



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO SIMEONE MATHEUS MACIEL SANTOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NA
DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO DE CASO DE
LEVANTAMENTOS FUNCIONAIS NO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2026

FRANCISCO SIMEONE MATHEUS MACIEL SANTOS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NA
DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO DE CASO DE
LEVANTAMENTOS FUNCIONAIS NO ESTADO DO CEARÁ

Projeto de graduação submetido à coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S235a Santos, Francisco Simeone Matheus Maciel.
Análise da influência das oscilações pluviométricas na degradação do pavimento asfáltico : estudo de caso de levantamentos funcionais no estado do Ceará / Francisco Simeone Matheus Maciel Santos. – 2026.
58 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira .
1. Engenharia de transportes. 2. Mudanças climáticas. 3. Levantamento funcional de rodovias. I.
Título.

CDD 620

FRANCISCO SIMEONE MATHEUS MACIEL SANTOS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NA
DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO: ESTUDO DE CASO DE
LEVANTAMENTOS FUNCIONAIS NO ESTADO DO CEARÁ

Projeto de Graduação submetido à coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

Aprovada em: 15/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Camila Lima Maia (Examinadora Interna)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Mariana de Araújo Leite (Examinadora Externa)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por ter iluminado meu caminho durante esta jornada acadêmica.

Aos meus pais, José Ivan e Fabiana, pelo amor incondicional, sacrifícios silenciosos e apoio constante, que sempre foram o alicerce da minha caminhada.

Ao meu irmão, Veiner, pela amizade, parceria e pelas palavras que sempre me lembraram de seguir em frente.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, pela paciência, orientação técnica e confiança depositada neste trabalho.

Agradeço também à Profa. Dra. Verônica Castelo Branco, por suas orientações, exigência acadêmica e contribuições essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À banca examinadora, agradeço a disponibilidade, leitura atenta e pelas contribuições que enriquecem este estudo e ampliam minha formação.

Por fim, deixo registrada minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

“A simplicidade é o último grau da
sofisticação” (Leonardo da Vinci)

RESUMO

As mudanças climáticas vêm se intensificando nas últimas décadas, provocando alterações na frequência e na intensidade dos eventos de precipitação, inclusive no Nordeste brasileiro. Nesse contexto, torna-se relevante analisar de que forma a variabilidade pluviométrica se relaciona com o desempenho funcional dos pavimentos rodoviários, especialmente em regiões de clima peculiar, como o estado do Ceará. Este estudo investiga a relação entre a precipitação média anual e a condição funcional da malha rodoviária cearense no período de 2012 a 2024, a partir da integração de dados levantados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), divulgados anualmente na Pesquisa CNT de Rodovias, e de séries históricas de precipitação. Foram consideradas as classes de avaliação definidas pela CNT (ótimo, bom, regular, ruim e péssimo) aplicadas à condição do pavimento, à sinalização, à geometria e ao estado geral das rodovias. A análise estatística foi realizada por meio do coeficiente de correlação de Pearson, adotando-se nível de significância de 5% em abordagem bicaudal. Os resultados indicam forte correlação negativa entre a precipitação média anual e a parcela de pavimentos classificados como ótimos, tanto para a condição do pavimento ($r = -0,90$) quanto para o estado geral da rodovia ($r = -0,71$), evidenciando a redução das melhores condições em períodos mais chuvosos. Em contrapartida, observaram-se correlações positivas relevantes entre o aumento da precipitação e o crescimento das classificações bom ($r = 0,73$) e ruim ($r = 0,76$) para o pavimento, sugerindo um deslocamento progressivo das condições superiores para níveis intermediários e inferiores. Para a sinalização, as correlações foram predominantemente moderadas, indicando menor sensibilidade direta às variações pluviométricas. A geometria apresentou comportamento distinto, com correlação positiva para a classe regular ($r = 0,69$) e negativa para a classe péssima ($r = -0,67$). De forma integrada, os resultados demonstram que o regime pluviométrico exerce influência sobre a condição funcional das rodovias do Ceará, sobretudo no pavimento e no estado geral, com implicações diretas para o planejamento de manutenção e reabilitação. Por fim, o estudo ressalta a importância de análises complementares que incorporem outros fatores condicionantes, como tráfego, temperatura, drenagem e práticas de manutenção, visando a uma compreensão mais abrangente do desempenho dos pavimentos frente ao cenário atual de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Pesquisa CNT de rodovias; Pavimento; Precipitação.

