é um item fundamental para o cálculo de previsão de erosão, previsto na equação de USLE e WEPP. A declividade pode ser definida da seguinte equação:

$$D = \frac{dv}{dH} \cdot 100\% \text{ onde:}$$

D= declividade da rampa, em porcentagem;

dV = cota maior – cota menor, em metros;

dH = comprimento da rampa, em metros.

Na Figura 17, consta o levantamento topográfico da região. Os dados foram retirados da base do IAT.

Figura 17 - Mapa do levantamento topográfico



Fonte: autoria própria, com base em QGIS, IAT, 2023

3.2.7 Drenagem e uso da via

O trecho do local de estudo (Tx) é uma via sem pavimentação e sem sistema de drenagem pluvial por galerias. A água é drenada pela superfície, especialmente a borda direita, sentido norte, em razão da declividade, escoando para uma via pavimentada com sistema de drenagem. Na Figura 18 é possível verificar o solo da rua não pavimentada, carregado para a via pavimentada.

Figura 18 - via pavimentada



Fonte: autoria própria, 2023

A via que recebe o material carregado é pavimentada com sistema de drenagem e bueiros a cada 80 metros de distância, aproximadamente, conforme Figura 19.




O trecho do local de estudo (Tx) trata-se de uma rua não pavimentada, com tráfego de nível baixo, com volume médio de 18 veículos leves e 2 veículos pesados¹⁰, por dia.

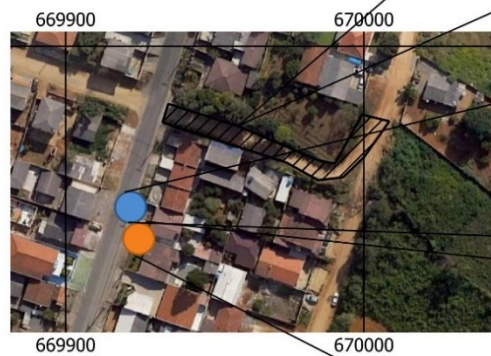
¹⁰ Contagem realizada em dois dias, pelo autor.

Figura 19 - Localização do coletor de sedimentos

Instalação do Equipamento

Legenda

-  Pluviômetro
-  Trecho de estudo
-  Bueiro



Univerisdade Tecnológica do Paraná (UTFPR)
Programa de Pós Graduação em Ciências e
Tecnologia Ambiental (PPGCTA)
Aluno: Ildemar Luis Moro Vianna Junior

Curitiba, 01 de agosto de 2023

Fonte: ITCG
Sistema de Coordenadas UTM - Sirgas 2000

Fonte: autoria própria, com base em QGIS, Google Satelite, 2023

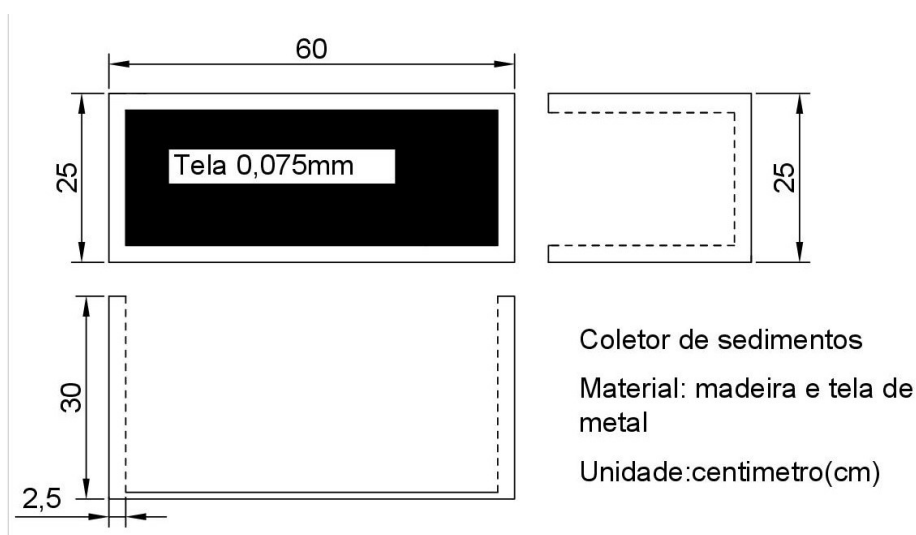
3.3 AMOSTRAGEM

Um dos objetivos deste estudo compreendeu mensurar o volume de solo erodido em via urbana não pavimentada. Para se obter o volume erodido, foi instalado um coletor de solo no local de análise.

3.3.1 Montagem do amostrador

O equipamento foi montado com uso de madeira e tela de metal com abertura de 0,075mm, o projeto foi elaborado no software AutoCad. A Figura 20 demonstra o projeto do amostrador e a Figura 21 apresenta o equipamento, após sua construção. O coletor tem aproximadamente 40L de capacidade.

Figura 20 – Projeto do coletor



Fonte: autoria própria, 2023

Figura 21 - Coletor de sedimentos



Fonte: autoria própria, 2023

3.3.2 Instalação do amostrador

O equipamento foi instalado dentro do bueiro. Pela Figura 22 é possível verificar como o amostrador foi instalado dentro do bueiro, por baixo da boca de lobo. O equipamento ficou apoiado nas laterais (paredes) do bueiro.

Figura 22 - Coletor instalado



Fonte: autoria própria, 2023

A 100 metros do equipamento foi inserido um pluviômetro da marca Multitec, para que se pudesse relacionar o volume de precipitação com a quantidade de solo carreado, conforme Figura 23.

Figura 23 - Pluviômetro instalado



Fonte: autoria própria, 2023

3.3.3 Período de amostragem

O amostrador foi instalado e mantido no local por seis meses. A periodicidade de retirada de solo do equipamento foi de 10 dias, ou, após chuvas intensas, com mais de 5mm. A Figura 24 apresenta o amostrador em um dia chuvoso.

Figura 24 - Caixa instalada em dia chuvoso



Fonte: autoria própria, 2023

3.3.4 Amostra de solo

Em todas às vezes que o solo foi retirado, houve a pesagem com balança da marca Original, modelo SL 0363 de 0,001 kg de precisão. Os valores foram salvos em uma planilha contendo informações da data de retirada e peso de solo coletado.

Foi realizado um cálculo de correlação entre massa dividido pela pluviometria. Os dados foram compilados com as informações constantes na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados coletados do amostrador

Data	Massa	Volume de solo	Pluviosidade	Correlação Massa.pluviosidade⁻¹
-------------	--------------	-----------------------	---------------------	---

Fonte: autoria própria, 2023

3.3.5 Estimativa do assoreamento da galeria de drenagem pluvial

Casos de entupimento dos tubos da galeria pluvial, como o apresentado na Figura 1, são comuns e podem ser a causa de alagamentos em regiões urbanizadas. O assoreamento acelerado dos canais tende a reduzir a vida útil do sistema.

Com o objetivo de entender os riscos de carreamento de solo para os canais de drenagem pluvial, foi realizada a simulação de assoreamento do solo nos tubos.

O volume da seção transversal de um tubo, é dado pela seguinte equação:

$$V = \left(\frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsen\left(\frac{r-h}{h}\right) + (h-r) \sqrt{r^2 - (h-r)^2} \right) \cdot L, \text{ onde:}$$

$\pi = 3,14$;

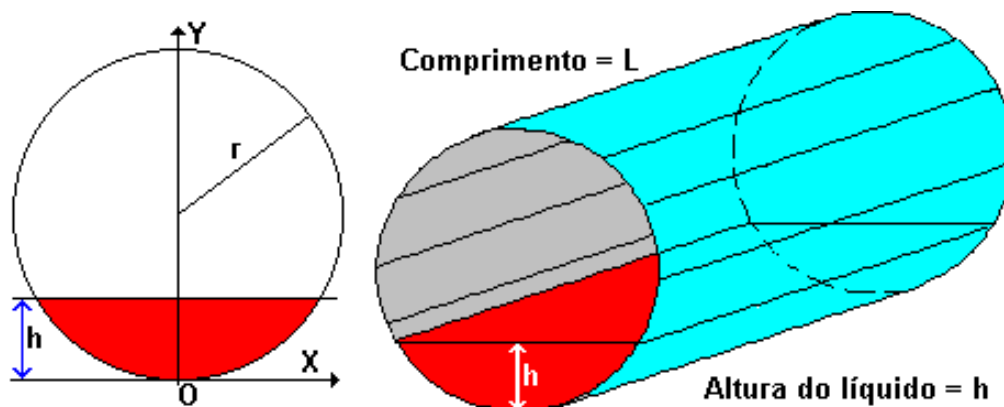
r = raio do tubo, em metros;

h = altura do preenchimento da seção transversal, em metros;

L = comprimento da seção, em metros.

A simulação considerou a redução de 25% da seção transversal, e assoreamento de 100% do volume de solo carreado para a galeria. A Figura 25 demonstra a seção transversal de um cilindro.

Figura 25 - Cálculo do volume da seção transversal



Fonte: adaptado de UEL, 2023.

3.4 MODELOS DE PREVISÃO DE EROSIÃO

Um dos objetivos deste estudo compreende realizar a previsão de erosão de solo por meio de modelagem matemática. Foram escolhidos dois métodos: um teórico e o outro por meio de software.

3.4.1 Modelo de previsão de erosão USLE

O modelo USLE de Wischmeier e Smith (1978) é definido por:

$$A = R.K.(L.S).(C.P), \text{ onde}$$

A = perda média anual de solo por unidade de área ($\text{ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$);

R = erosividade da chuva ($\text{Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$);

K = erodibilidade do solo;

L = comprimento da vertente;

S = declividade da vertente;

C = uso e manejo do solo;

P = práticas conservacionistas.

Como citado na revisão da literatura, existem diversas maneiras de obter os fatores da equação de USLE. Para esse estudo, foram escolhidas as equações atreladas ao estudo inicial de Wischmeier e Smith (1978).

A equação do fator R, erodibilidade da chuva, foi determinada por Fournier (1956) e modificado por Lombardi Neto (1977), definida em:

$$EI = 67,355 (r^2.P^{-1})^{0,85},$$

EI = média mensal do índice de erosão, $\text{Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$; r = precipitação média mensal, mm; P = precipitação média anual, mm.

R = Somatório de EI de janeiro até dezembro.

Como citado anteriormente, o fator K é um fator complexo de ser encontrado para a equação de USLE, o escolhido para este estudo foi determinado por meio das pesquisas de Paranhos Filho (2000), por se tratar de um solo com características semelhantes com o do local de estudo. O autor define o fator K de $0,016 \text{ ton.ha.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}$ para Latossolo Vermelho.

O fator LS foi determinado por Wischmeier e Smith (1978), correlacionado o seno do ângulo de declividade. Com objetivo de reduzir erros, Foster et al. (1981) converteram a equação para números racionais, conforme descrito a seguir:

$$LS = \sqrt{L}/100 (1,36 + 0,97S + 0,1385S^2), \text{ onde:}$$

L = comprimento do declive, em metros;

S = grau do declive, %.

O fator C, em caso de solos expostos, sem nenhum tipo de vegetação, deve-se atribuir o valor 1 (WISCHMEIER e SMITH, 1978; BARBOSA et al., 2015)

O P, considera medidas conservacionistas. Como o trecho de estudo não possui nenhuma medida conservacionista, então adota-se o valor 1.

O presente estudo não levou em consideração fatores externos ao trecho em estudo e desconsiderou possíveis interferência de imóveis lindeiros.

3.4.2 Modelo de previsão de erosão WEPP

O modelo *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) é um software baseado em GIS. Existem inúmeras extensões e variações do WEPP. Para o estudo em questão, foi escolhido o modelo FS WEPP:Road, desenvolvido pelo departamento de Serviços Florestais dos Estados Unidos, para previsão de erosão em estradas não pavimentadas.

