

## **Camada porosa de atrito como estratégia de drenagem urbana sustentável: Viabilidade técnico-econômica para Governador Valadares – Minas Gerais - Brasil**

**Porous friction layer as a sustainable urban drainage strategy: Technical and economic feasibility  
for Governador Valadares – Minas Gerais - Brazil**

**Capa de fricción porosa como estrategia de drenaje urbano sostenible: Viabilidad técnica y  
económica para Governador Valadares – Minas Gerais - Brasil**

Recebido: 26/02/2026 | Aceito: 08/04/2026 | Publicado: 09/04/2026

**Lúcia Martins Teixeira**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6610-1365>  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil  
E-mail: [leiladuran2010@gmail.com](mailto:leiladuran2010@gmail.com)

**Eduardo Osório Senra**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4209-9825>  
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil  
E-mail: [senra@ufu.br](mailto:senra@ufu.br)

**Luiz Fernando Rocha Penna**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0456-9299>  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil  
E-mail: [luiz.penna@ifmg.edu.br](mailto:luiz.penna@ifmg.edu.br)

### **Resumo**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar, com base em revisão bibliográfica especializada, a viabilidade técnico-econômica da Camada Porosa de Atrito (CPA) como solução sustentável de drenagem urbana para o município de Governador Valadares, MG, considerando seus potenciais benefícios hidrológicos, ambientais, normativos e operacionais. A pesquisa integra estudos científicos recentes como SIG e abordagem pedológica que discutem o desempenho da CPA em termos de redução de picos de vazão, melhoria da qualidade da água pluvial, escoamento e drenagem, além da contribuição para a mitigação das ilhas de calor em áreas urbanas. A literatura consultada aponta que, embora a CPA envolva custos iniciais mais elevados em comparação aos pavimentos convencionais, seus benefícios a médio e longo prazo incluem a filtragem de poluentes, o aumento da permeabilidade do solo urbano e o fortalecimento da infraestrutura verde. Estudos também destacam o papel estratégico da CPA na promoção da resiliência hídrica e na sustentabilidade ambiental de cidades de médio porte. Conclui-se que a CPA constitui uma alternativa promissora para políticas públicas voltadas à drenagem urbana sustentável e à adaptação às mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Drenagem urbana; Pavimento permeável; Infraestrutura verde; Resiliência hídrica.

### **Abstract**

The overall objective of this research is to evaluate, based on a specialized literature review, the technical and economic feasibility of the Porous Friction Layer (PFL) as a sustainable urban drainage solution for the municipality of Governador Valadares, MG, considering its potential hydrological, environmental, regulatory, and operational benefits. The research integrates recent scientific studies, such as GIS and pedological approaches, that discuss the performance of PCFs in terms of reducing peak flows, improving stormwater quality, runoff, and drainage, as well as their contribution to mitigating heat islands in urban areas. The literature reviewed indicates that, although PCFs involve higher initial costs compared to conventional pavements, their medium- and long-term benefits include pollutant filtration, increased urban soil permeability, and strengthening green infrastructure. Studies also highlight the strategic role of PCFs in promoting water resilience and environmental sustainability in medium-sized cities. The conclusion is that PCFs constitute a promising alternative for public policies aimed at sustainable urban drainage and adaptation to climate change.

**Keywords:** Urban drainage; Permeable pavement; Green infrastructure; Water resilience.

### **Resumen**

El objetivo general de esta investigación es evaluar, a partir de una revisión bibliográfica especializada, la viabilidad técnica y económica de la Capa de Fricción Porosa (PFL) como solución de drenaje urbano sostenible para el municipio de Governador Valadares, MG, considerando sus potenciales beneficios hidrológicos, ambientales,

regulatorios y operativos. La investigación integra estudios científicos recientes, como SIG y enfoques pedológicos, que discuten el desempeño de las PFL en términos de reducción de caudales máximos, mejora de la calidad de las aguas pluviales, escorrentía y drenaje, así como contribución a la mitigación de las islas de calor urbanas. La literatura consultada indica que, si bien las PFL implican mayores costos iniciales en comparación con los pavimentos convencionales, sus beneficios a mediano y largo plazo incluyen la filtración de contaminantes, el aumento de la permeabilidad del suelo urbano y el fortalecimiento de la infraestructura verde. Los estudios también destacan el papel estratégico de las PFL en la promoción de la resiliencia hídrica y la sostenibilidad ambiental en ciudades de tamaño medio. Concluye que las PFL constituyen una alternativa prometedora para las políticas públicas orientadas al drenaje urbano sostenible y la adaptación al cambio climático.

**Palabras clave:** Drenaje urbano; Pavimento permeable; Infraestructura verde; Resiliencia hídrica.

## 1. Introdução

O processo de ocupação urbana aliado com o uso intensivo do solo causa diversas consequências para o meio ambiente natural. A destruição de matas para a construção de loteamentos, a impermeabilização do solo para a construção civil e a ocupação de áreas de riscos são alguns dos fatores que contribuem para a degradação ambiental (Carrizo & Baccaro, 2000) e tem resultado em efeitos hidrológicos críticos para cidades de médio porte, como é o caso de Governador Valadares, MG. Essa substituição de áreas vegetadas por superfícies pavimentadas reduz significativamente a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e reduzindo a taxa de infiltração das bacias hidrográficas. As consequências socioeconômicas e ambientais, oriundas da falta de planejamento governamental ou ineficiência do Plano Diretor Urbano, são observadas em grande parte dos municípios brasileiros. O desenvolvimento urbano está relacionado, portanto, ao aumento da ocorrência de enchentes, na produção de sedimentos e redução da qualidade da água (Tucci, 1997; 1999). Com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, essas áreas foram sendo cada vez mais ocupadas e impermeabilizadas, e as inundações passaram a representar desastres, atingindo a população e gerando impactos e prejuízos humanos (mortos e afetados) e financeiros especialmente nas regiões metropolitanas (Tucci, 1995, 2002, 2003; Tavares & Silva, 2008). Além disso, o escoamento superficial não tratado contribui para a degradação da qualidade dos recursos hídricos ao carrear sedimentos, nutrientes e poluentes para os corpos d'água, comprometendo o equilíbrio ecológico e os usos múltiplos da água (Tucci, 2009). Organismos internacionais, como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), vêm reiteradamente destacando a urgência de estratégias de drenagem urbana sustentáveis, que sejam capazes de mimetizar o balanço hidrológico do ambiente natural. Entre essas estratégias, destaca-se o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development -LID), que privilegia soluções descentralizadas baseadas em processos naturais, como infiltração do solo, áreas verdes, evapotranspiração e armazenamento local de água de chuva (EPA, 2009). Nesse cenário, os pavimentos permeáveis têm emergido como soluções tecnológicas promissoras, integrando infraestrutura viária e função ecológica. Esses pavimentos permitem a infiltração da água pluvial em taxas frequentemente superiores à dos solos vegetados, contribuindo para a redução significativa dos volumes de enxurrada, podendo chegar a até 80 % de mitigação do escoamento gerado em chuvas intensas (Bernucci et al., 2010).