ABSTRACT

Climate change has been intensifying in recent decades, causing changes in the frequency and intensity of precipitation events, including in northeastern Brazil. In this context, it is important to analyze how rainfall variability relates to the functional performance of road pavements, especially in regions with unique climates, such as the state of Ceará. This study investigates the relationship between average annual precipitation and the functional condition of the road network in Ceará from 2012 to 2024, based on data collected by the National Transportation Confederation (CNT), published annually in the CNT Highway Survey, and historical precipitation series. The evaluation classes defined by the CNT (excellent, good, fair, poor, and very poor) were considered and applied to the condition of the pavement, signage, geometry, and general state of the highways. Statistical analysis was performed using Pearson's correlation coefficient, adopting a 5% significance level in a two-tailed approach. The results indicate a strong negative correlation between average annual precipitation and the proportion of pavements classified as excellent, both for pavement condition ($r = -0.90$) and for the general condition of the highway ($r = -0.71$), evidencing a reduction in the best conditions in rainier periods. In contrast, significant positive correlations were observed between increased precipitation and growth in good ($r = 0.73$) and poor ($r = 0.76$) pavement ratings, suggesting a progressive shift from superior conditions to intermediate and inferior levels. For signage, the correlations were predominantly moderate, indicating less direct sensitivity to rainfall variations. Geometry showed distinct behavior, with a positive correlation for the fair class ($r = 0.69$) and a negative correlation for the poor class ($r = -0.67$). Taken together, the results show that rainfall patterns influence the functional condition of highways in Ceará, especially in terms of pavement and overall condition, with direct implications for maintenance and rehabilitation planning. Finally, the study highlights the importance of complementary analyses that incorporate other conditioning factors, such as traffic, temperature, drainage, and maintenance practices, aiming at a more comprehensive understanding of pavement performance in the current scenario of climate change.

Keywords: Climate change; Pesquisa CNT de rodovias; Pavement; Precipitation.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de dispersão da pluviometria do estado do Ceará - (mm/ano).....	29
Gráfico 2 - Evolução das classificações - pavimento	30
Gráfico 3 - Gráfico de dispersão pavimento versus Precipitação média anual	32
Gráfico 4 - Gráfico de resíduos pavimento versus Precipitação média anual	35
Gráfico 5 - Evolução das classificações - sinalização da via	36
Gráfico 6 - Gráfico de dispersão sinalização versus Precipitação média anual	37
Gráfico 7 - Gráfico de resíduos sinalização versus Precipitação média anual	39
Gráfico 8 - Evolução das classificações - geometria da via	40
Gráfico 9 - Gráfico de dispersão geometria versus Precipitação média anual	41
Gráfico 10 - Gráfico de resíduos geometria versus Precipitação média anual	43
Gráfico 11 - Evolução das classificações - estado geral	44
Gráfico 12 - Gráfico de dispersão estado geral versus Precipitação média anual	45
Gráfico 13 - Gráfico de resíduos sinalização versus Precipitação média anual	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente de Pearson (r).....	26
Tabela 2 - Resumo de correlação condição funcional do pavimento x precipitação.....	33
Tabela 3 - Resumo de correlação condição da sinalização x precipitação	38
Tabela 4 - Resumo de correlação condição da geometria x precipitação	42
Tabela 5 - Resumo de correlação estado geral x precipitação	46
Tabela 6 - Resumo de correlação parâmetros x precipitação	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos.....	10
1.2 Estrutura do trabalho	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Processo de deterioração dos pavimentos asfálticos.....	12
2.2 Levantamentos da condição funcional do pavimento	15
2.3 Regime de chuvas no estado do Ceará.....	17
2.3.1 Caracterização do regime pluviométrico do Ceará.....	17
2.3.2 Variabilidade espacial e eventos extremos de precipitação.....	18
2.3.3 Mudanças recentes e projeções futuras do regime de chuvas	18
2.4 Deterioração do pavimento no estado do Ceará em função do regime de chuvas.....	19
2.5 Mecanismos de deterioração induzidos pela água.....	20
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 Levantamento da condição das rodovias – Pesquisa CNT de Rodovias.....	23
3.1.1 Método de levantamento da Pesquisa CNT de Rodovias.....	23
3.1.2 Fatores avaliados na Pesquisa CNT de Rodovias	24
3.2 Análise pluviométrica	25
3.2.1 Tratamento estatístico de dados pluviométricos	25
3.2.2 Métodos de análise de tendências e séries históricas	25
3.3 Coeficiente de correlação de Pearson	26
3.3.1 Método do coeficiente de Pearson	26
3.3.2 Premissas para o uso do método	27
3.3.3 Validação dos resultados	28
3.3.4 Nível de confiança adotado	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Análise Pluviométrica.....	29
4.2 Análise do impacto da pluviometria na condição funcional do pavimento das rodovias.....	30