Como citado na revisão de literatura, o FS WEPP dentre outros softwares de previsão de erosão, precisa de parâmetros de entrada (input) para se obter resultados (output). No caso do FS WEPP, os dados de entrada podem ser separados em dois tipos: parâmetros abertos, que depende geralmente de dados históricos; parâmetros pré-definidos pelo próprio software, tem relação com o tipo do solo e uso da via.

Os parâmetros abertos, foram apresentados no Quadro 11. Há necessidade de descrição pluviosidade média mensal, temperatura máxima e mínima média mensal, número de dias úmidos, dados relacionados com o perfil pluviométrico da região, relacionado ao fator de erodibilidade da chuva. Localização Geográfica, elevação são dados relacionados com a localidade do trecho de estudo. Taxa de pedregulho no solo, comprimento e largura da rua e inclinação, são fatores relacionado a área de estudo.

Os fatores de comprimento e inclinação do córrego, seriam para estrada onde o desague da drenagem é direto em um canal natural, com objetivo de analisar o solo erodido também no canal. Como o trecho de estudo o desague é na galeria de água pluvial, esses fatores são desconsiderados e atribuído o valor mínimo aceito pelo software, conforme orientação dos autores.

Quadro 11 - Parâmetros do FS WEPP

Parâmetro	Unidade
Pluviosidade média mensal	Em milímetros (mm)
Temperatura máxima média mensal	Em Celsius (°C)
Temperatura mínima média mensal	Em Celsius (°C)
N de dias com chuva por mês	Adimensional
Localização Geográfica	Em Graus Decimais
Elevação	Em metros (m)
Pedregulho no solo	Em porcentagem (%)
Comprimento da estrada Largura da estrada	Em metros (m)
Comprimento da Talude	Em metros (m)
Inclinação do Talude	Em graus (°)
Comprimento do canal de solo	Em metros (m)
Inclinação do canal de solo	Em graus (°)

Fonte: adaptado de FS-WEPP, 2023

Os parâmetros pré-determinados foram apresentados no Quadro 12. O parâmetro de textura do solo é distribuído em cinco grupos, dos mais argilosos para os menos argilosos. O parâmetro de tipo de estrada está relacionado com a qualidade da pista de rolagem, das pistas sem deformações e até mesmo as com erosões superiores a 10mm. O tipo de superfície apontado se trata de solo natural, com cobertura de cascalho ou pavimentação. Por fim, o nível de tráfego indica a quantidade de uso da via pela rodagem de veículos.

Quadro 12 - Parâmetros pré-determinados

Parâmetro	Unidade
Textura do Solo	Muito Argilosa Argilosa/Franco Argilosa Areia/Arenosa Silte/Franco Siltosa Areia Franca
Tipo de Estrada	Estrada nova com vala lateral Estrada antiga com vala assoreada com rochas ou vegetação Estradas com sulcos inferiores a 10 mm Estradas com sulcos superiores a 10 mm ou esburacadas
Tipo de superfície da estrada	Natural Com cascalho Pavimentada
Nível de tráfego	Leve Médio Intenso

Fonte: adaptado de FS-WEPP, 2023

A Figura 26 demonstra o painel de parametrização do software FS-WEPP, onde houve a caracterização de acordo com os dados da região de estudo.

Figura 26 - Parametrização FS-WEPP

WEPP:Road WEPP Forest Road Erosion Predictor

Climate Station	Soil Texture
*Almirante Tamandaré/PR Brazil + BIRMINGHAM WB AP AL FLAGSTAFF WB AP AZ MOUNT SHASTA CA	clay loam silt loam sandy loam loam
<input type="button" value="Custom Climate"/> <input type="button" value="Closest Wx"/>	Rock (%) 20

Road Design		Gradient (%)	Length (ft)	Width (ft)
Insloped, bare ditch Insloped, vegetated or rockd ditch Outsloped, rutted Outsloped, unrutted	Road	4	200	13
	Fill	50	15	
	Buffer	25	130	

Road surface: Native Graveled Paved
Traffic level: High Low None
Years to simulate:

Fonte: FS-WEPP, 2023

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os resultados e discussão, respectivamente. Os resultados foram apresentados conforme a metodologia, caracterização do solo do local de estudo, amostragem de carreamento de sedimento à drenagem pluvial e estimativa por modelagem da perda de solo no local de estudo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O presente capítulo abordará a caracterização do solo, conforme apontado na metodologia. Uma amostra de solo foi caracterizada afim de obter o tipo do solo do trecho de estudo. A Figura 27 apresenta o processo de peneiramento do solo.

Figura 27 - Ensaio de granulometria do solo



Fonte: autoria própria, 2023

Os valores encontrados na peneira constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do solo

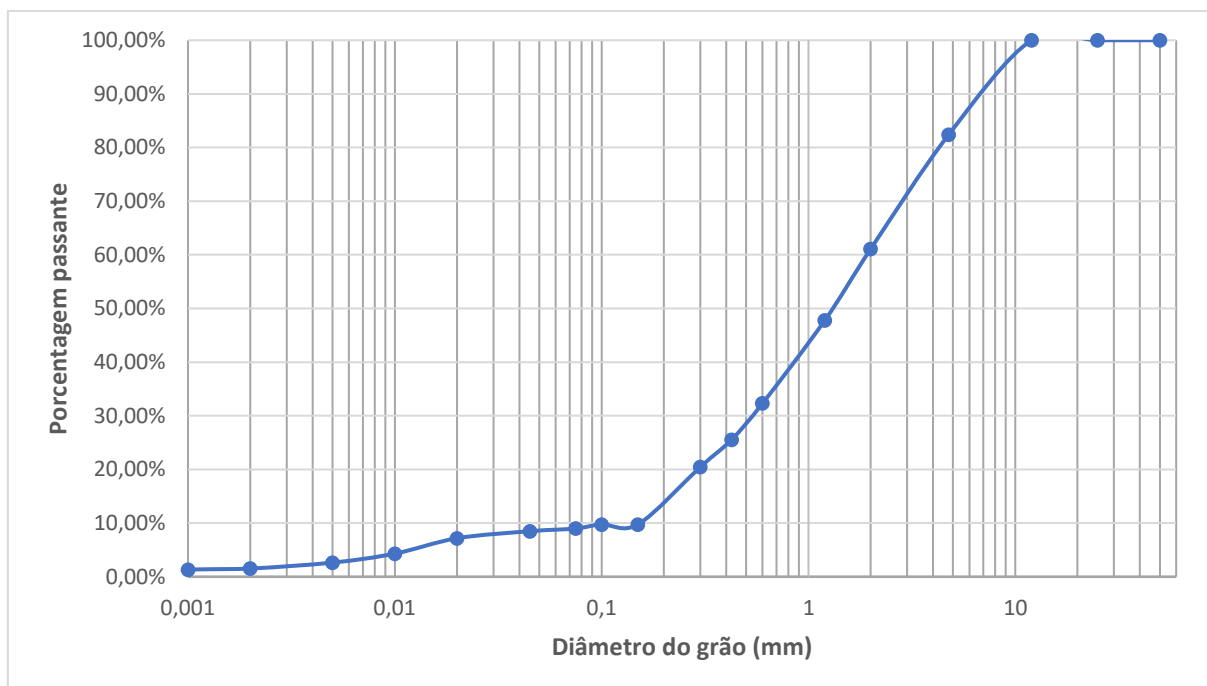
Tamanho da Peneira	Volume de solo retido na peneira¹¹	Porcentagem de solo retido na peneira	Tipo de análise	Tipo de solo
25,4	0,00	0,00%	Peneiramento	Pedregulho
12,7	0,00	0,00%	Peneiramento	Pedregulho
4,76	88,11	17,62%	Peneiramento	Pedregulho
2	106,41	38,90%	Peneiramento	Pedregulho
1,2	66,53	52,21%	Peneiramento	Areia
0,6	77,34	67,68%	Peneiramento	Areia
0,425	33,85	74,45%	Peneiramento	Areia
0,3	25,5	79,55%	Peneiramento	Areia
0,15	53,5	90,25%	Peneiramento	Areia
0,1	3,82	90,25%	Peneiramento	Areia
0,075	2,54	91,01%	Peneiramento	Areia
0,045	6,55	91,52%	Difração por laser	Silte
0,02	14,35	92,83%	Difração por laser	Silte
0,01	8,35	95,70%	Difração por laser	Silte
0,005	5,53	97,37%	Difração por laser	Silte
0,002	4,02	99,20%	Difração por laser	Argila
Total	500,00			

Fonte: autoria própria, 2023

Com os valores encontrados no ensaio de granulometria, foi possível encontrar curva granulométrica, de acordo com a Figura 28.

¹¹ As medidas inferiores a 0,075mm foram realizadas por difração a laser, conforme ISO 13320:2009.

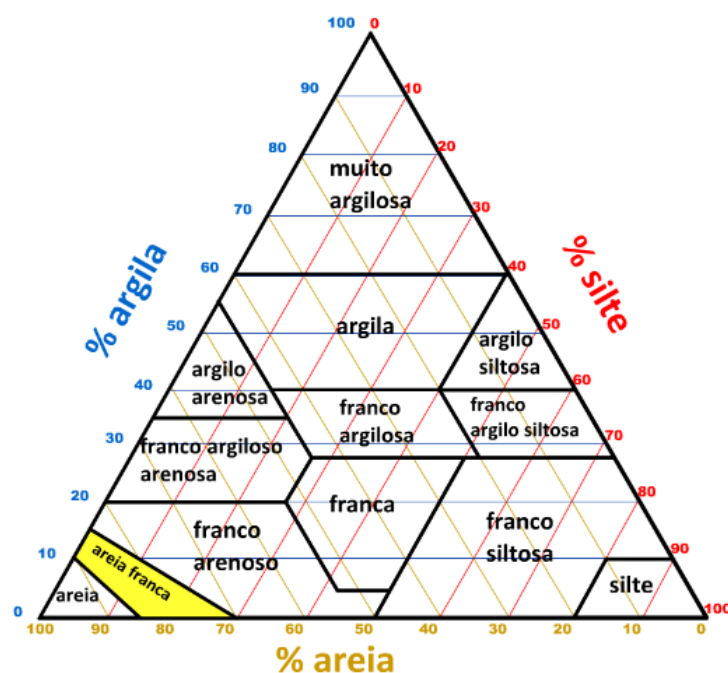
Figura 28 - Curva Granulométrica



Fonte: autoria própria, 2023

Observando-se a curva granulométrica e porcentagem de areia, silte e argila, pode-se caracterizar o solo conforme Figura 29. Trata-se de um solo de areia franca, onde mais de 80% de seu conteúdo tem teor de solo.

Figura 29 - Tipo de solo



Fonte: autoria própria, 2023

- Caracterização do tipo de solo

Após análise da granulometria, pode-se caracterizar o tipo de solo, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, conforme Figura 30.

Figura 30 - Classificação de tipo de solo

Major divisions		Group symbol	Group name
Coarse grained soils more than 50% retained on or above No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 (4.75 mm) sieve	clean gravel <5% smaller than No.200 Sieve	GW well-graded gravel, fine to coarse gravel
			GP poorly graded gravel
		gravel with >12% fines	GM silty gravel
			GC clayey gravel
	sand ≥ 50% of coarse fraction passes No.4 (4.75 mm) sieve	clean sand	SW well-graded sand, fine to coarse sand
			SP poorly graded sand
sand with >12% fines		SM → silty sand	
		SC clayey sand	
Fine grained soils 50% or more passing the No.200 (0.075 mm) sieve	silt and clay		ML silt
	liquid limit < 50	inorganic	CL lean clay
		organic	OL organic silt, organic clay
	silt and clay liquid limit ≥ 50	inorganic	MH elastic silt
			CH fat clay
		organic	OH organic clay, organic silt
Highly organic soils			

Fonte: adaptado de USDA, 2023

O solo do trecho em análise, da rua não pavimentada, está classificado próximo à areia siltosa. Nos estudos de Grey e Sotir (1996), caracterizou-se solo de areia siltosa como um dos tipos de solos mais erodíveis que existe, com alta capacidade de perda de sedimentos.