Os pavimentos permeáveis, ao permitirem a infiltração do escoamento superficial, podem ser um canal de poluição dos lençóis subterrâneos, ao dirigirem contaminantes para o subsolo. Por outro lado, eles propiciam a retenção de poluentes, promovendo uma purificação física, química e biológica da água. A purificação física ocorre quando os espaços internos absorvem as partículas presentes na água, removendo a maior parte do material particulado em suspensão. A purificação química está vinculada ao tipo de revestimento (que pode ser de blocos intertravados, asfalto poroso ou concreto permeável) e também ao tipo de solo. No caso do concreto, o fato de o pH do concreto ser de natureza alcalina, em contato com a água contaminada faz com que haja liberação de íons de hidróxido e íons de carbonato que reagem com os contaminantes, precipitando-os, ocorrendo também aumento no pH ligeiramente ácido da água de chuva. A purificação biológica está ligada à porosidade do concreto, que permite a ocorrência de atividade microbiana, promovendo a degradação dos materiais em

suspensão (Chandrappa & Biligiri, 2016b). Tais atributos os tornam especialmente aderentes às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 6 (água limpa e saneamento) e 11 (cidades e comunidades sustentáveis), reforçando sua importância no contexto da urbanização resiliente (EPA, 2009; Federal Highway Administration – FHWA, 2023).

Entre as tecnologias construtivas de pavimentos permeáveis, destaca-se a Camada Porosa de Atrito (CPA), também conhecida como "Porous Friction Course". A especificação DNIT-ES 386/99 trata-se de uma camada asfáltica com estrutura de vazios interconectados que pode alcançar porosidades entre 18 e 25 %, proporcionando uma percolação quase imediata da lâmina d'água mesmo sob condições de elevada pluviosidade. Essa característica garante a manutenção dos coeficientes de atrito entre pneu e pavimento, reduzindo drasticamente o risco de aquaplanagem e contribuindo para a segurança viária (Oliveira, 2003; Zoorob et al., 2020). Estudos também indicam que a CPA apresenta eficiência considerável na remoção inicial de contaminantes como hidrocarbonetos e metais pesados, sobretudo durante os primeiros minutos de precipitação (Afonso et al., 2020). Acioli (2005), cita um experimento de Legret e Colandini (1999), no qual observaram que grande parte dos poluentes, principalmente metálicos, retém-se na parte superior da camada porosa do pavimento. Eles também concluíram que o pavimento poroso é particularmente eficiente na retenção de chumbo, enquanto que o cobre, o cádmio, e o zinco também foram filtrados, porém na camada subjacente ao reservatório. Com relação a poluentes derivados de petróleo, Pratt et al. (1999, apud Acioli, 2005), analisaram em laboratório a retenção dos poluentes através da bio-degradação microbológica in-situ e a passagem pelo pavimento resultou em uma redução de 97,6% do petróleo, com relação a quantidade inicial injetada no pavimento.

O concreto asfáltico poroso é o resultado de uma mistura asfáltica sem fração de areia (só com agregados graúdos), que apresenta graduação aberta, com vazios, o que favorece a rápida percolação da água. Além da permeabilidade, possui outras vantagens como a redução do ruído (Bernucci et al., 2008).

A hipótese norteadora desse trabalho é que mesmo com custos iniciais superiores aos pavimentos convencionais, os benefícios acumulados da CPA, incluindo a mitigação de riscos hidrológicos, o prolongamento da vida útil da infraestrutura e os co-benefícios ambientais e sociais, consolidam essa alternativa como uma resposta robusta aos desafios da gestão hídrica urbana no contexto das mudanças climáticas e da intensificação dos eventos extremos no século XXI.

## 1.1 Justificativa

Assim, investigar a viabilidade técnico-econômica da CPA sob a ótica da revisão bibliográfica, complementada pela cartografia temática produzida neste trabalho, não apenas preenche lacuna de conhecimento local, mas também oferece subsídios replicáveis a outros municípios brasileiros de características semelhantes.

Ao sistematizar evidências dispersas na literatura, traduzindo-as em critérios espaciais objetivos e dialogando com a realidade normativa brasileira, o estudo estabelece ponte necessária entre conhecimento acadêmico e tomada de decisão municipal, contribuindo para que Governador Valadares avance de um modelo reativo de gestão de cheias para uma abordagem preventiva e sustentável, embasada em soluções baseadas na natureza e respaldada por métricas de custo-benefício robustas.

Esse panorama reforça a necessidade de intervenções que vão além da lógica corretiva e passem a adotar soluções preventivas, descentralizadas e baseadas na natureza, como a CPA, para equacionar os desafios crescentes impostos pelas mudanças climáticas e pela urbanização intensiva sobre a bacia do Rio Doce.

Assim, o cruzamento entre a modelagem geoespacial realizada neste estudo, a base pedológica do IBGE e os dados empíricos fornecidos por estudos de caso como o de Chaves, Assis e Furbino (2023) revela um cenário em que o município apresenta tanto demanda urgente quanto condições geotécnicas favoráveis à adoção de soluções como a CPA. Os mapas

derivados de índices hipsométricos, direção de fluxo e áreas de alagamento catalogadas pela CBH, permitiram a delimitação de quatro zonas-prioridade para intervenção, nas quais a CPA pode ser integrada à malha urbana como infraestrutura verde multifuncional. A inserção dessa tecnologia em vias locais e coletoras com tráfego moderado pode, portanto, representar não apenas uma resposta hidrotécnica, mas uma diretriz de planejamento territorial alinhada à resiliência climática e ao desenvolvimento sustentável.

Portanto, ao integrar os custos diretos de implantação e manutenção com a economia gerada pela dispensa de dispositivos de drenagem convencionais e os valores associados aos serviços ecossistêmicos, como controle térmico e filtragem de poluentes, a CPA desponta como uma alternativa não apenas ambientalmente adequada, mas também financeiramente racional para municípios sujeitos a alagamentos recorrentes, como é o caso de Governador Valadares. Tais resultados corroboram a importância de incorporar metodologias de LCA (Análise do Ciclo de Vida) e LCCA (Análise do Custo do Ciclo de Vida), no planejamento de infraestrutura urbana sustentável.