4.3 Análise do impacto da pluviometria na sinalização das rodovias	36
4.4 Análise do impacto da pluviometria na geometria das rodovias.....	40
4.5 Análise do impacto da pluviometria estado geral das rodovias.....	44
5 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se intensificado nas últimas décadas, resultando no aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, especialmente aqueles relacionados à precipitação pluviométrica. Relatórios recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) indicam que regiões tropicais e semiáridas tendem a apresentar maior variabilidade das chuvas, com períodos de precipitações mais concentradas e episódios prolongados de estiagem, configurando um cenário de maior pressão sobre sistemas naturais e infraestrutura construída.

Nesse contexto, a infraestrutura rodoviária assume papel estratégico para o desenvolvimento econômico e social, sendo o pavimento asfáltico amplamente empregado na malha rodoviária brasileira em razão do menor custo inicial e da facilidade construtiva. Entretanto, diversos estudos apontam que esse tipo de pavimento é particularmente sensível à ação da água, que pode comprometer sua vida útil ao favorecer processos como perda de adesão entre agregado e ligante, infiltração nas camadas granulares e redução da capacidade resistente do sistema (Huang, 2004).

No estado do Ceará, caracterizado por elevada variabilidade espacial e temporal do regime de chuvas, os efeitos associados à atuação da água sobre o desempenho dos pavimentos tendem a ser intensificados. Estudos climatológicos baseados no Índice Padronizado de Precipitação (SPI) indicam alterações recentes no padrão pluviométrico do Leste do Nordeste brasileiro, evidenciando maior irregularidade na distribuição das precipitações ao longo do ano e a ocorrência mais frequente de eventos extremos, essas mudanças estão associadas tanto à variabilidade climática natural quanto à influência de fenômenos climáticos de grande escala, no contexto das mudanças climáticas globais (Da Silva *et. al.*, 2020). Tal comportamento impõe desafios adicionais à conservação das rodovias, especialmente no que se refere à manutenção preventiva e ao desempenho funcional dos pavimentos.