Para o cálculo da densidade do solo escavado, foi utilizado a equação abaixo:

$$d = \frac{m}{v} = \frac{0,62\text{kg}}{0,5\text{L}} = 1,24 \text{ kg.L}^{-1} \text{ ou } 1240\text{kg.m}^{-3}$$

A densidade encontrada de 1,24 kg.L⁻¹ foi importante para obter-se o volume da massa carregada e posteriormente o cálculo da estimativa do assoreamento do canal de drenagem.

Para o cálculo do fator de empolamento, foi utilizado a equação abaixo:

$$V_s = V_c (1 + E)$$

$$V_c = \frac{V_s}{1+E} = \frac{0,5}{1+0,25} = 0,4\text{L}$$

O volume de solo empolado de 0,4L foi importante para obter-se o volume de solo empolado e posteriormente o cálculo da estimativa do assoreamento do canal de drenagem.

Para o cálculo da densidade do solo compactado, foi utilizado a equação abaixo:

$$d = \frac{m}{v} = \frac{0,62\text{kg}}{0,4\text{L}} = 1,55 \text{ kg.L}^{-1} \text{ ou } 1550\text{kg.m}^{-3}$$

O volume de solo empolado de 1,55 kg.L⁻¹ foi importante para obter-se o volume da massa carregada e posteriormente o cálculo da estimativa do assoreamento do canal de drenagem. A Figura 31 apresentar a massa de 0,5L de solo desempolado.

Figura 31 - Pesagem de 0,5L de solo



Fonte: autoria própria, 2023

Houve também o cálculo da tolerância da perda de solo, definido por meio do estudo de Bertoni e Lombardi Neto (1975).

$$C = h \cdot r$$

Horizonte a - 0,4m

Horizonte b - 0,88m

$$C = 1,28 \cdot 0,75 = 0,96 \text{mm} \cdot \text{ano}^{-1} \text{ ou } 0,00096 \text{m} \cdot \text{ano}^{-1}$$

Como trata-se de uma área de 480m², o volume de solo tolerado pela equação é de 0,3608m³·ano⁻¹. A densidade é de 1,55 ton·m⁻³. Portanto, a massa aproximada tolerada de perda é de 0,5592 ton·ano⁻¹.

4.2 AMOSTRAGEM DO CARREAMENTO DE SOLO

Na Tabela 5 consta a quantidade de solo retirado do amostrador. Início no dia 10/02/2023 e término em 10/08/2023.

Tabela 5 - Dados da coleta de solo retirado do amostrador

Data	Massa (kg)	Volume (L)	Pluviosidade (mm)	Correlação (Massa.Pluviosidade⁻¹)
12/02/2023	58,2	46,9	26	2,24
14/02/2023	6,1	4,9	18	0,34
18/02/2023	24,2	19,5	12	2,02
19/02/2023	7	5,6	8,4	0,83
21/02/2023	8	6,5	7	1,14
23/02/2023	4,1	3,3	6,5	0,63
03/03/2023	6	4,8	5	1,20
07/03/2023	83	66,9	35	2,37
08/03/2023	24,4	19,7	18	1,36
10/03/2023	13	10,5	12,2	1,07
12/03/2023	5,9	4,8	10,5	0,56
22/03/2023	6	4,8	7,1	0,85
01/04/2023	3	2,4	0	n.a
11/04/2023	2,9	2,3	0	n.a
14/04/2023	73	58,9	29	2,52
15/04/2023	4,4	3,5	6	0,73
18/04/2023	23	18,5	12,5	1,84
26/04/2023	5,1	4,1	6,5	0,78
04/05/2023	70	56,5	36	1,94
10/05/2023	15	12,1	14	1,07
20/05/2023	3	2,4	0	n.a
30/05/2023	3	2,4	0	n.a
03/06/2023	53	42,7	17	3,12
12/06/2023	64	51,6	26	2,46
13/06/2023	46	37,1	39	1,18
14/06/2023	45	36,3	33	1,36
15/06/2023	34	27,4	22	1,55
25/06/2023	4	3,2	0	n.a
05/07/2023	4	3,2	0	n.a
12/07/2023	72	58,1	24	3,00
13/07/2023	18	14,5	16	1,13
17/07/2023	24	19,4	20	1,20
19/07/2023	12	9,7	16	0,75

28/07/2023	15	12,1	8	1,88
08/08/2023		0,0		n.a
Valor encontrado em campo	839,30	676,9	490,70	1,71
Estimativa para um ano	1678,6	1353,79	981,4	

Fonte: autoria própria, 2023

Como resultado, encontrou-se uma massa carregada para a drenagem pluvial de aproximadamente 839,50kg, com um volume de aproximadamente 0,68m³ de solo.

O monitoramento foi realizado por seis meses, com três meses em período mais chuvoso e três meses menos chuvosos. De acordo com este estudo, a média anual de carregamento de solo para a drenagem pluvial seria de aproximadamente 1678kg. No ano de 2023, observou-se um verão com um volume reduzido de chuvas, quando comparado a média, mas contraponto, as chuvas no inverno foram acentuadas, inclusive gerando médias mensais recordes.

Aplicando-se a massa específica do solo, encontra-se um volume de aproximadamente 1,35m³ para o trecho de estudo

A massa de sedimentos encontrada de 1678 kg.ano⁻¹ do trecho é cerca de 150% superior ao limite máximo tolerado por Bertoni e Lombardi (1975). Existem alguns fatores que podem ser os responsáveis pela erosão e carregamento de solo acelerado.

O solo utilizado para cobertura da pista tem grande fração de areia e é caracterizado com um solo altamente erodível, de acordo com Gray e Sotir (1996). Solos de pedregulho ou seixo são menos erodíveis, entretanto mais caros, devido se tratar de material de menor disponibilidade e de usos mais nobres como base para pavimentação. O solo mais argiloso, também tem um fator de erosão menor, mas em períodos secos tendem a oferecer mais partículas em suspensão (pó).

A média de 3,99 kg.m⁻².ano⁻¹ de sedimentos carregados para dentro da galeria pluvial é 4 a 20 vezes maior do que o encontrado nos estudos de Wei et al. (2022) e Rietveld et al. (2021), que foram estudos realizados em áreas urbanas, mas regiões sem influência de vias não pavimentadas.

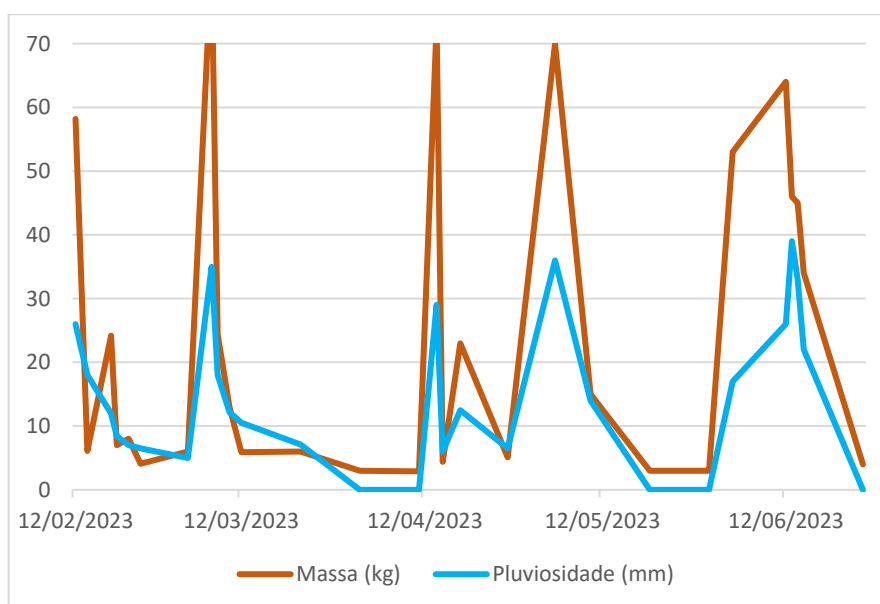
O resultado deste estudo se aproxima de estudos realizados em áreas rurais como o de Sosa-Pérez; Macdonald (2017) o qual calculou $3 \text{ kg/ m}^2.\text{ano}^{-1}$ e Bodoque et al. (2017), o qual estimou $5 \text{ kg.m}^2.\text{ano}^{-1}$ ou mais.

Embora os estudos sejam realizados em regiões distintas e com metodologias que se diferem, o presente estudo sinaliza que a drenagem pluvial de vias pavimentadas próxima a vias não pavimentadas sofre uma pressão no aspecto de assoreamento e entupimento, com uma perda de seção transversal maior do que a prevista em normas e planos de drenagem.

Como descrito anteriormente, mais de 70% das partículas encontradas no solo do trecho de estudo são de mesmo tamanho (0,01mm a 4mm) do material sedimentado em tubulações de drenagem nos estudos de Qian et al. (2022), mostrando que há uma tendência a esse material assorear de forma acelerada nas galerias de água pluvial.

Pela Figura 32, pode-se analisar a correlação massa de solo erodido e carregado x precipitação. Pode-se verificar que o maior volume de solo erodido e carregado acontece nos dias com maior índice de pluviosidade. Tal fato pode ocorrer devido ao solo sofrer maior intensidade do fator de erosividade da chuva, conforme apontam Kinnell (2022) e Carvalho, Ribeiro e Rocha (2014). A energia das gotículas de chuvas intensas é superior à de gotículas de chuvas leves, fazendo com que aumente a desagregação do solo.

Figura 32 - Relação da pluviosidade com massa de material carregado



Fonte: autoria própria, 2023

Pela correlação entre massa e precipitação, é possível verificar que a média foi de $1,71 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$. A relação variou de $0,34 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ a $3,12 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$. Pela correlação apresentada, existem dois principais aspectos evidenciados: a relação diretamente proporcional (quanto mais chuva, mais solo carregado) e o aumento de solo carregado após períodos longos de seca.

Há relação diretamente proporcional entre massa de solo erodido e carregado com o volume de precipitação, em geral quanto mais chuva mais solo erodido. Esse fator ocorreu por quase todo o período de análise.

A correlação de $2,5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ ou mais, só ocorreu após períodos com mais de 20 dias de seca, que foram os casos dos dias 14/04, 03/06 e 12/07. Analisou-se que o dia 13/06 teve o maior volume de chuvas do período, obtendo-se um volume de solo erodido inferior aos dias acima citados. As datas apresentadas vieram de períodos de seca, com pouca ou quase nenhuma chuva, enquanto o dia 13/06 foi oriundo de uma sequência de chuvas diárias.

Os fatos mostram que a ocorrência de chuvas intensas e longos períodos sem chuva são favoráveis à erosão em vias não pavimentadas. Assim como Qian et al. (2022) citam em seus estudos, períodos longos de seca também são facilitadores de erosão da via.