Segundo o site G1, em janeiro de 2025 o Rio Doce ultrapassou a cota de inundação em Governador Valadares e começou a invadir bairros ribeirinhos depois que o nível do rio alcançou 2,13 metros às 18 horas daquela segunda-feira 13/01. A cota de inundação divulgada pela prefeitura da cidade foi de 2,10 metros. O nível do rio, que estava em 1,94 metros às 7 horas da manhã, subiu cerca de 19cm em 12 horas, chegando a 2,13 metros e moradores dos bairros São Tarcísio, São Pedro, Santa Terezinha e da região da Baixa do Quiabo, no bairro Santa Rita, já começaram a sentir os impactos do transbordamento. No mesmo dia a Defesa Civil de Minas Gerais mandou um alerta de possibilidade de inundação para a população da cidade. Ainda para o Boletim da Coordenadoria Estadual da Defesa Civil do Estado (2020), a lama residual causou problemas respiratórios devido à inalação da poeira, resultando acúmulo de sujeiras nas vias urbanas, exigindo gastos com a reconstrução e limpeza das áreas afetadas e em alguns casos desvalorização de imóveis nas regiões ribeirinhas como Ilha dos Araújo, São Tarcísio, São Paulo, São Pedro, Esplanada e Santa Rita. Sob o ponto de vista econômico, acredita-se que, ao longo do tempo, as iniciativas LID e análogas podem custar menos que os métodos tradicionais de gerenciamento de águas pluviais devido à redução significativa do pico de escoamento e volume de águas, o que diminui a infraestrutura necessária à jusante. Um estudo detalhado, que compara o custo real de uso de técnicas LID com o custo estimado de drenagem com tecnologias convencionais para 17 projetos de desenvolvimento nos EUA, mostrou que LIDs podem gerar economias de custo significativas, variando de 15 a 80% (USEPA, 2015).

Além disso, estudos demonstraram que o uso de pavimentos de concreto poroso pode resultar em benefícios adicionais para o bem-estar ambiental. Comparado ao asfalto tradicional, o concreto poroso tende a ter uma temperatura superficial mais baixa quando exposto à radiação solar direta. Isso pode contribuir para reduzir o efeito de ilha de calor urbano, melhorando o conforto térmico nas áreas urbanas e reduzindo a demanda por energia para resfriamento (Schwetz et al., 2015; Avelino et al., 2021).

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnico-ambiental e econômico-financeira da utilização da CPA como solução estruturante de drenagem urbana no município de Governador Valadares. Para tanto, será realizada uma abordagem metodológica integrada, envolvendo revisão bibliográfica e cartográfica, modelagens hidrológicas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), análise de estudos de caso georreferenciados e de análise multicritério para identificação de áreas prioritárias. Todo o processo será norteado por diretrizes técnicas estabelecidas pelas normas ABNT NBR 10844 e NBR 16416, bem como pelos princípios do LID, a fim de subsidiar decisões de planejamento urbano sustentáveis e adaptadas às condições locais (Pinto, 2011; EPA, 2009).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar, com base em revisão bibliográfica especializada, a viabilidade técnico-econômica da Camada Porosa de Atrito (CPA) como solução sustentável de drenagem urbana para o município de Governador Valadares, MG, considerando seus potenciais benefícios hidrológicos, ambientais, normativos e operacionais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais atributos tecnológicos e funcionais da Camada Porosa de Atrito (CPA) conforme descritos na literatura técnico-científica recente;
- Analisar os efeitos hidrológicos da CPA na redução do escoamento superficial e no controle de enchentes em contextos urbanos de médio porte;
- Avaliar a contribuição da CPA para a melhoria da qualidade da água pluvial e a mitigação das ilhas de calor urbanas;
- Examinar as evidências disponíveis na literatura sobre a viabilidade econômico-financeira e os resultados de análises de ciclo de vida (LCA e LCCA) aplicadas à CPA;
- Sintetizar as principais diretrizes normativas nacionais e internacionais aplicáveis à CPA e propor recomendações para sua incorporação nas políticas públicas de infraestrutura verde em Governador Valadares, MG.

Finalmente, esta pesquisa se justifica pelo seu alinhamento à formação técnica do curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos da UFV, pois demonstra a aplicação integrada de sensoriamento remoto, modelagem de terreno e bases pedológicas na seleção de áreas prioridade para CPA, um exercício prático de leitura territorial que transcende a mera revisão bibliográfica.

## 2. Materiais e Métodos

Realizou-se uma pesquisa mista parte experimental em campo, parte com estudo laboratorial de imagens de satélite e, num estudo de abordagem qualitativa e quantitativa (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026).

### 2.1 Caracterização da área de estudo

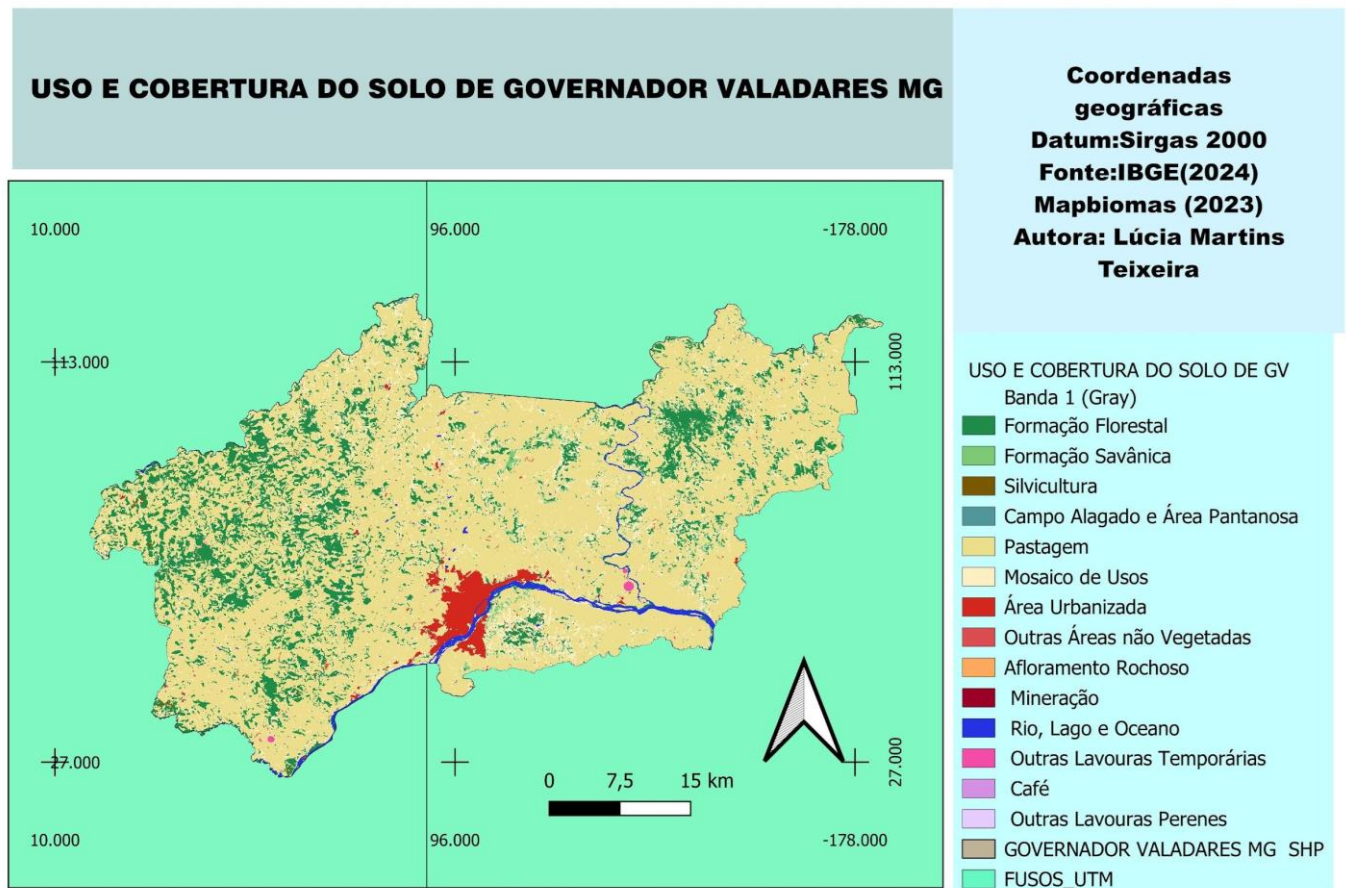
Governador Valadares está situada no Leste do Estado de Minas Gerais e localizada na mesorregião do Vale do Rio Doce. A Princesa do Vale, como também é conhecida, foi fundada em 1938 e conta atualmente com uma população aproximada de 266.649 habitantes (Fonte:IBGE-2024). O clima tropical úmido, com estação chuvosa entre outubro e abril e temperatura média anual de 23 °C, favorece a concentração de eventos pluviométricos intensos, especialmente nos meses de verão (Guedes, 2012). Sua posição estratégica na confluência de corredores logísticos, que articulam ferrovias, rodovias e eixos de exportação, imprime à cidade uma dinâmica urbana acelerada, caracterizada por crescente processo de impermeabilização e expansão horizontal desordenada. As feições geomorfológicas do município compreendem gradientes altimétricos de 135 m a 950 m, sendo que cerca de 38 % do território encontra-se abaixo de 300 metros de altitude, com declividades médias inferiores a 5 %, condição que favorece a implantação de soluções infiltrantes, como a Camada Porosa de Atrito (CPA), sem necessidade de obras de contenção adicionais.