Levantamentos nacionais sobre a condição da malha rodoviária brasileira são realizados anualmente por meio da Pesquisa CNT de Rodovias, um estudo conduzido pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) que avalia de forma sistemática a infraestrutura rodoviária do país. A pesquisa abrange extensos trechos da malha viária nacional e considera critérios técnicos relacionados ao estado do pavimento, à sinalização e às características geométricas das vias, constituindo-se como uma das principais bases de dados para o diagnóstico e o acompanhamento das condições das rodovias brasileiras. Essa pesquisa,

conduzida pela CNT, avalia e produz uma das principais referências para o diagnóstico da infraestrutura rodoviária nacional. Os resultados recorrentes de desempenho insatisfatório evidenciam a necessidade de compreender de maneira mais aprofundada os fatores que contribuem para a deterioração funcional das rodovias (CNT, 2022). Embora variáveis como volume de tráfego, características de projeto e práticas de manutenção sejam amplamente reconhecidas, a influência do regime pluviométrico na evolução da condição do pavimento ainda carece de análises quantitativas mais consistentes, especialmente quando considerada em escala regional.

Diante desse cenário, torna-se relevante investigar a associação entre a variabilidade pluviométrica e a condição funcional dos pavimentos asfálticos das rodovias cearenses ao longo de séries históricas recentes. A compreensão dessa relação pode contribuir para o aprimoramento das estratégias de gestão e manutenção rodoviária, especialmente em um contexto de mudanças climáticas, no qual a adaptação da infraestrutura se apresenta como um desafio crescente para a engenharia de transportes.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste projeto de graduação é analisar se a variação pluviométrica impacta condição funcional dos pavimentos asfálticos das rodovias no estado do Ceará.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar o comportamento da pluviometria média anual no estado do Ceará;
- b) Organizar a classificação da condição do pavimento, sinalização, geometria e estado geral das rodovias no estado do Ceará com base em dados da Pesquisa CNT de Rodovias;
- c) Relacionar a variação pluviométrica e a evolução da condição do pavimento, sinalização, geometria e estado geral da malha rodoviária asfáltica no estado do Ceará.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. Após a introdução, a revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos e fundamentos teóricos utilizados na pesquisa. Em seguida, o método descreve os procedimentos adotados para a obtenção dos resultados, que são posteriormente analisados e discutidos. Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões do estudo, destacando suas contribuições, limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo tem como objetivo fundamentar teoricamente os principais conceitos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são discutidos os mecanismos de deterioração dos pavimentos asfálticos, com ênfase na influência dos fatores ambientais, especialmente a água. Em seguida, abordam-se os métodos de avaliação da condição funcional dos pavimentos, bem como os fundamentos relacionados às mudanças climáticas e ao regime pluviométrico do estado do Ceará. Por fim, são apresentados estudos que relacionam a variabilidade das chuvas à deterioração dos pavimentos rodoviários, contextualizando o problema analisado nesta pesquisa.

2.1 Processo de deterioração dos pavimentos asfálticos

A deterioração dos pavimentos asfálticos é um processo progressivo, resultante da interação entre solicitações mecânicas impostas pelo tráfego, ações ambientais e características estruturais e funcionais do pavimento. Geralmente esse processo inicia-se com defeitos superficiais de pequena severidade e, na ausência de manutenção adequada, evolui para danos estruturais mais graves, comprometendo a segurança, o conforto e a vida útil da rodovia (Ye Z *et al.*, 2022).

Podendo esse processo de perda de condição ser classificado em funcional, quando afeta principalmente o conforto e a segurança do usuário, e estrutural, quando compromete a capacidade do pavimento de suportar as cargas aplicadas (Bernucci *et al.*, 2022). Ocorre em muitos casos de forma simultânea, uma vez que defeitos na camada superficial do pavimento, como trincas, favorecem a infiltração de água, acelerando a perda de capacidade estrutural.

A degradação dos pavimentos asfálticos resulta da ação conjunta de diversos fatores ao longo de sua vida útil, envolvendo solicitações mecânicas, condições ambientais e aspectos construtivos. Entre os principais agentes estão o tráfego, as variações de temperatura, a presença de água e umidade, bem como a qualidade dos materiais e das técnicas executivas adotadas. A compreensão desses fatores é fundamental para explicar o surgimento e a evolução dos defeitos observados nos pavimentos rodoviários.