4.3 ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DA GALERIA DE DRENAGEM PLUVIAL

Com objetivo de entender os riscos do assoreamento de solo na galeria de água pluvial, com os dados encontrado de em campo, com volume de $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ foi possível estimar quanto metros lineares de tubo poderiam ser afetados com a diminuição de seção transversal. Para a presente estimativa, foi considerado uma redução de 30% da seção transversal dos canais com o carregamento de solos. O diâmetro dos tubos considerado foi de 0,6m, comumente utilizados nos projetos de drenagem pluvial.

$$V = \left(\frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsen\left(\frac{r-h}{h}\right) + (h-r) \sqrt{r^2 - (h-r)^2} \right) \cdot L, \text{ portanto,}$$

$$L = \frac{V}{\left(\frac{\pi r^2}{2} - r^2 \arcsen\left(\frac{r-h}{h}\right) + (h-r) \sqrt{r^2 - (h-r)^2}\right)}$$

$$L = \frac{1,35}{\left(\frac{\pi 0,3^2}{2} - 0,3^2 \arcsen\left(\frac{0,3-0,18}{0,18}\right) + (0,18-0,3) \sqrt{0,3^2 - (0,18-0,3)^2}\right)}$$

$$L = 18,97 \text{ m.ano}^{-1}$$

Considerando que todo o material fique assoreado na canalização, de acordo com a estimativa apresentada, cerca de 19 metros de tubos da drenagem poderiam sofrer redução de 30% no período de um ano. A presente estimativa, pode mostrar na prática o impacto causado pelo carreamento de solo às galerias de drenagem pluvial.

4.4 PREVISÃO DE EROSIÃO.

Conforme apontado no capítulo 3.4, o presente capítulo apresentará a estimativa de erosão, de acordo com a equação USLE e através do software FS-WEPP.

4.4.1 Previsão de Erosão pela equação de USLE

A equação de USLE utilizada para previsão de erosão, está descrita abaixo. Em seguida cada fator da equação será calculado em separado, conforme descrito na metodologia. A Tabela 6 apresenta o cálculo do fator R para cada mês.

$$A = R.K.(L.S).(C.P), \text{ onde}$$

- Cálculo do fator R:

Tabela 6 - Cálculo do fator R

Mês	Equação	Fator R
El janeiro	$67,355 \cdot \left(\frac{245^2}{1574}\right)^{0,85}$	1487,64

El fevereiro	$67,355 \cdot \left(\frac{197^2}{1574}\right)^{0,85}$	1.026,85
El março	$67,355 \cdot \left(\frac{135^2}{1574}\right)^{0,85}$	540,11
El abril	$67,355 \cdot \left(\frac{79^2}{1574}\right)^{0,85}$	217,21
El maio	$67,355 \cdot \left(\frac{93^2}{1574}\right)^{0,85}$	286,64
El junho	$67,355 \cdot \left(\frac{95^2}{1574}\right)^{0,85}$	297,20
El julho	$67,355 \cdot \left(\frac{95^2}{1574}\right)^{0,85}$	297,20
El Agosto	$67,355 \cdot \left(\frac{74^2}{1574}\right)^{0,85}$	194,36
El setembro	$67,355 \cdot \left(\frac{132^2}{1574}\right)^{0,85}$	519,87
El outubro	$67,355 \cdot \left(\frac{130^2}{1574}\right)^{0,85}$	506,55
El novembro	$67,355 \cdot \left(\frac{131^2}{1574}\right)^{0,85}$	513,19
El dezembro	$67,355 \cdot \left(\frac{168^2}{1574}\right)^{0,85}$	783,32
Somatório de El		6.670,14

Fonte: autoria própria, 2023

$$R = 6.670,14 \text{ Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$$

Foster et al. (1981), apontou em seus estudos que o fator R na região de estudo variação de $6.000 \text{ Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ a $8.000 \text{ Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. O valor encontrado no presente trabalho está de acordo com estudos anteriores.

- Fator K

O fator K, não foi calculado, conforme descrito na metodologia, foi utilizado o dado dos estudos de Paranhos Filho (2000):

$$K = 0,016 \text{ton.ha.h. ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Fator LS

$$LS = \sqrt{L/100} (1,36 + 0,97S + 0,1385S^2)$$

$$LS = \sqrt{\frac{80}{100}} \cdot (1,36 + 0,97 \cdot 0,125 + 0,1385 \cdot 0,125^2)$$

$$LS = 1,327.$$

O fator LS, é uma relação entre comprimento do trecho de estudo e declividade, quanto mais próximo a 1 menos íngreme é o trecho de estudo.

- Fatores C e P

O fator C considera-se 1 por se tratar de solo descoberto, o fator P considera-se 1 por não haver nenhuma medida de conservação do solo.

Calculado e encontrado os fatores da equação USLE, pode-se chegar a massa de perda de solo dos locais com as características do local de estudo.

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

$$A = 6.670,14 \cdot 0,016 \cdot 1,327 \cdot 1 \cdot 1$$

$$A = 141,62 \text{ ton.ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$$

$$A = 14,1620 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$$

Para a área de 480m² do local de estudo, a massa de solo perdida é de 6.797,16 kg.ano⁻¹.

O valor encontrado pela equação de USLE para perda de solo do trecho estudado é aproximadamente 350% do valor encontrado em campo (1678 kg.ano⁻¹). A equação de USLE superestimou o volume de erosão.

As razões entre a diferença em campo para a obtida na equação podem ser inúmeras (SOUZA, 2021; CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014; BARBOSA; et al., 2015).

De acordo com Baptista (2003) e Bertoni e Lombardi Neto (2010), o fator K é o mais complexo de ser alcançado com exatidão, em razão da fórmula ter sido

desenvolvida, inicialmente, para trechos específicos com 25 metros de comprimento e 9% de declividade, além do fator K estar diretamente interligado com as condições físicas do solo.

Ferreira et al. (2007) citam em seu estudo que solos similares na riqueza de ferro podem variar o grau de erodibilidade, por se tratarem de solos ricos em óxido de ferro com baixa ou alta cristalinidade.

Kinnel (2022) cita que é comum a equação de USLE superestimar resultados para pequenas áreas, como é o caso do presente estudo, e também subestimar os resultados para grandes áreas, quando há a análise da erosão de uma bacia hidrográfica inteira, por exemplo. Os próprios autores da equação Wischmeier e Smith (1978) citam que, em razão da variação da intensidade das chuvas, a equação de USLE pode não ser assertiva quando comparada a estudos de curto período de tempo.

Por fim, outra característica do solo do trecho em estudo que pode ter afetado os resultados foi a existência de sulcos. Em geral, a equação de USLE calcula a previsão em solos com erosão laminar (BARBOSA et al., 2015; CARVALHO; RIBEIRO; ROCHA, 2014).

Os fatores C e P, de práticas conservacionistas e uso do solo não devem ser inexatos, uma vez que se trata de solo exposto e que não tem nenhuma prática que possa reduzir a erosão do solo. O fator de erodibilidade da chuva, fator R, foi bem próximo, menos de 5% de diferença, ao que os estudos que Foster et al. (1981) calcularam para as regiões do Brasil.

4.4.2 Previsão de Perda de solo pelo software FS-WEPP

Conforme apontado no capítulo 3.4.2, o FS-WEPP é uma ferramenta online, por esta razão, serão apresentados os parâmetros utilizados e também os resultados encontrados. A Figura 33 apresenta os resultados da erosão pela ferramenta FS-WEPP.

Figura 33 - Resultado da previsão de erosão pela ferramenta FS-WEPP



WEPP:Road Results



INPUTS			
Climate	Almirante Tamandare/PR/Brazil + Modified by Rock:Clime on April 23, 2023 from Valdivia Chile final 3 999999 0 T MAX 21.67 21.67 20.00 15.56 12.78 10.56 10.00 11.67 13.89 15.56 17.78 20.56 deg C T MIN 12.78 11.67 8.89 7.78 6.67 5.56 5.00 5.00 5.56 7.78 10.56 11.67 deg C MEANP 244.86 196.60 134.87 78.23 90.93 94.49 96.27 74.17 130.05 130.56 132.59 166.88 mm # WET 16.91 14.89 13.98 7.89 6.89 6.00 6.11 5.04 7.87 10.94 11.10 13.97		
Soil texture	sandy loam with 40% rock fragments (road: 65%; fill: 52.5%; buffer: 40% rock)		
Road design	Outsloped, rutted		
Surface, traffic	graveled surface, low traffic		
	Gradient (%)	Length (m)	Width (m)
Road	12.5	80	6
Fill	0.1	0.3	
Buffer	0.1	0.3	

30 - YEAR MEAN ANNUAL AVERAGES

	Total in 30 years
1601 mm precipitation from	3678 storms
260 mm runoff from rainfall from	1416 events
2 mm runoff from snowmelt or winter rainstorm from	14 events
1144.80 kg road prism erosion	
668.69 kg sediment leaving buffer	

Fonte: adaptado FS-WEPP, 2023

Na Figura 33 apresentam-se os parâmetros livres de input, como temperatura média máxima e mínima, precipitação e número de dias chuvosos (com mais de 5mm de precipitação), comprimento, largura e declividade, porcentagem de cascalho no solo. Existem também os parâmetros pré-estabelecidos, como: tipo de estrada,

inexistência de sistema de drenagem e buracos ou erosão por ravinas; tipo de solo, com areia franca; tipo de uso, baixo tráfego.

Os resultados, apontados como output, são calculados para históricos de 30 anos, encontrando uma média de perda de solo de 1144,80 kg.ano⁻¹. Pode-se encontrar um fator de 2,38 kg.m².ano⁻¹ ou 23,80 ton.ha ano⁻¹. O *runoff* do solo é de 260mm devido às fortes chuvas. O *runoff* previsto no FS-WEPP é de 9x do que o tolerado na equação de Bertoni e Lombardi Neto (1975).

Os resultados encontrados no software FSWEPP (de 2,38 kg.m².ano⁻¹), quando comparados com os dados encontrados em campo (de 3,99 kg.m².ano⁻¹) demonstram que a diferença é de aproximadamente 40% de diferença. Embora mais próximo assertivo do que a equação de USLE, o modelo precisa de ajuste para ser utilizado para previsão de erosão para o local de estudo.

4.5 ALINHAMENTO DOS RESULTADOS DE ACORDO COM OS OBJETIVOS PROPOSTOS

O Quadro 13 relaciona o fator e os resultados encontrados para alcance dos objetivos específicos do presente trabalho.

Quadro 13 - Objetivos específicos e resultados do trabalho

Objetivo específico	Fator	Resultado
Realizar levantamento in loco do carreamento de solo de rua não pavimentada para rua pavimentada.	O levantamento foi realizado com instalação de amostrador no bueiro pelo período de seis meses.	A massa de solo carreado para a galeria pluvial é 1678 kg.m ² .ano-1 Para o trecho de estudo, uma média 3,99 kg.m ² .ano-1.
Correlacionar intensidade da pluviosidade com a erosão do solo.	Correlacionou-se a intensidade da pluviosidade com erosão do solo por meio do gráfico da Figura 33.	Os períodos de chuvas intensas causam mais de 80% do carreamento do solo para a galeria pluvial.
Realizar a predição de erosão de solo de rua não pavimentada por modelo matemático teórico.	Foi utilizado o modelo USLE, para previsão da erosão.	A previsão de erosão pelo modelo de USLE foi de 6.797,16kg.ano-1, 3,5 vezes o valor encontrado em campo.
Realizar a predição de erosão de solo de rua não	Foi utilizado o modelo FS-WEPP, para previsão da erosão.	A previsão de erosão pelo modelo do FS WEPP, foi de 1144,80

pavimentada por modelo matemático computacional.		kg.ano-1, com uma diferença inferior é de 40%.
Analisar o tipo de sedimento carreado.	Analisou-se o tipo de sedimento carreado por meio da análise granulométrica do solo.	Pela curva granulométrica do solo, verificou-se que trata-se de um solo areno siltoso, de acordo com a literatura, um dos mais erodíveis que há.
Correlacionar o tipo e volume de sedimento com o entupimento e diminuição da capacidade da rede de drenagem.	Verificou-se que se trata de um solo arenoso. Por meio de estimativa, foi possível verificar o impacto do carreamento de solo nas galerias de águas pluviais.	O volume de solo carreado pode reduzir 30% da seção transversal de até 19 metros de tubulação da drenagem no prazo de um ano. De acordo com a literatura, mais 70% desse tipo de solo pode ficar assoreado nas galerias.