Para compreender o regime hidrológico local e seus impactos no manejo de águas pluviais, permitindo uma análise comparativa entre as séries NPI e NPII, o Gráfico 1 ilustra a distribuição da precipitação média por estações. Observa-se uma amplitude significativa entre o trimestre mais chuvoso (verão) e o mais seco (inverno), fator determinante para o dimensionamento de infraestruturas urbanas e estudos de viabilidade técnica.



As análises de uso e cobertura do solo, obtidas por meio de classificação supervisionada de imagens Landsat 8, apontam que aproximadamente 18 % da área municipal (equivalente a 424 km<sup>2</sup>) atualmente está impermeabilizada por edificações e vias urbanas ou áreas com pastagem e baixa capacidade de infiltração efetiva. Com uma precipitação média anual de 1.200 mm, essa condição resulta em mais de 500 milhões de metros cúbicos de água pluvial que escoam superficialmente a cada ano, exacerbando o risco de alagamentos e sobrecarregando a infraestrutura de drenagem existente, notadamente nos episódios críticos de chuva com tempo de retorno de 50 anos, em que volumes excedentes podem ultrapassar 21 milhões de metros cúbicos. Quando confrontadas com a base pedológica do Sistema PronaSolos (2021), essas áreas impermeáveis coincidem majoritariamente com Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos e Neossolos Flúvicos eutróficos, solos porosos, de textura franco-arenosa a arenosa, com condutividade hidráulica saturada de 5 a 15 mm h<sup>-1</sup>, aptos a receber sistemas de infiltração distribuída sem risco de recalques ou instabilidade estrutural. O mapa da Figura 2 de uso e cobertura do solo de Governador Valadares (IBGE 2024 e Mapbiomas 2023) revela uma paisagem dominada por vastas pastagens e uma mancha urbana consolidada às margens do Rio Doce. Fragmentos de vegetação natural persistem como áreas vitais para a biodiversidade e recarga hídrica, contrastando com zonas de agricultura específica e afloramentos rochosos. A predominância da intervenção antrópica alerta para desafios na infiltração de água e na drenagem urbana devido à impermeabilização do solo. Com alta precisão técnica e georreferenciamento, o documento serve como base estratégica para diagnósticos ambientais e cálculos de escoamento superficial no município.

**Figura 2 -** Uso e Cobertura do Solo em Governador Valadares, MG.



Fonte: Elaborado pelos Autores, adaptado de Uso e cobertura do solo de Governador Valadares MG, por L. M. Teixeira, (2025). Dados originais do IBGE (2024) e Mapbiomas (2023).

Essa susceptibilidade ao escoamento superficial acelerado e à sobrecarga hídrica já se traduz em impactos concretos. De acordo com Chaves, Assis e Furbino (2023), Governador Valadares foi repetidamente atingida por enchentes entre os anos de 2013 e 2022, com destaque para eventos de 2013, 2014, 2020 e 2022, nos quais os danos físicos, psicológicos, socioeconômicos e estruturais afetaram milhares de residentes. Os principais fatores identificados foram as chuvas intensas nas cabeceiras, o rompimento da barragem de Fundão em 2015, trombas d'água e falhas no sistema de drenagem urbana. Em 2020, por exemplo, aproximadamente 50 mil habitantes foram afetados por inundações em bairros como Carapina e Jardim do Trevo, registrando-se cerca de 15 mil pessoas desalojadas e 470 desabrigadas. O estudo ressalta que esses desastres não apenas resultaram em perdas patrimoniais e degradação da infraestrutura viária, mas também impuseram severos danos psicológicos e sociais à população residente em áreas de risco.

### 3. Resultados e Discussão

A aplicação integrada das técnicas de geoprocessamento desenvolvidas no curso, classificação supervisionada de imagens Landsat 8, modelagem hipsométrica a partir do SRTM-30 m e sobreposição de dados pedológicos do IBGE, gerou um conjunto de mapas para o diagnóstico hidrológico de Governador Valadares. Nos compartimentos altimétricos inferiores a 300 m, que cobrem aproximadamente trinta e oito por cento do território e concentram a malha viária central, predominam declividades médias inferiores a cinco por cento, condição técnica que dispensa obras de estabilização adicionais e, portanto, reduz custos de implantação da Camada Porosa de Atrito (CPA).

Com uma precipitação média anual de 1.200 mm, essa condição resulta em mais de 500 milhões de metros cúbicos de água pluvial que escoam superficialmente sem percolar no solo, ampliando o risco de alagamentos e sobrecarregando as galerias pluviais, sobretudo em episódios de chuva com tempo de retorno de 50 anos. Nessas situações críticas, o volume superficial excedente pode atingir até 21 milhões de metros cúbicos, ultrapassando a capacidade hidráulica dos dispositivos de drenagem existentes.