O tráfego de veículos, especialmente o tráfego pesado e sobrecarregado, é um dos principais responsáveis pela deterioração dos pavimentos asfálticos. A repetição de cargas gera tensões e deformações nas camadas do pavimento, provocando fadiga do revestimento e das camadas inferiores, reduzindo a capacidade de suporte. Esse mecanismo está diretamente associado ao surgimento de defeitos como: trincas, afundamentos em trilha de roda e deformações permanentes (Papagiannakis; Masad, 2008). O aumento do volume de veículos comerciais e a sobrecarga por eixo reduzem significativamente a vida útil do pavimento, intensificando a taxa de aparecimento de defeitos, mesmo em estruturas dimensionadas adequadamente (Bernucci *et al.*, 2022).

A temperatura influencia diretamente as propriedades físicas e químicas das misturas asfálticas, sobretudo em função do comportamento termo viscoelástico do ligante asfáltico. Em condições de temperaturas elevadas, ocorre a redução da viscosidade e do módulo de rigidez do ligante, o que diminui a resistência ao cisalhamento da mistura e favorece o desenvolvimento de deformações permanentes, como o afundamento em trilha de roda. Esse comportamento está associado à maior mobilidade molecular do ligante, que passa a apresentar resposta mais fluida sob a ação das cargas de tráfego (Qiao *et al.*, 2020).

Por outro lado, em temperaturas mais baixas, o ligante asfáltico sofre aumento de rigidez e redução da capacidade de relaxação de tensões, em decorrência do rearranjo molecular e do endurecimento progressivo do material. Esse fenômeno torna o revestimento mais frágil e suscetível à ocorrência de trincas térmicas, longitudinais e transversais. Ademais, as variações térmicas diárias e sazonais induzem ciclos repetitivos de expansão e contração do pavimento, gerando tensões internas que, ao longo do tempo, contribuem para a abertura de fissuras. Essas discontinuidades estruturais passam a atuar como caminhos preferenciais para a infiltração de água, intensificando os mecanismos de deterioração do pavimento asfáltico (Zhang *et al.*, 2025).

Entre os fatores ambientais, a água é amplamente reconhecida como um dos principais agentes de degradação dos pavimentos asfálticos. A presença de umidade nas camadas do pavimento compromete o desempenho mecânico das misturas asfálticas em diferentes escalas, reduzindo a rigidez e a resistência do material em nível macroscópico e enfraquecendo, em nível microscópico, as interações físico-químicas entre o ligante asfáltico e os agregados. Esse processo favorece a ocorrência de descolamento do ligante (*stripping*), intensifica o transporte de partículas finas e resulta em maiores deformações e deflexões sob carregamento, contribuindo para a deterioração funcional do pavimento (Nazzal *et al.*, 2021).

A infiltração de água ocorre principalmente por meio de trincas, juntas e falhas superficiais, sendo agravada em regiões com elevados índices pluviométricos ou deficiência nos sistemas de drenagem. A saturação das camadas inferiores reduz a capacidade de suporte do pavimento, acelerando o surgimento de defeitos estruturais como trincas em bloco, painelas e falhas generalizadas (Berntsen; Saarenketo, 2005).

A qualidade dos materiais utilizados e a execução adequada das camadas do pavimento são determinantes para o desempenho ao longo do tempo. Erros de dosagem, compactação insuficiente, escolha inadequada do ligante ou agregados de baixa qualidade contribuem para o surgimento precoce de defeitos (Bernucci *et al.*, 2022). Misturas asfálticas mal compactadas, por exemplo, apresentam maior volume de vazios, facilitando a infiltração de água e a oxidação do ligante, o que acelera o envelhecimento do revestimento e o aparecimento de trincas.