Fonte: autoria própria, 2023.

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho analisou o impacto causado pela erosão e carreamento do solo de vias não pavimentadas na drenagem pluvial de vias pavimentadas. Analisou-se também a possibilidade do uso de ferramentas de previsão à erosão para calcular a quantidade de solo carreado para drenagem pluvial.

Por meio de uma amostragem com instalação de coletor dentro do sistema de drenagem, foi possível verificar que o trecho estudado pode carrear cerca de 1678 kg.ano⁻¹ de solo para galeria pluvial. A média é de 3,99 kg.m⁻².ano⁻¹ de sedimentos carreados para dentro da galeria pluvial da via pavimentada. O resultado encontrado neste trabalho é de 4 a 20 vezes maior que o encontrado em estudos anteriores, como de Wei et al. (2022) e Rietveld et al. (2021). Deste modo, o volume de erosão foi cerca de 150% superior ao limite máximo tolerado para o solo em estudo. Se aproximando de estudo realizados em estradas rurais, como os de O resultado deste estudo se aproxima de estudos realizados em áreas rurais como o de Sosa-Pérez e Macdonald (2017) e Bodoque et al. (2017)

Em análise da granulometria do solo utilizado, verificou-se que se refere a um solo areno siltoso.

De acordo com a literatura, trata-se de um dos solos mais erodíveis que existe. Ao analisar o tamanho dos grãos dos sedimentos, mais de 70% das partículas encontradas no solo do trecho de estudo são de mesma dimensão (0,01mm a 4mm) da maioria dos grãos encontrados nos sedimentos em galerias pluviais de outros estudos.

Estudos anteriores apontam que o tamanho do grão de sedimento carreado para a drenagem pluvial não é considerado nos projetos de drenagem pluvial. O presente estudo reafirmou que o tamanho do grão de sedimento e tipo de solo carreado para drenagem pluvial impacta o sistema, gerando assoreamento acelerado e entupimento das galerias.

Relacionando-se a erosão com a intensidade da pluviosidade, foi possível verificar que para o solo estudado, as chuvas intensas causam maior massa de solo erodido e, que quanto maior o período de seca, maior será a desagregação de solo e aumento do volume de solo erodido.

Aplicando-se a equação de USLE, conhecida como Equação Universal de Perda de Solo, foi possível verificar que esta acaba por superestimar em quase cinco

vezes a massa de solo erodido encontrado em campo. Já o modelo computacional apresentou um resultado próximo ao encontrado em campo, $1144,80 \text{ kg.ano}^{-1}$ ante a 1678 kg.ano^{-1} , mostrando-se mais assertivo se comparado com a equação de USLE, mas ainda assim, precisando ser adaptado para o solo estudado.

A erosão de vias não pavimentadas impacta de forma significativa a drenagem pluvial de vias pavimentadas, pela quantidade excessiva de sedimentos carreados à galeria pluvial, que podem causar assoreamento da galeria pluvial, com risco de alagamentos em áreas urbanas e diminuição da vida útil do sistema de drenagem.

No presente trabalho, foi possível verificar que a erosão de vias não pavimentadas pode impactar de forma intensa as galerias de drenagem pluvial de vias pavimentadas, gerando risco de entupimento e alagamento da região. Para o trecho estudado, a ferramenta FS-WEPP mostrou-se eficiente para atender à necessidade.

A metodologia aplicada neste trabalho pode ser utilizada em outras regiões, para que se possa confirmar as tendências aqui encontradas. Seja para análise do impacto da erosão e carreamento de solo em vias não pavimentadas ou o uso da ferramenta FS-WEPP para previsão da erosão, como suporte para tomada de decisão e elaboração de planos e projetos relacionados a drenagem pluvial.

A análise da erosão e carreamento do solo depende de fatores físicos, ambientais e antrópicos. Portanto, trabalhos futuros poderão efetuar análises do modo em que os sedimentos se comportam dentro das galerias pluviais.

Por fim, é de extrema importância que estudos futuros possam elaborar sistemas sustentáveis de drenagem pluvial, com o objetivo de inibir e conter a erosão do solo de vias não pavimentadas.

REFERÊNCIAS

- ABARCA, Andres; MONTEIRO, Ricardo; O'REILLY, Gerard J. Simplified methodology for indirect loss–based prioritization in roadway bridge network risk assessment. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 74, p. 102948, maio 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420922001674#!>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Ackers, P., 1991, “Sediments Aspects of Drainage and Out Fall Design“, Proc., **Int. Symp. Envir: Hydr.**
- AGRAWAL, Ajay; GALASSO, Alberto; OETTL, Alexander. Roads and Innovation. **The Review of Economics And Statistics**, v. 99, n. 3, p. 417-434, jul. 2017. MIT Press - Journals. Disponível em: <<https://direct.mit.edu/rest/article-abstract/99/3/417/58443/Roads-and-Innovation?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- ALMEIDA, Eliane de Paula Clemente; SANTOS, Humberto Gonçalves; MARONI, Maria José. Latossolos Brunos - **Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-brunos>>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- ALMIRANTE TAMANDARÉ. **História do município**. Disponível em: <<https://tamandare.pr.gov.br/nossa-cidade>>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- ALVES, Alida. et al. Combining Co-Benefits and Stakeholders Perceptions into Green Infrastructure Selection for Flood Risk Reduction. **Environments**, v. 5, n. 2, p. 29, 18 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3298/5/2/29>>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- ANDERSEN, Theis Raaschou. Detailed Geophysical Mapping and Hydrogeological Characterisation of the Subsurface for Optimal Placement of Infiltration-Based Sustainable Urban Drainage Systems. **Geosciences**, v. 10, n. 11, p. 446, 8 nov. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/10/11/446>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- ANTONELI, Valdemir. et al. Evolution and Trend of Research on the Hydrogeomorphological Processes on Roads in the Last Decades: a Review. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, 9 nov. 2022. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/44119/pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- APPELBOOM T. W; et al. Management Practices For Sediment Reduction From Forest Roads In The Coastal Plains. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. 2002. Disponível: <<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=8529>>. Acesso em: 31 mai. 2023.

ARAUJO, Daniela Vega; SANTOS, Joao; MARTINEZ-ARGUELLES, Gilberto. Environmental performance evaluation of warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-14, 31 maio 2022. Informa UK Limited. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2022.2064999>>. Acesso em: 15 out. 2022.

ASHLEY, Richard, et al. Fluid Sediment in Combined Sewers. **Water Science and Technology**, v. 29, n. 1-2, p. 113–123, 1 jan. 1994. Disponível em: <<https://iwaponline.com/wst/article-abstract/29/1-2/113/27004/Fluid-Sediment-in-Combined-Sewers?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995;

ASTM D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2011.

BAI, Ganggang. et al. High-Resolution Simulation and Monitoring of Urban Flood Processes at the Campus Scale. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 8, ago. 2021. Disponível em: <[https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002113](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002113)>. Acesso em: 10 out. 2022.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Diagnóstico ambiental de erosão laminar: Modelo geotecnológico e aplicação. Brasília: Universa, 2003.

BARBOSA, Amanda Fernandes. et al. The Application of the Universal Soil Loss Equation by Using Free and Available Softwares. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 38, n. 1, p. 170, 24 ago. 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/7855>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

BARBOSA, Ronny. Sobreira. et al. Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 1, jan. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/186567>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

BAUM-SNOW, Nathaniel, et al. Does investment in national highways help or hurt hinterland city growth? **Journal of Urban Economics**, v. 115, p. 103124, jan. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094119018300287?via%3Dihub>>. Acesso em: 07 set. 2022.

BERTONI, José; LOMBARDI NETO, Francisco. **Conservação do Solo**. 10. ed. São Paulo/SP: Ícone Editora, 2017.

BERTOLINO, Alessandro. Sistema de Suporte à Tomada de Decisão para Implantação de Medidas Alternativas de Microdrenagem Pluvial em Espaços Livres Urbanos para Mitigação de Alagamentos. Tese (Doutorado em Gestão Urbana).

Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 2020.

BODOQUE, José Maria; et al. Quantifying Soil Erosion from Hiking Trail in a Protected Natural Area in the Spanish Pyrenees. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 7, p. 2255–2267, 13 jul. 2017.

BOOTO, Gaylord; et al. The effect of highway geometry on fuel consumption of heavy-duty vehicles operating in eco-driving mode. **Bearing Capacity of Roads, Railways And Airfields**, v. 1, n. 1, p. 288-395, 21 jun. 2017. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315100333-288/effect-highway-geometry-fuel-consumption-heavy-duty-vehicles-operating-eco-driving-mode-booto-bohne-vignisdottir-pitera-marinelli-brattek%C3%B8-wallbaum-ebrahimi>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Águas de chuva**. 4. Ed. São Paulo/SP. Editora Blucher, 2017, 344p.

BOTTASSO, Anna; et al. Roads to growth: the brazilian way. **Research in Transportation Economics**, v. 90, p. 101086, dez. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0739885921000585?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 out. 2022.

BRAGA, Benedito; Hespanhol, Ivanildo. **Introdução a Engenharia Ambiental - O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2ª Edição. São Paulo-SP. Pearson, 2005. 318p.

BRASIL. Lei Federal nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Diário Oficial da União. Brasília, 2007. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 25 mai. 2023.

BROOKS, Leah; LISCOW, Zachary. Infrastructure Costs: analyzing interstate construction spending. **Research in Transportation Economics**, Washington, Dc., v. 8, n. -, p. 1-77. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101086>. Disponível em: <<https://www.brookings.edu/research/how-high-are-infrastructure-costs>>. Acesso em: 10 out. 2022.

BUTLER, David; MAY, Richard; ACKERS, Jonh. Self-Cleansing Sewer Design Based on Sediment Transport Principles. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 4, p. 276–282, abr. 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/245297185_Self-Cleansing_Sewer_Design_Based_on_Sediment_Transport_Principles>. Acesso em: 02 fev. 2023.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Elsevier: Rio de Janeiro, 789p. 2013.

Camera di Commercio di Genova, Effetti economici indotti dal crollo del viadotto Morandi, Confindustria Genova, Genova, 2018.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo, Brasil: Oficina De Textos, 2014. 384p.

CAO, Longxi; et al. Modeling Interrill Erosion on Unpaved Roads in the Loess Plateau of China. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 8, p. 825–832, 10 out. 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.2253>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

CAO, Longxi; ZHANG, Kelj; LIANG, Yin. Factors affecting rill erosion of unpaved loess roads in China. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 39, n. 13, p. 1812–1821, 29 abr. 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3569>>. Acesso: 10 dez. 2022

CARVALHO, Ana. Carolina. Barbosa; RIBEIRO, Celso de Melo; ROCHA, Wadson. **Erosão potencial laminar hídrica sob três formas de cultivo**: Conceitos, modelos e aplicações. Novas Edições Acadêmicas, 2014.

CHEN, Jing; et al. Greenhouse gas emissions from road construction in China: a province-level analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1039-1047, dez. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617319236#:~:text=The%20per%2Dkilometer%20greenhouse%20gas,e%2Fkm%20in%20Shanghai.>>. Acesso em: 11 out. 2022.