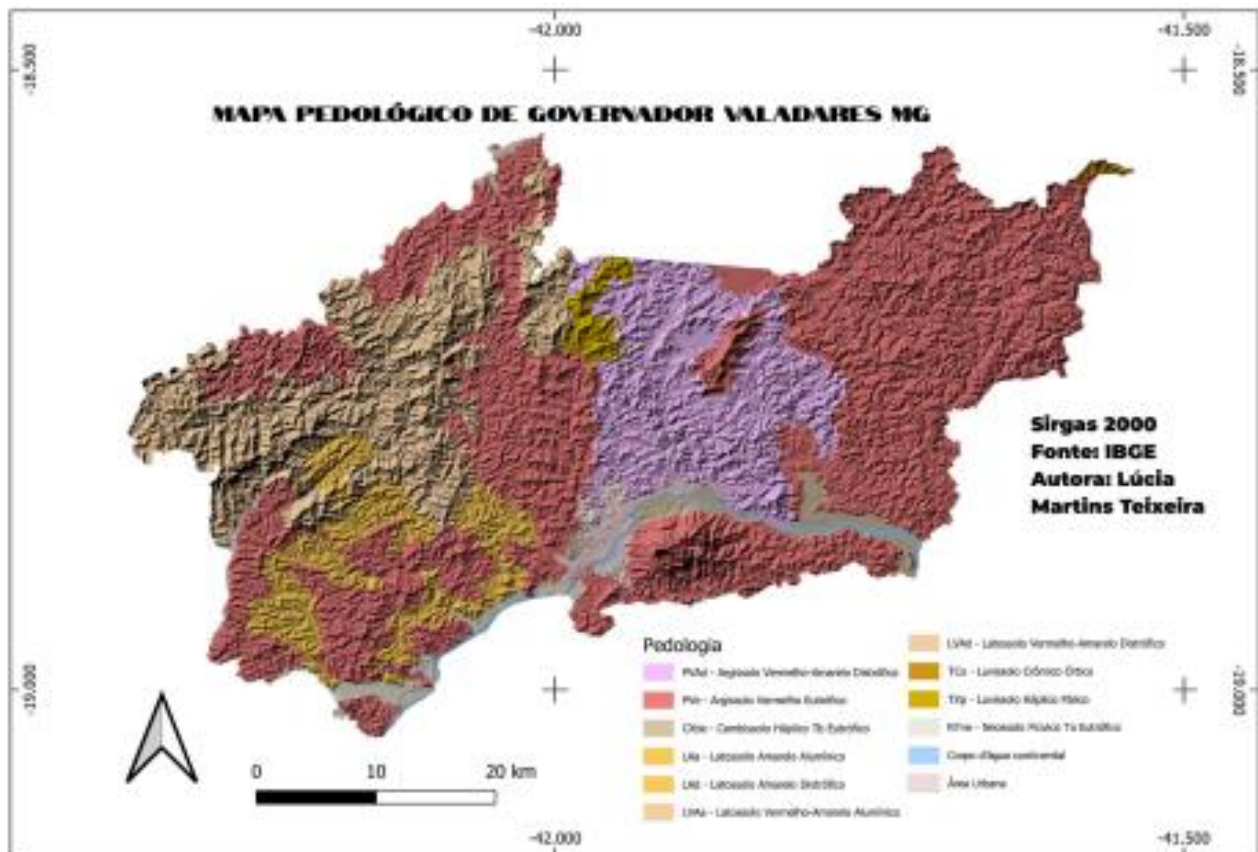
Nesse contexto, a introdução estratégica de Camadas Porosas de Atrito (CPA) em setores específicos do sistema viário urbano, como vias com menor declividade ( $< 5\%$ ), solos com boa condutividade hidráulica (Latossolos e Neossolos Flúvicos) e regiões com histórico de alagamento, configura-se como solução tecnicamente eficaz para redistribuir os volumes escoados e reequilibrar o balanço hídrico da bacia urbana. Simulações hidrodinâmicas baseadas no modelo SWMM (Storm Water Management Model), que é o software chamado Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais, indicam que a substituição de apenas 15 % da malha viária convencional por CPA pode reduzir entre 60 % e 75 % dos picos de vazão superficial (Lee et al., 2023), contribuindo significativamente para a prevenção de cheias rápidas. Ao favorecer a infiltração distribuída ao longo da malha urbana, sobretudo onde a topografia é suave e os solos

são drenáveis, a CPA atua como uma infraestrutura verde multifuncional, ampliando a resiliência hídrica e mitigando os efeitos adversos da urbanização acelerada.

Complementarmente, a quantificação da superfície impermeável foi realizada com base na carta de uso e cobertura do solo produzida a partir da classificação supervisionada Landsat. Estimou-se que aproximadamente 2 % da área municipal (cerca de 47 km<sup>2</sup>) está ocupada por tecido urbano consolidado, onde o solo encontra-se quase totalmente selado. Outras 16 % da superfície (cerca de 377 km<sup>2</sup>) são compostas por pastagens ou solos compactados, com baixa capacidade de infiltração efetiva. Em eventos extremos com tempo de retorno de 50 anos, o volume gerado apenas por essa área impermeável pode chegar a 21 milhões de metros cúbicos, valor que excede a capacidade hidráulica das galerias existentes e impõe risco direto ao Rio Doce, sobretudo na ausência de estruturas de detenção ou infiltração intermediária. O mapa pedológico de Governador Valadares da Figura 3, destaca o domínio de Argissolos, caracterizados pelo acúmulo de argila que dificulta a infiltração profunda e impacta o planejamento da drenagem pluvial. Em contrapartida, os Latossolos predominam em áreas bem drenadas

e profundas, sendo ideais para projetos de infraestrutura sustentável que exijam solos com boa porosidade. Próximo ao Rio Doce, os Neossolos Flúvicos delimitam as planícies de inundação, marcando zonas de deposição de sedimentos recentes e riscos hídricos naturais. O documento detalha ainda a variabilidade mineralógica e química local, consolidando-se como uma ferramenta estratégica para a engenharia ambiental e o ordenamento territorial.

**Figura 3** - Mapa (1 : 250.000 ) Mapa Pedológico de Governador Valadares – MG.



Fonte: Elaborado pelos Autores, adaptado de Mapa Pedológico de Governador Valadares MG, por L. M. Teixeira, (2025). Dados originais do IBGE.