Os defeitos mais comumente observados em pavimentos asfálticos incluem:

- a) Trincas por fadiga: associadas à repetição de cargas do tráfego;
- b) Trincas longitudinais e transversais: relacionadas a variações térmicas e retração do revestimento;
- c) Trincas em bloco: indicativas de envelhecimento do ligante;
- d) Afundamento em trilha de roda: causado por deformações permanentes sob altas temperaturas e tráfego pesado;
- e) Painelas (buracos): estágio avançado de deterioração, geralmente associado à presença de água e à perda de material;
- f) Exsudação e desgaste superficial: relacionados à dosagem inadequada do ligante e à ação do tráfego (DNIT, 2006).

Esses defeitos são utilizados como base para métodos de avaliação da condição funcional do pavimento, uma vez que refletem diretamente o nível de deterioração e o desempenho da estrutura ao longo do tempo. A identificação, quantificação e classificação dos defeitos constituem o processo de avaliação da condição funcional do pavimento. A análise sistemática dos defeitos permite diagnosticar as causas predominantes da deterioração e subsidiar a definição de estratégias de manutenção e reabilitação mais eficientes (Papagiannakis; Masad, 2008). Em regiões sujeitas a elevada variabilidade climática, como o estado do Ceará, a ocorrência e evolução desses defeitos tendem a ser influenciadas pela ação do tráfego e das condições ambientais, especialmente a precipitação pluviométrica, reforçando a importância de estudos que integrem esses fatores.

2.2 Levantamentos da condição funcional do pavimento

A avaliação da condição funcional do pavimento constitui uma etapa na gestão de rodovias, pois permite diagnosticar o nível de serventia da via sob a perspectiva do usuário, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão relacionada às intervenções de manutenção, restauração e reabilitação. Diferentemente das avaliações estruturais, que se concentram na capacidade de suporte e no comportamento mecânico das camadas do pavimento, os levantamentos funcionais priorizam a identificação de defeitos superficiais, a análise do conforto ao rolamento e os aspectos relacionados à segurança viária, refletindo de forma direta a percepção do desempenho da rodovia ao longo do tempo (Shahin, 2005). Ao longo das últimas décadas, diversos métodos têm sido desenvolvidos para a avaliação da condição funcional dos pavimentos, apresentando variações quanto ao nível de detalhamento, à forma de coleta de dados e à complexidade operacional.

De maneira geral, esses métodos podem ser classificados em avaliações visuais sistemáticas, baseadas na identificação e quantificação de defeitos superficiais, e em índices combinados, que integram informações sobre degradação superficial e irregularidade longitudinal, como *Pavement Condition Index* (PCI), Índice de Gravidade Global (IGG), Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) e Levantamento Visual Contínuo (LCV). Essas abordagens são empregadas em sistemas de gerenciamento de pavimentos, sobretudo em análises em nível de rede, por permitirem a comparação temporal da condição das vias e o suporte à priorização de intervenções de manutenção e reabilitação (Zhang *et al.*, 2024).

A avaliação visual constitui a base dos métodos clássicos de levantamento funcional e consiste na identificação, classificação e quantificação dos defeitos presentes na superfície do pavimento. Entre os principais defeitos observados estão trincas, afundamentos, painelas, exsudação e desgaste superficial, os quais refletem tanto o efeito do tráfego quanto a ação de fatores ambientais, como a umidade e a temperatura (DNIT, 2006).

O Índice de Gravidade Global (IGG) é um dos métodos mais tradicionais utilizados no Brasil para avaliação da condição funcional de pavimentos rodoviários. Desenvolvido com base na observação visual dos defeitos, o IGG atribui pesos específicos a cada tipo de patologia, considerando sua severidade e extensão, resultando em um índice numérico que representa o estado geral do pavimento (DNIT, 2006).

A principal vantagem do IGG reside em sua simplicidade operacional e na facilidade de aplicação em grandes extensões rodoviárias. No entanto, por se tratar de um

método predominantemente visual, apresenta limitações quanto à subjetividade do avaliador e à sensibilidade para detectar alterações iniciais de deterioração, especialmente aquelas associadas à ação da água nas camadas inferiores do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022).