CHEN, Yixian. et al. Quantifying the importance of different erosion processes and soil and water conservation measure collapses following an extreme rainstorm in the Chinese Loess Plateau. **Land Degradation & Development**. v. 34, n. 2, p. 403–422, 9 out. 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.4468>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

CHENG, Liu; EVETT, Jack. **Soils and foundations**. 8 edição. Boston Pearson, 2014.

CHUENCHUM, Pavisorn; XU, Mengzhen; TANG, Wenzhe. Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield in the Lancang–Mekong River Using the Modified Revised Universal Soil Loss Equation and GIS Techniques. **Water**, v. 12, n. 1, p. 135, 31 dez. 2019. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/135>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

CIPOLLA, Sara Simona; MAGLIONICO, Marco; STOJKOV, Irena. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 876–887, out. 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857416304608>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

CNT- Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Técnico Unificado**. Brasília, 2023. 33p. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>. Acesso em: 15 fev. 2023.

CNT - Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Técnico Unificado**. Brasília, 2022. 29p. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>. Acesso em: 12 set. 2022.

CNT - Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Técnico Unificado**. Brasília, 2015. 34p. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>. Acesso em: 12 set. 2022.

BERG, Claudia; et al. **Transport Policies and Development**. The World Bank, 2018.

COMASTRI, José Anibal. **Topografia Aplicada: divisão, demarcação e medição**. Viçosa/MG. Editora: UFV. 2002. 203p.

COSTELLO, Robin; SYMES, Laurel. Effects of anthropogenic noise on male signalling behaviour and female phonotaxis in *Oecanthus tree* crickets. **Animal Behaviour**, v. 95, p. 15-22, set. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003347214002292>>. Acesso em: 12 out. 2022.

CRESCENZI, Riccardo; RODRÍGUEZ-POSE, Andrés. Infrastructure and regional growth in the European Union. **Papers in Regional Science**, v. 91, n. 3, p. 487-513, 19 jun. 2012. Wiley. Disponível: <<https://rsaiconnect.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1435-5957.2012.00439.x>>. Acesso em: 10 out. 2022.

CURITIBA. Pneus velhos podem ser usados no asfalto. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.leg.br/informacao/noticias/pneus-velhos-podem-ser-usados-no-asfalto>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

DAMBROZ, Alice; et al. Terrain analysis, erosion simulations, and sediment fingerprinting: a case study assessing the erosion sensitivity of agricultural catchments in the border of the volcanic plateau of Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 3, p. 1023–1040, 15 jan. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-022-03139-6>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

DANGLE, Chandler L. et al. Characteristics, predicted erosion, and costs for different levels of forestry best management practices at skidder and truck stream crossings in the Mountains, Piedmont, and Coastal Plains of Virginia, USA. **International Journal of Forest Engineering**, v. 30, n. 2, p. 76–86, 10 out. 2018. Disponível: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14942119.2018.1527648>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 111/2009**: Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2009;

DING, Fangfang; et al. Analysis of the palladium response relationship of a receiving water body under multiple scenario changes in rainfall-runoff pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 21, p. 26684-26696, 25 jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-12597-3>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

DOT - Department of Transportation. **Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures**. Washington, 2013. 63p. Disponível em: <<https://dot.sd.gov/media/documents/HwyFunctionalClassification.pdf>>. Acesso em 26 ago. 2022.

ELLIOT, William; et al. Erosion Prediction Project (WEPP) model. **Water and Watersheds Research Program**. 1999. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/rm/boise/AWAE/projects/water_erosion_prediction_project.shtml>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ELLIS, J. Bryan; HARROP, Owen. Variations in solids loadings to roadside gully pots. **Science of The Total Environment**, v. 33, n. 1-4, p. 203–211, fev. 1984.

ERAS, Juan José Cabello; et al. Improving the environmental performance of an earthwork project using cleaner production strategies. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 47, p. 368-376, maio 2013. Elsevier BV. Disponível em: <[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652612006191](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652612006191)>. Acesso em: 15 nov. 2022.

EVERETT, Glyn; et al. Delivering Green Streets: an exploration of changing perceptions and behaviours over time around bioswales in Portland, Oregon. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S973–S985, 17 dez. 2015. Disponível: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfr3.12225>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

EVERETT, Glyn. et al. Sustainable drainage systems: helping people live with water. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Water Management**, v. 169, n. 2, p. 94–104, abr. 2016. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/wama.14.00076>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

FAILACHE, Moises; et al. Suitability Zoning for Sustainable Drainage Systems (SuDSs): Application in a Basin in Southern Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2577, 23 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2577>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

FERGUSON, Peter; et al. Drive Health: road condition detection. **Industry 4.0 Challenges in Smart Cities**, p. 131-143, 24 fev. 2012. Springer International Publishing. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92968-8_9>. Acesso em: 01 set. 2022.

FERRANS, Pascual; et al. Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review. **Science of The Total**

Environment, v. 806, p. 150447, fev. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721055248>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

Ferrari, Claudio; et al. Economic Role of Transport Infrastructure - 1st Edition. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/economic-role-of-transport-infrastructure/ferrari/978-0-12-813096-4>>. Acesso em: 08 out. 2022.

FERREIRA, Adriano Mota; et al. Estimativa da erosão hídrica do solo pelo modelo Water Erosion Prediction Project na Sub-Bacia do Córrego do Gigante, sul de Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 471–483, 2 jul. 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/dJHktgdLyWZGTFGVmckqYWr/>>. Acesso em: 02 fev. 2023.

FOSTER, G. R; et al. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.36, n.6, pp. 355-359, 1981.

FOURNIER, F. "The effect of climatic factors on soil erosion estimates of solids transported in suspension in runoff". **Association Hydrologic Int. Public**, v. 38, 1956.

FOX, Garey. A.; WILSON, G. V. "The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review". **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, pp. 717-733, 2010. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2009.0319>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

FU, Baihua; NEWHAM, Lachlan T. H.; FIELD, John. B. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 79, n. 9, p. 2679–2688, maio 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378475408003182>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

GAO, Zan. et al. A novel multi-objective optimization framework for urban green-gray infrastructure implementation under impacts of climate change. **Science of The Total Environment**, v. 825, p. 153954, jun. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722010464>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

GARCÍA, Ana Isabel Abellán; SANTAMARTA, Juan C. Scientific Evidence behind the Ecosystem Services Provided by Sustainable Urban Drainage Systems. *Land* 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-445X/11/7/1040>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

Garcia-Escribano, Mercedes, Carlos Goes, and Izabela Karpowicz. "Filling the gap: infrastructure investment in Brazil." **IMF Working Papers**, July 29, 2015. Disponível em: <<https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2016/12/31/Filling-the-Gap-Infrastructure-Investment-in-Brazil-43139>>. Acesso em 22 out. 2022.

GAZZARD, Mark; BOOTH, Colin A. Perceptions of Teletubbyland: Public Opinions of SuDS Devices Installed at Eco-designed Motorway Service Areas. **Sustainable**

Ecological Engineering Design, p. 105–116, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-44381-8_8>. Acesso: 15 set. 2022.

Ghani, A. A., 1993. **Sediment transport in sewers**. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Newcastle Upon Tyne.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 173 p.

GOLDMAN, Todd; GORHAM, Roger. Sustainable urban transport: Four innovative directions. **Technology in Society**, v. 28, n. 1-2, p. 261–273, jan. 2006.

GROTTKER, M. Pollutant removal by gully pots in different catchment areas. **Science of The Total Environment**, v. 93, p. 515–522, abr. 1990.

GUAN, Jinchao. et al. Multi-objective optimization for sustainable road network maintenance under traffic equilibrium: Incorporating costs and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 334, fev. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621042694>>. Acesso em: 10 set. 2022.

GUERRA, Antonio José Teixeira. SILVA, Antonio Soares. BOTELHO, Rosangela Garrido Machado. **Erosão e Conservação dos Solos**. São Paulo: Bertrand Brasil, 10ª edição, 340p.

GUIMARÃES, Leandro José Ribeiro. **Levantamento Das Áreas Potenciais Ao Assoreamento Da Barragem Piraquara I**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná- UFPR, Curitiba, 2008.

GUSMÃO, Antonio Carlos Sá de; RIBEIRO, Paulo Cezar Martins. Guidelines for the efficiency of urban goods distribution: the brazilian case. **Case Studies on Transport Policy**, v. 8, n. 4, p. 1478-1488, dez. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213624X2030119X>>. Acesso em: 18 set. 2022.

HAHAD, Omar; et al. Ambient Air Pollution Increases the Risk of Cerebrovascular and Neuropsychiatric Disorders through Induction of Inflammation and Oxidative Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 12, p. 4306, 17 jun. 2020. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32560306/>>. Acesso em: 05 set. 2022.

HAHAD, Omar; et al. Auswirkungen von Umweltrisikofaktoren wie Lärm und Luftverschmutzung auf die psychische Gesundheit: was wissen wir?. **Dmw - Deutsche Medizinische Wochenschrift**, v. 145, n. 23, p. 1701-1707, 5 ago. 2020. Georg Thieme Verlag KG. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1055/a-1201-2155>> Acesso em: 01 set. 2022.

HAMMAD, A. W. A.; AKBARNEZHAD, A.; REY, D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to minimise noise

pollution and transport costs. *Automation in Construction*, v. 61, p. 73–85, jan. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580515002150>>. Acesso em: 08 out. 2022.

HOU, Jingming; et al. Effects of the temporal resolution of storm data on numerical simulations of urban flood inundation. **Journal of Hydrology**, v. 589, p. 125100, out. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420305606>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

HUANG, Shi-Zheng; SADIQ, Muhammad; CHIEN, Fengsheng. The impact of natural resource rent, financial development, and urbanization on carbon emission. **Environmental Science and Pollution Research**, 15 out. 2021. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34652619/>>. Acesso em: 01 set. 2022.

IBISCH, Pierre; et al. A global map of roadless areas and their conservation status. **Science**, v. 354, n. 6318, p. 1423-1427, 16 dez. 2016. American Association for the Advancement of Science (AAAS). Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaf7166>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

IVASKOVA, Martina; KOTES, Peter; BRODNAN, Miroslav. Air Pollution as an Important Factor in Construction Materials Deterioration in Slovak Republic. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 131–138, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815010826>>. Acesso em: 15 out. 2022.

JAAFARI, Abolfazl; et al. Modeling erosion and sediment delivery from unpaved roads in the north mountainous forest of Iran. **GEM - International Journal on Geomathematics**, v. 6, n. 2, p. 343–356, 8 ago. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269104708_Modeling_erosion_and_sediment_delivery_from_unpaved_roads_in_the_north_mountainous_forest_of_Iran>. Acesso em: 15 jan. 2023.

JIN, D. et al. Comparison of Rubber Asphalt with Polymer Asphalt under Long-Term Aging Conditions in Michigan. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 10987, 2 set. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10987>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

JUŠKO, Vladimír; SEDMÁK, Róbert; KÚDELA, Patrick. Siltation of Small Water Reservoir under Climate Change: A Case Study from Forested Mountain Landscape of Western Carpathians, Slovakia. **Water**, v. 14, n. 17, p. 2606, 24 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/17/2606>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

KARLSSON, Kristin; VIKLANDER, Maria. Trace Metal Composition in Water and Sediment from Catch Basins. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 10, p. 870–878, out. 2008. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282008%29134%3A10%28870%29>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

KETABDAR, Milad; STROM, Kyle; QIAN, Qin. A Literature Review on the Sediment Transport Process in Shallow-Grade Culverts and Storm Sewers. **ASEE Gulf-Southwest Annual Conference**. Disponível em: <<https://mpr.aub.uni-muenchen.de/87860/>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

KINNELL, Peter Ian Alexander. Indices accounting for rainstorm erosivity – Theory and practice. *CATENA*, v. 223, p. 106925, 1 abr. 2023.