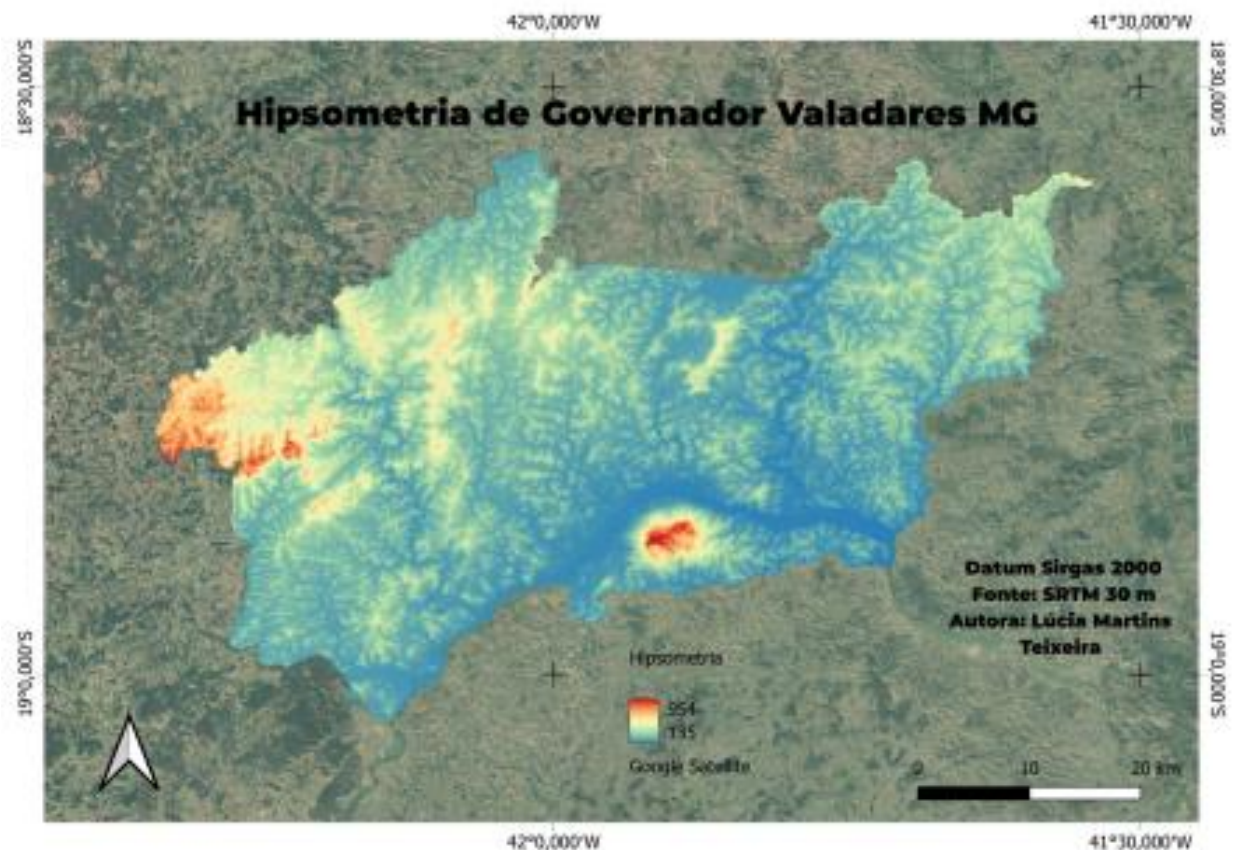
A associação desses dados físicos com o mapa pedológico mostra que as áreas urbanas se assentam majoritariamente sobre Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos e Neossolos Flúvicos eutróficos, solos porosos cuja condutividade hidráulica saturada de cinco a quinze milímetros por hora é suficiente para absorver o fluxo infiltrado pela CPA sem risco de recalques.

O produto final apontou quatro zonas-prioridade onde sobrepuseram-se alta suscetibilidade a cheias e condições geotécnicas favoráveis à instalação da CPA, caracterizadas por solos com elevada condutividade hidráulica (acima de 5 mm h<sup>-1</sup>), textura arenosa a franco-arenosa, baixa presença de camadas compactadas e profundidade do lençol freático superior a 1,5 m, permitindo adequada infiltração e evitando recalques estruturais.

Nas encostas íngremes do quadrante sudoeste, onde afloram Cambissolos de textura argilo-siltosos em declividades superiores a doze por cento, a curta permanência da água no solo limita a eficiência de pavimentos permeáveis; todavia, ao se considerar o escoamento convergente dessas vertentes em direção à planície, fica evidente a necessidade de interceptá-lo com superfícies de CPA instaladas na zona baixa antes que o volume concentrado sobrecarregue o sistema de microdrenagem, corroborando simulações SWMM que apontam reduções de sessenta a setenta e cinco por cento nos picos de vazão quando quinze por cento da área pavimentada é convertida para CPA (Lee et al., 2023).

Os resultados hidrológicos ganham relevância adicional quando confrontados com o comportamento térmico captado por séries temporais Landsat TIRS: áreas impermeáveis atingem temperaturas de superfície até 3,7 °C superiores às dos trechos onde já existem revestimentos permeáveis experimentais, fenômeno atribuído à evaporação endógena da água retida na estrutura porosa (Chen et al., 2024). Assim, a CPA não apenas mitiga enchentes, mas também contribui para a redução das ilhas de calor, gerando co-benefícios alinhados às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6 e 11. A perspectiva econômica reforça o argumento técnico: sobre dois terços da malha viária urbana, justamente os setores sobre Latossolos ou Neossolos Flúvicos de boa drenabilidade, a implantação da CPA pode dispensar drenos profundos, suprimir vinte e dois quilômetros de galerias pluviais projetadas e antecipar o ponto de equilíbrio financeiro para menos de sete anos, em consonância com análises de custo de ciclo de vida que reportam retorno inferior a dez anos em cenários equivalentes (Melo et al., 2024). A Figura 4, mapa hipsométrico de Governador Valadares, ilustra um relevo com altitudes entre 135 e 954 metros, destacando as planícies fluviais do Rio Doce como as zonas mais baixas e urbanizadas. As áreas de transição, compostas por colinas e terrenos ondulados, conectam o vale às regiões mais elevadas, representadas pelas cores verde e amarela. Os picos montanhosos ganham evidência em tons de laranja e vermelho, com destaque para o maciço isolado ao sul que caracteriza o imponente Pico da Ibituruna. Essa variação topográfica é essencial para compreender o escoamento superficial e orientar o planejamento urbano e o manejo de riscos de inundação no município.