KLEIN, J. et al. Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Methods-for-calculating-the-emissions-of-transport-Klein-Veld/ebf2960ea7ce66b7974c656ee04d3d0060a6f187>>. Acesso em: 9 dez. 2022.

KOU, Changjiang; QI, Yanjuan; KANG, Aihong; HU, Haotian; WU, Xing. Spatiotemporal distribution characteristics of runoff-pollutants from three types of urban pavements. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, abr. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125885>>. Acesso em: 10 out. 2022.

KÜHNER, Tobias; PINTO, Carlos Vinicius; AMORIM, Claudia Naves David. International urban agendas and sustainable integrated urban development in developing countries. *Cidades. Comunidades e Territórios*, n. Sp21, 15 abr. 2021. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/cidades/3475?lang=en>>. Acesso em 12 ago. 2022.

KUNKEL, K. E. et al. Precipitation Extremes: Trends and Relationships with Average Precipitation and Precipitable Water in the Contiguous United States. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 1, p. 125–142, jan. 2020. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/59/1/jamc-d-19-0185.1.xml>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia Científica**. 7 ed. 2 reimpr. São Paulo: Atlas, 2010.

LAMOND, Jessica Elizabeth. Whole Life Costing and Multiple Benefits of Sustainable Drainage. **Sustainable Surface Water Management**, p. 233–244, 30 set. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308942841_Whole_Life_Costing_and_Multiple_Benefits_of_Sustainable_Drainage>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LAURANCE, William; ARREA, Irene Burgués. Roads to riches or ruin? **Science**, v. 358, n. 6362, p. 442-444, 27 out. 2017. American Association for the Advancement of Science (AAAS). Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao0312>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

LI, Fayun; et al. Accumulation of De-icing Salts and Its Short-Term Effect on Metal Mobility in Urban Roadside Soils. **Bulletin of Environmental Contamination And Toxicology**, v. 94, n. 4, p. 525-531, 4 fev. 2015. Springer Science and Business

Media LLC. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25649309/>>. Acesso em: 18 out. 2022.

LI, Qi; QIAN, Rui; GAO, Junfeng; HUANG, Jiacong. Environmental impacts and risks of bridges and tunnels across lakes: an overview. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115684, out. 2022. Elsevier BV. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35868193/>>. Acesso em: 18 out. 2022.

LI, Xuan. et al. Multisurrogate Assisted Evolutionary Algorithm–Based Optimal Operation of Drainage Facilities in Urban Storm Drainage Systems for Flood Mitigation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 27, n. 11, nov. 2022. Disponível em: < <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0002214>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

LI, Zhigang; WU, Mingqin; CHEN, Bin R. Is road infrastructure investment in China excessive? Evidence from productivity of firms. **Regional Science and Urban Economics**, v. 65, p. 116-126, jul. 2017. Elsevier BV. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166046217301631#:~:text=A%20some%20investment%20may%20be,due%20to%20positive%20spatial%20spillover.>>. Acesso em: 15 set. 2022.

LIAO, Tao; KUMAR, Indraneel; DOJUTREK, Michelle; LABI, Samuel. Updating Secondary Climate Attributes for Transportation Infrastructure Management. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 24, n. 1, p. 1-12, mar. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000396>>. Acesso em: 18 set. 2022.

LIMA, Jorge Enoch Furquim; et al. Avaliação do uso de nomograma de Wischmeier para estimativa da erodibilidade de latossolos do cerrado. **VII Encontro Nacional de engenharia de sedimentos da ABRH. Porto Alegre**. Out. 2006.

LONG, Ashley M; et al. Effects of road construction noise on golden-cheeked warblers: an update. **Wildlife Society Bulletin**, v. 41, n. 2, p. 240-248, jun. 2017. Wiley. Disponível em: < <https://wildlife.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wsb.777>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

MACHADO, Carlos. Cardoso; et al. “Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais”. **Revista Árvore**, v.27, n.3, pp.295-300, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rarv/a/bgD3VfXx7fNYcdQj6GbdBDN/?lang=pt>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MAY, Richard, W. P. Preventing Sediment Deposition in Inverted Sewer Siphons. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 4, p. 283–290, abr. 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/245297187_Preventing_Sediment_Deposition_in_Inverted_Sewer_Siphons>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MCEWAN, Kisten; et al. Greener streets and behaviours, and green-eyed neighbours: a controlled study evaluating the impact of a sustainable urban drainage scheme in Wales on sustainability. **Sustainable Water Resources Management**, v. 8, n. 5, 22 ago. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-022-00723-z>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

MORETTI, L. et al. Evaluation of the environmental and human health impact of road construction activities. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1004–1013, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617325544>>. Acesso em: 15 set. 2022.

Moscow Forestry Sciences Laboratory, Soil & Water Engineering software. **US Forest Department**. Disponível em: <<https://forest.moscowfsl.wsu.edu/engr/software.html>>. Acesso em: 11 mar. 2023.

NAGHDI, R. et al. Modeling of sediment generation from forest roads employing SEDMODL and its calibration for Hyrcanian forests in northern Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 12, jun. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-017-6758-7>>. Acesso em: 15 out. 2022.

NGEZHAYO, Esdras; GHATAORA, Gurmel; BURROW, Michael. Factors Affecting Erosion in Unpaved Roads. **World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering**, abr. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332237268_Factors_Affecting_Erosion_in_Unpaved_Roads>. Acesso em: 09 fev. 2023.

NICOLAU, Olivia Nascimento Boldrini; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; ZANCHETTA, Igor Tureta. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba/Pr, v. 54, n. 0, p. 205-226, 5 out. 2020. Universidade Federal do Parana. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/62606>>. Acesso em: 15 out. 2022.

O'DONNELL, Emily; LAMOND, J. E.; THORNE, C. R. Recognising barriers to implementation of Blue-Green Infrastructure: a Newcastle case study. **Urban Water Journal**, v. 14, n. 9, p. 964–971, 7 fev. 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2017.1279190>>. Acesso: 12 out. 2022.

OLADUNJOYE, Oluwayemi; PROVERBS, David; COLLINS, Beck. The Barriers and Opportunities to the retrofit of Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) towards improving flood risk mitigation in urban areas in the UK. **Conference: International Sustainable Ecological Engineering Design for Society (SEEDS)**. Leeds Beckett University, Leeds, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319718484_The_Barriers_and_Opportuniti>

es_to_the_retrofit_of_Sustainable_Urban_Drainage_Systems_SuDS_towards_improving_flood_risk_mitigation_in_urban_areas_in_the_UK>. Acesso: 09 dez. 2022.

OLADUNJOYE, Oluwayemi; PROVERBS, David; XIAO, Hong. Retrofitting Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS): A Cost-Benefit Analysis Appraisal. **Water**, v. 14, n. 16, p. 2521, 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/16/2521>>. Acesso em: 10 out. 2022.

OLECHNOWICZ, Borys; WEINEROWSKA-BORDS, Katarzyna. Impact of Urbanization on Stormwater Runoff from a Small Urban Catchment: Gdańsk Małomiejska Basin Case Study. **Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics**, v. 61, n. 3-, p. 141–162, 1 dez. 2014. Disponível em: <<https://sciencedirect.com/article/10.1515/heem-2015-0009>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

ONAYEV, Anuarbek; ESPEY, Claire; SWEI, Omar. What Explains the Rising Price of Highway Infrastructure? **Journal of Management In Engineering**, v. 38, n. 4, p. 1-11, jul. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0001058>>. Acesso em: 29 set. 2022.

OSSA-MORENO, Juan; SMITH, Karl; MIJIC, Ana. Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 411–419, jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670716304541>>. Acesso em: 09 nov. 2022.

OTA, J. J.; NALLURI, C. Urban Storm Sewer Design: Approach in Consideration of Sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 4, p. 291–297, abr. 2003. OUYANG, Nan; ZHOU Zichu; FANG, Yong. Method to Comprehensively Evaluate Road Network Traffic Conditions during Freeway Reconstruction and Extension. 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)... **Anais**... Liverpool, UK, 2019, pp. 118-127.

PAIK, S. G. et al. Effects of sediment disturbance caused by bridge construction on macrobenthic communities in Asan Bay, Korea. **Journal of Environmental Biology**, v. 29, n. 4, p. 559–566, 1 jul. 2008.

PANAGOS, Panos. et al. A Soil Erosion Indicator for Supporting Agricultural, Environmental and Climate Policies in the European Union. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1365, 26 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/9/1365>>. Acesso em: 14 fev. 2023.

PARANHOS FILHO, Antonio Conceição. Análise geo-ambiental multitemporal: o estudo de caso da região de Coxim e da Bacia do Taquarizinho. 2000. 213p. Teses (Doutorado em Geologia). Curso de Pós-Graduação em Geologia, com área de Concentração em Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

PARK, Jin-Young; KIM, Byung-Soo. Life-cycle Assessment-based Environmental Impact Estimation Model for Earthwork-type Road Projects in the Design Phase.

KSCE **Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 2, p. 481–490, 2 jan. 2019. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-018-0708-0>>. Acesso em: 10 out. 2022.

PARSAKHOO, Aidin; et al. Prediction of the soil erosion in a forest and sediment yield from road network through GIS and SEDMODL. **International Journal of Sediment Research**, v. 29, n. 1, p. 118–125, mar. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001627914600275>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

PESSOA, Gabriella Emilly; STEINKE, Valdir Adilson. Evolution of Land Use in Two Drainage Basins in an Urban Area of Brasília-DF/Brazil. **Journal of Service Science and Management**, v. 13, n. 6, p. 769–784, 19 nov. 2020. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=104221>> Acesso em: 01 out. 2022.

PESTI, Geza. et al. Regional Impact of Roadway Construction on Traffic Operations. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2272, n. 1, p. 56–66, jan. 2012. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2272-07>>. Acesso em: 15 set. 2022.

PFEIER, M. et al. Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. **Nature**, v. 551, n. 7679, p. 187–191, nov. 2017. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature24457>>. Acesso em 18 set. 2022.

PILGER, Jackson Dullius; et al. Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120731, maio 2020. Elsevier BV. Disponível: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620307782>>. Acesso: 15 out. 2022.

PISTOCCHI, Alberto. A preliminary pan-European assessment of pollution loads from urban runoff. **Environmental Research**, v. 182, mar. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120300219?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 set. 2022.

POLLEY, Wayne.; COLLINS, Harold; FAY, Phillip. Community leaf dry matter content predicts plant production in simple and diverse grassland. **Ecosphere**, v. 13, n. 5, maio 2022. Disponível em: <<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ecs2.4076>>. Acesso em: 18 set. 2022.

PRADO, Hélio. 2013. **Pedologia Fácil: aplicações**. 4 ed. Piracicaba, 284 p.

PROSSER, Ryan; et al. Assessing the toxicity and risk of salt-impacted winter road runoff to the early life stages of freshwater mussels in the Canadian province of Ontario. **Environmental Pollution**, v. 230, p. 589-597, nov. 2017. Elsevier BV. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117314318?via%3Dihub>>. Acesso em: 24 dez. 2022.

PISCOYA, Victor Casimiro; et al. WEPP Model for Rill Erosion Estimation in a Brazilian Semiarid Watershed. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 3, p. 835–843, set. 2020. Disponível: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252020000300835&lng=en>. Acesso em: 02 jun. 2023.

QIAN, Qin; et al. Modeling Sediment Load in Storm Drain System of Southeast Texas Coastal Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 148, n. 4, abr. 2022. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001672>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

RAMÍSIO, Paulo; AREZES, Diogo; PINTO, Lígia M. Costa. A co-financing model for the mitigation of highway runoff pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 289, jul. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721004941?via%3Dihub>. Acesso em: 18 de dez. 2022.

RAMOS SCHARRÓN, Carlos. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropical dry setting. Southwestern Puerto Rico. **CATENA**, v. 82, n. 3, p. 146–158, set. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816210000858>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

RAZZAGHMANESH, Mostafa; BORST, Michael. Long-term effects of three types of permeable pavements on nutrient infiltrate concentrations. **Science of The Total Environment**, v. 670, p. 893–901, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719312719?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 dez. 2022.

REDDING, Stephen J; TURNER, Matthew A. Transportation Costs and the Spatial Organization of Economic Activity. **Handbook of Regional and Urban Economics**, p. 1339-1398, 2015. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978044459531700020X>>. Acesso em: 14 set. 2022.

RIBEIRO, Helena; VARGAS, Heliana Comin. Urbanização, globalização e saúde. **Revista USP**, n. 107, p. 13-26, 17 dez. 2015. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/115110>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

Ricardo, Hélio de Souza. Catalani, Guilherme. **Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavação de Rocha**. São Paulo: Pini, 2013, 3ª edição, p.668.

RIETVELD, Matthijs; CLEMENS, Francois; LANGEVELD, Jeroen. Monitoring and statistical modelling of the solids accumulation rate in gully pots. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 6, p. 549–559, 2 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2020.1800760>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

RIETVELD, M.; CLEMENS, F.; LANGEVELD, J. Monitoring and characterising the solids loading dynamics to drainage systems via gully pots. **Urban Water Journal**, p. 699-710, 19 maio 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2021.1925706>>. Acesso em: 17 mar. 2023.

ROSA, Altair; et al. Uso do geoprocessamento como ferramenta para análise de impactos ambientais decorrentes da urbanização – Pinhais/Paraná. XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental. **Anais...** Natal: ABES, 2014.

RUESCH, Martin. et al. Sustainable Goods Supply and Transport in Conurbations: Freight Strategies and Guidelines. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 116–133, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812005629>>. Acesso em: 27 set. 2022.

SANTOS, Eduardo; et al. The Main Impacts of Infrastructure Works on Public Roads. **Infrastructures**, v. 6, n. 9, p. 118, 24 ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/9/118>. Acesso em: 20 set. 2022.

SANTOS, João; FERREIRA, Adelino; FLINTSCH, Gerardo. A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 4, p. 315-336, 13 ago. 2014. Informa UK Limited. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/264782415_A_life_cycle_assessment_model_for_pavement_management_Road_pavement_construction_and_management_in_Portugal>. Acesso em: 21 set. 2022.

SELVA, N. et al. Roadless and Low-Traffic Areas as Conservation Targets in Europe. **Environmental Management**, v. 48, n. 5, p. 865–877, 24 set. 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-011-9751-z>>. Acesso em: 12 set. 2022.

SELVA, N. et al. Why Keep Areas Road-Free? The Importance of Roadless Areas. **Road Ecology**, p. 16–26, 24 abr. 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118568170.ch3>>. Acesso em: 12 set. 2022.

SELVAKUMAR, Ariamalar; O'CONNOR, Thomas. Seasonal variation in indicator organisms infiltrating from permeable pavement parking lots at the Edison Environmental Center, New Jersey. **Water Environment Research**, v. 94, n. 9, set. 2022. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9620484/>>. Acesso em: 25 set. 2022.

SEUTLOALI, Khoboso Elizabeth; REINHARD BECKEDAHL, Heinrich. A Review Of Road-Related Soil Erosion: An Assessment Of Causes, Evaluation Techniques And Available Control Measures. **Earth Sciences Research Journal**, v. 19, n. 1, p. 73–80, 30 jun. 2015. Disponível em:

<<https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/43841/52801>>. Acesso em: 19 dez. 2022.

SEYEDASHRAF, Omid; BOTTACIN-BUSOLIN, Andrea; HAROU, Julien. A Disaggregation-Emulation Approach for Optimization of Large Urban Drainage Systems. *Water Resources Research*, v. 57, n. 8, ago. 2021. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR029098>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

SHIER, Debra.; LEA, Amanda; OWEN, M.A.. Beyond masking: endangered stephen's kangaroo rats respond to traffic noise with footdrumming. **Biological Conservation**, v. 150, n. 1, p. 53-58, jun. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/236625944_Beyond_masking_Endangered_Stephen's_kangaroo_rats_respond_to_traffic_noise_with_footdrumming>. Acesso em: 10 set. 2022.

SHRESTHA, Ashish; GARCIA, Margaret. Influence of Precipitation Uncertainty and Land Use Change on the Optimal Catchment Scale Configuration of Green Stormwater Infrastructure. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 9, n. 2, maio 2023 Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSWBAY.SWENG-471>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SILVA, Maria Sonia Lopes. Estudos da Erosão. **Embrapa**. 1995. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/133340/estudos-da-erosao>>. Acesso em: 02 jun. 2023.

SOARES, Danielle Lima; et al. Erodibilidade De Solos Em Taludes De Corte De Estrada Não Pavimentada. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179–193, 10 abr. 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/27701>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

SOSA-PÉREZ, Gabriel; MACDONALD, Lee. Reductions in road sediment production and road-stream connectivity from two decommissioning treatments. **Forest Ecology and Management**, v. 398, p. 116–129, ago. 2017.

Spielger, J.D., 2018. Road Construction Life Cycle Evaluation: Duplication of Federal Highway BR-116/RS-Brazil. UNISC.

SWAIN, Daniel; et al. Increased Flood Exposure Due to Climate Change and Population Growth in the United States. **Earth's Future**, v. 8, n. 11, nov. 2020. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020EF001778>>. Acesso em: 18 out. 2022.

SZETO, W. Y. et al. A Sustainable Road Network Design Problem with Land Use Transportation Interaction over Time. **Networks and Spatial Economics**, v. 15, n. 3, p. 791–822, 20 jun. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11067-013-9191-9>>. Acesso em 30 set. 2022.

TORRES, Angélica Valencia; TIWARI, Chetan; ATKINSON, Samuel. Progress in ecosystem services research: A guide for scholars and practitioners. **Ecosystem Services**, v. 49, jun. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212041621000255>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

TUCCI, Carlos Eduardo. **Hidrologia ciência e aplicação**. 4 Ed. Porto Alegre Editora: UFRGS ABRH, 2012.

Tucci, Carlos . Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 13, p. 29-42, 2016. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCV3/publicacao.php?PUB=2&ID=191&SUMARIO=5202>>. Acesso em: 12 out. 2022.

TUCCI, Calos; COLLISCHONN, Walter. **Drenagem urbana e Controle de Erosão**. VI simpósio nacional de controle da erosão 1998. Presidente Prudente, São Paulo.

U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Highway Functional Classification: Concepts, Criteria and Procedures**. Disponível em: <<https://dot.sd.gov/media/documents/HwyFunctionalClassification.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2022.

VALADARES, Alan Pessoa; COELHO, Ricardo Marques; OLIVEIRA, Stanley Robson de. Preprocessing procedures and supervised classification applied to a database of systematic soil survey. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 5, p. 439–447, 20 maio 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sa/a/TyjgvyTnwc7qJFFSZhjHS8n/?lang=en>>. Acesso em: 01 mar. 2023.

VELEZ, Guillermo David Hincapie. Disparidades económicas y el rol del sistema vial. Evidencia para Antioquia, **Colombia. Cuadernos de Economía**, v. 40, n. 83, p. 483-513, 6 ago. 2021. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/journal/2821/282174140006/>>. Acesso em: 01 set. 2022.

VIGNISDOTTIRA, Hrefna Run; et al. A review of environmental impacts of winter road maintenance. **Cold Regions Science And Technology**, v. 158, p. 143-153, fev. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X18303938>>. Acesso em: 18 set. 2022.

WANG, Chunmei. et al. Unpaved road erosion after heavy storms in mountain areas of northern China. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 1, p. 29–37, 1 mar. 2022. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633921000460>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

WANG, Zhenbei. et al. How do urban rainfall-runoff pollution control technologies develop in China? A systematic review based on bibliometric analysis and literature summary. **Science of The Total Environment**, v. 789, out. 2021. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34062464/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

Washington Road Surface Erosion Model WA - **DNR**. Disponível em: <<https://www.dnr.wa.gov/washington-road-surface-erosion-model>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

Watershed Erosion Prediction Project (WEPP). Climate Change Resource Center. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/ccrc/tool/watershed-erosion-prediction-project-wepp#:~:text=The%20purpose%20of%20the%20Water>>. Acesso em: 11 mar. 2023.

WEI, Haoyu. et al. An evaluation of temporal changes in physicochemical properties of gully pot sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 43, p. 65452–65465, 29 abr. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-20341-8>>. Acesso em: 15 fev. 2023.

WINSTON, R. J. et al. Water quality performance of a permeable pavement and stormwater harvesting treatment train stormwater control measure. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 91–111, 1 jan. 2020. Disponível em: <<https://iwaponline.com/bgs/article/2/1/91/71724/Water-quality-performance-of-a-permeable-pavement>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide planning**. Washington: USDA, 1978. (Handbook, 537).

XU, Hongshi; et al. Staged optimization of urban drainage systems considering climate change and hydrological model uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 587, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420304194>>. Acesso em: 15 dez. 2022.

XU, Qian; et al. Response of rill erosion to rainfall types and maintenance on the Loess Plateau: Implications for road erosion control. **CATENA**, v. 219, dez. 2022. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4053366>. Acesso em: 13 fev. 2023.

YANG, Bo; et al. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: a case study of the Jiuyuangou watershed on the Loess Plateau, China. **Journal of Mountain Science**, v. 16, n. 6, p. 1396–1407, jun. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-018-5211-z>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

YANG, Jun; et al. Structural and functional variations of phytoplankton communities in the face of multiple disturbances. **Journal Of Environmental Sciences**, v. 100, p. 287-297, fev. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33279042/>>. Acesso em: 19 set. 2022.

YANG, Yigang; et al. Urbanization reduces resource use efficiency of phytoplankton community by altering the environment and decreasing biodiversity. **Journal Of Environmental Sciences**, p. 140-151, fev. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34955197/>>. Acesso em: 28 set. 2022.

YIN, Hailong; et al. Characteristics of the overflow pollution of storm drains with inappropriate sewage entry. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 5, p. 4902–4915, 17 dez. 2016. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27988901/>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ZHANG, Hongming; YANG, Qinke; RUI, Li. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 177–188, mar. 2013. Disponível em: <<https://research.wur.nl/en/publications/extension-of-a-gis-procedure-for-calculating-the-rusle-equation-l>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

ZHANG, L. et al. Effects of Urbanization on Rural Drinking Water Quality in Beijing, China. **Sustainability**, v. 9, n. 4, p. 461, 24 mar. 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/4/461>>. Acesso em: 08 set. 2022.

ZHAO, Qinghe; et al. Factors contributing to rill erosion of forest roads in a mountainous watershed. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116829, jan. 2023. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36417833/>>. Acesso em: 27 jan. 2023.

ZIEGLER, Alan. Improved method for modelling sediment transport on unpaved roads using KINEROS2 and dynamic erodibility. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 15, p. 3079–3089, 2002. Disponível em: <https://www.academia.edu/4548446/Improved_method_for_modelling_sediment_transport_on_unpaved_roads_using_KINEROS2_and_dynamic_erodibility>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ZOU, Zhengbo; ERGAN, Samiha. Leveraging Data Driven Approaches to Quantify the Impact of Construction Projects on Urban Quality of Life. **Computers and Society**. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1901.09084>>. Acesso em: 8 set. 2022.