**Figura 4 - Hipsometria de Governador Valadares – MG.**

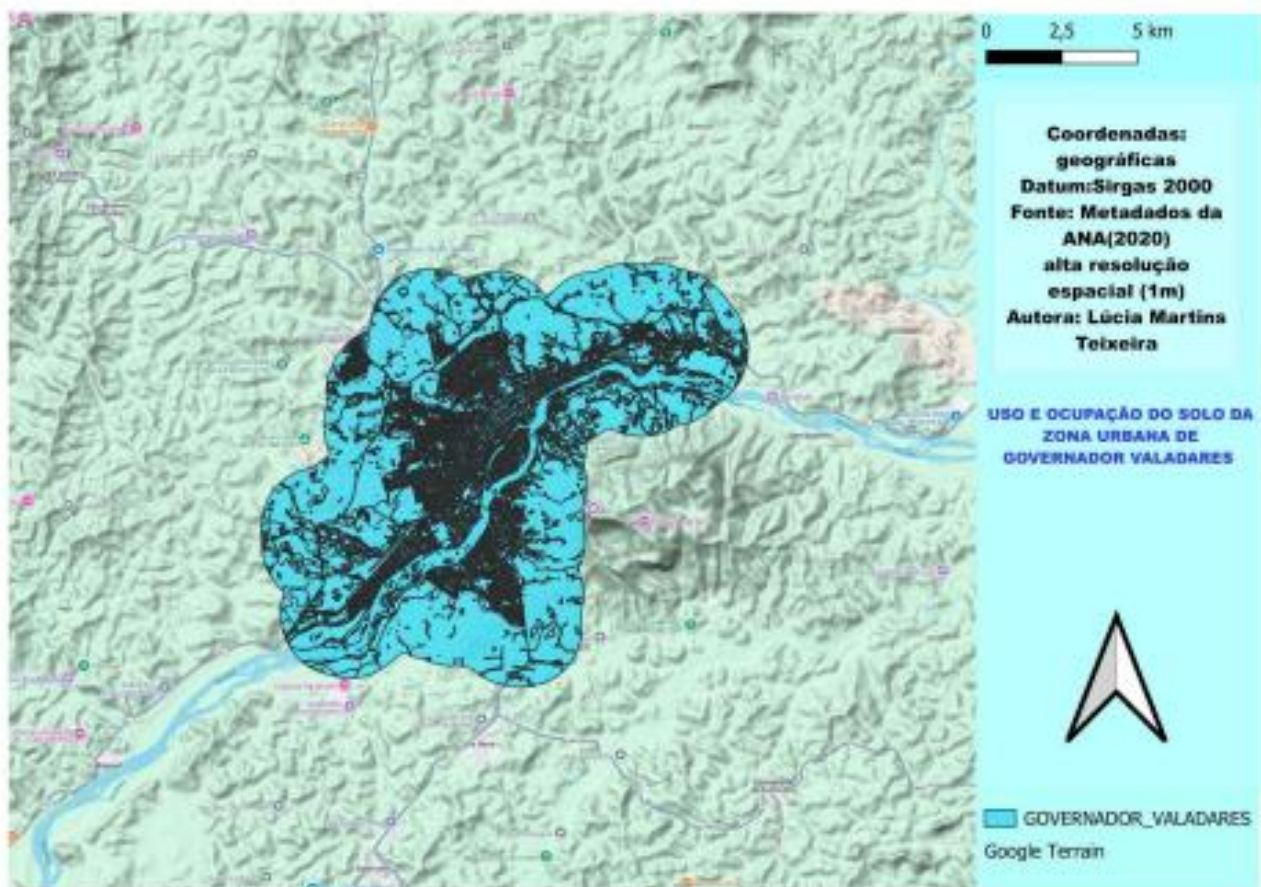


Fonte: Elaborado pelos Autores, adaptado de Hipsometria de Governador Valadares MG, por L. M. Teixeira, (2025). Dados originais do SRTM 30 m.

Em síntese, a leitura cruzada dos mapas evidencia que a CPA se encaixa de modo particularmente eficiente na planície aluvial do Rio Doce, onde o lençol freático raso e os solos fluviais arenosos favorecem a rápida exfiltração; nas vias logísticas de tráfego intenso, onde ensaios demonstram eliminação de lâminas de seis milímetros que hoje provocam

aquaplanagem em chuvas superiores a trinta milímetros por hora (Chen & Wang, 2024); e nos bairros periféricos com elevada porcentagem de solo exposto, onde a infiltração controlada reduz a carga de sedimentos e metais pesados em até setenta por cento, conforme medições de corredores viários em operação há mais de nove anos (Holzer et al., 2024). Desse modo, as evidências cartográficas e modelagens hidrodinâmicas comprovam que a CPA não é apenas teoricamente promissora, mas urgentemente necessária para equilibrar o balanço hídrico urbano de Governador Valadares, preenchendo com respaldo empírico local a lacuna metodológica apontada pela banca e ancorando recomendações de políticas públicas para infraestrutura verde e resiliência hídrica. A Figura 5, apresenta o mapa de uso e ocupação do solo da zona urbana de Governador Valadares (MG). Elaborado pela autora Lúcia Martins Teixeira, o mapa utiliza dados de alta resolução espacial (1m) provenientes da ANA (2020) sob o datum SIRGAS 2000. A representação destaca a densidade da mancha urbana (em preto) sobrepondo-se à área delimitada (em azul claro), permitindo visualizar como o crescimento da cidade se comporta em relação à topografia da região, caracterizada pelo terreno acidentado do Vale do Rio Doce.

**Figura 5** - Uso e ocupação do Solo em Governador Valadares, MG.



Fonte: Elaborado pelos Autores, adaptado de Uso e ocupação do solo da zona urbana de Governador Valadares, por L. M. Teixeira, (2025). Dados originais da ANA (2020).

#### 4. Conclusão

A análise crítica empreendida ao longo deste trabalho permite concluir que a Camada Porosa de Atrito (CPA) se apresenta como alternativa tecnicamente robusta e ambientalmente estratégica para atenuar o panorama recorrente de alagamentos urbanos em Governador Valadares. Ao conjugar elevado índice de vazios interconectados mantidos acima do limiar de 18% mediante seleção granulométrica aberta e teor ótimo de ligante modificado SBS com capacidade de infiltração que supera  $0,20 \text{ cm s}^{-1}$  mesmo sob precipitações de  $50 \text{ mm h}^{-1}$ , a CPA

demonstra potencial para reduzir picos de descarga superficial entre 60 % e 75 % em cenários de substituição de apenas 15 % da malha pavimentada (Chen et al., 2024; Lee et al., 2023).

Contudo, a plena materialização desses benefícios exige a superação de barreiras institucionais, normativas e financeiras. Do ponto de vista regulatório, a convergência entre as exigências da NBR 16416/2015, da especificação DNIT ES-386/1999 e dos padrões internacionais (FAA P-402/2025) assegura diretrizes mínimas de desempenho, mas carece de metas de permeabilidade residual e protocolos de colmatação acelerada que garantam performance hidráulica ao longo do ciclo de vida. Financeiramente, embora o custo inicial da CPA seja 15 % a 30 % superior ao do revestimento denso, análises de custo de ciclo de vida demonstram retorno inferior a dez anos quando se internalizam economias em macrodrenagem e serviços ecossistêmicos. A mobilização de linhas de crédito verdes, BNDES Finame Baixo Carbono, BID Cidades Sustentáveis e a adoção de contratos de desempenho atrelados a indicadores de infiltração reduzem o risco financeiro e ancoram a viabilidade a longo prazo.

Assim, recomenda-se que o município adote um roteiro incremental: (i) atualizar o código de obras para incluir parâmetros de CPA alinhados às melhores práticas internacionais; (ii) priorizar, em fase piloto, trechos de elevada recorrência de alagamentos sobre solos de permeabilidade moderada, combinando CPA a biorretenções lineares; (iii) estruturar contrato de manutenção que inclua varredura de alta pressão e sucção trimestral, preservando pelo menos 100 mm h<sup>-1</sup> de taxa de infiltração; e (iv) monitorar indicadores hidrológicos e ambientais em regime anual, retroalimentando decisões de expansão. Ao integrar requisitos técnicos, salvaguardas operacionais e instrumentos de política pública, Governador Valadares pode consolidar a CPA como dispositivo chave de infraestrutura verde, tornando-se referência regional em resiliência hídrica e sustentabilidade urbana.

## Referências

- Afonso, M. L., Fael, C. S., & Dinis-Almeida, M. (2020). Influence of clogging on the hydrologic performance of a double layer porous asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(6), 742–754. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508843>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1989). *NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais — Procedimento*. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3267>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos*. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=121215>
- Acioli, L. A. (2005). Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. Lume Repositório Digital. <http://hdl.handle.net/10183/5843>
- Avelino, C. M. C., et al. (2021). Avaliação da utilização de Camada Porosa de Atrito (CPA) em vias do meio urbano [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Institucional da UFC.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (2024). *BNDES Finame – Baixo Carbono*. <https://www.bndes.gov.br/wps/vanityurl/finame-baixo-carbono>
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. Ceratti, A.J.P., & Soares, J. B. (2010). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros (4. reimp.)*. Petrobras; ABEDA. <https://www.wbl-nkn.com.br/assets/biblioteca/pavi-asfaltica/cap1.pdf>
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. Ceratti, A.J.P., & Soares, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Petrobras; ABEDA.
- Carrizo, M. C., & Baccaro, A. D. (2000). Análise hidrológica da bacia do Córrego do Lobo. *Caminhos de Geografia*, 1(1), 1-14.
- Chandrupa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016b). Comprehensive investigation of permeability as a performance-indicator for pervious concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2588(1), 143-155. <https://doi.org/10.3141/2588-16>
- Chaves, D. M., Assis, C.B.R., & Furbino, S. A. R. (2023). Impactos das enchentes do Rio Doce em Governador Valadares no período de 2013 a 2022: Pesquisa documental. *Revista Científica FACS*, 23(2), 42-52. <https://periodicos.univale.br/index.php/revcientfacs/article/view/609>
- Chaves, D. M., Assis, C. B.R., & Furbino, S. A. R. (2023). Vista dos impactos das enchentes do Rio Doce em Governador Valadares no período de 2013 a 2022. *Revista Científica FACS*, 23(2), 42–52. <https://periodicos.univale.br/index.php/revcientfacs/article/view/609/501>
- Chen, C.-F., Lin, Y.-T., & Lin, J.-Y. (2024). Field temperature performances of in-use permeable sidewalks and asphalt vehicle roads and the potential impacts on apparent temperature and land surface temperature. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, Artigo 205. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11502-y>

- Chen, X., & Wang, H. (2024). Permeable friction course design with consideration of hydroplaning risk. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 52(5), 726–737. <https://doi.org/10.1139/cjce-2024-0267>
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (1999). *ES-386/1999 – Pavimentação: Pré-misturado a quente com asfalto polímero – Camada Porosa de Atrito – Especificação de serviço*. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/rodovias/servicos/tecnologia/normas-dnit/es-386-1999>
- Defesa Civil de Minas Gerais. (2020). Boletim da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil. Governo do Estado de Minas Gerais.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2023). Pavement design and construction manuals for open-graded friction courses. U.S. Department of Transportation.
- G1. (2025, janeiro). [Título da notícia específica sobre enchentes ou clima]. G1 Vales de Minas Gerais.
- Holzer, K., & Poor, C. (2024). Reduction of runoff pollutants from major arterial roads using porous pavement. *Sustainability*, 16(17), Artigo 7506. <https://doi.org/10.3390/su16177506>. <https://cbhpiracicabamg.org.br/wp-content/uploads/2021/11/mapa-da-bacia-do-rio-doce.png>
- Legret, M., & Colandini, V. (1999). Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: Water quality and fate of heavy metals. *Water Science and Technology*, 39(2), 111-117. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00015-0)
- Melo, et al. (2024). Análise do comportamento mecânico de camadas porosas de atrito envelhecidas. In Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Florianópolis, SC.
- Pratt, C. J., Mantle, J. D. G., & Schofield, P. A. (1999). Mineral oil bio-degradation within a permeable pavement reservoir structure. *Water Science and Technology*, 39(2), 103-109. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00014-9)
- Teixeira, L. M. (2025). *Chuvas no Município de Governador Valadares MG: Uma análise conforme as normais climatológicas do INMET* [Trabalho apresentado]. IX Seminário de Iniciação Científica do IFMG, Governador Valadares, MG, Brasil. <https://www.ifmg.edu.br/sic/>
- Teixeira, L. M. (2025). *Uso e ocupação do solo da zona urbana de Governador Valadares* [Mapa]. Fonte de metadados: ANA.
- Teixeira, L. M. (2025). *Hipsometria de Governador Valadares MG* [Mapa]. Fonte de dados: SRTM 30 m.
- Teixeira, L. M. (2025). *Mapa Pedológico de Governador Valadares MG* [Mapa]. Fonte de dados: IBGE.
- Teixeira, L. M. (2024). *Uso e cobertura do solo de Governador Valadares MG* [Mapa]. Fonte de dados: IBGE e Mapbiomas.
- Tucci, C.E.M. (2012). *Gestão da drenagem urbana* (Textos para Discussão, 48). CEPAL; IPEA. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38004/LCBRSR274\\_pt.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38004/LCBRSR274_pt.pdf)
- Tucci, C.E.M. (1997). *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Editora da UFRGS.
- Tucci, C.E.M. (2003). *Inundações urbanas*. ABRH.
- Tucci, C.E.M. (2005). *Gestão de águas urbanas*. UNESCO.
- Tavares, A. L., & Silva, J. J. (2008). Pavimentos permeáveis em regiões urbanas. *Arquitetura e Engenharia: Ensaios Multidisciplinares*, Capítulo 8. AYA Editora.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2015). *Tools, resources and documents for Low Impact Development (LID)*. Washington, DC.
- United States Environmental Protection Agency. (2009). *Incorporating low impact development into municipal stormwater programs* (EPA 901-F-09-005). <https://www3.epa.gov/region1/npdes/stormwater/assets/pdfs/IncorporatingLID.pdf>
- Zoorob, S. E., Supardi, B. A., Hardiman, M., et al. (2024). Permeable asphalt pavements (PAP): Benefits, clogging factors and methods for evaluation and maintenance, A review. *Materials*, 17(24), Artigo 6063. <https://doi.org/10.3390/ma17246063>