O *Pavement Condition Index* (PCI) é um método amplamente difundido internacionalmente, especialmente em ambientes urbanos e aeroportuários. O índice varia de 0 a 100 e é calculado a partir da identificação detalhada dos tipos de defeitos, suas severidades e áreas afetadas, seguindo procedimentos padronizados estabelecidos pela ASTM (ASTM D6433, 2020). Por apresentar maior nível de detalhamento, o PCI permite um diagnóstico mais preciso da condição funcional do pavimento, sendo particularmente útil em análises comparativas e no planejamento de intervenções. Contudo, sua aplicação demanda maior tempo e custo operacional, o que pode limitar seu uso em redes extensas (Shahin, 2005).

O Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) é um parâmetro quantitativo que avalia o conforto ao rolamento por meio da medição da irregularidade longitudinal do pavimento. O IRI é obtido a partir de equipamentos específicos, como perfilômetros, e expressa o efeito acumulado de defeitos superficiais e deformações estruturais ao longo da via (Sayers; Gillespie; Queiroz, 1986).

Embora não identifique diretamente os tipos de defeitos existentes, o IRI é amplamente utilizado como indicador funcional por estar fortemente relacionado à percepção do usuário e aos custos operacionais dos veículos. Além disso, estudos apontam que o aumento da umidade e da precipitação contribui para a elevação do IRI ao longo do tempo, em função da aceleração da deterioração superficial.

De modo geral, os métodos clássicos de levantamento da condição funcional do pavimento apresentam vantagens e limitações específicas, sendo comum a utilização combinada de diferentes índices para uma avaliação mais abrangente. A escolha do método deve considerar fatores como extensão da malha viária, recursos disponíveis, frequência de monitoramento e objetivos da análise (HUANG, 2004).

Em contextos de elevada variabilidade climática, como regiões sujeitas a intensos regimes pluviométricos, a aplicação sistemática desses métodos torna-se ainda mais relevante, uma vez que a ação da água tende a acelerar os mecanismos de deterioração funcional, refletindo diretamente nos índices avaliados ao longo do tempo (Bernucci *et al.*, 2022).

2.3 Regime de chuvas no estado do Ceará

As mudanças climáticas constituem um dos maiores desafios ambientais contemporâneos, caracterizando-se pelo aumento da temperatura média global e pela intensificação de eventos climáticos extremos. De acordo com o IPCC (2023), observa-se um aumento na frequência e na intensidade de chuvas intensas em diversas regiões do planeta, além de períodos mais prolongados de seca. Essas alterações afetam diretamente os sistemas naturais e a infraestrutura construída, incluindo rodovias. Qiao *et al.* (2020) apontam que pavimentos rodoviários estão particularmente expostos aos impactos das mudanças climáticas, uma vez que foram projetados com base em condições climáticas históricas que já não representam adequadamente o cenário atual.

O regime pluviométrico do estado do Ceará apresenta características particulares, marcadas por elevada variabilidade espacial e temporal, forte concentração sazonal das chuvas e recorrência de eventos extremos. Essas características exercem influência direta sobre o desempenho da infraestrutura rodoviária, sobretudo no que se refere à durabilidade dos pavimentos asfálticos. Nesta seção, são abordados os principais aspectos do regime de chuvas cearense, incluindo sua caracterização climática, a ocorrência de eventos extremos, as mudanças recentes associadas às alterações climáticas e as implicações desses fatores para a deterioração dos pavimentos rodoviários.

2.3.1 Caracterização do regime pluviométrico do Ceará

O estado do Ceará está inserido majoritariamente na região semiárida do Nordeste brasileiro, apresentando um regime pluviométrico caracterizado por elevada variabilidade espacial e temporal, com concentração das chuvas em poucos meses do ano. De modo geral, a precipitação anual média varia entre 600 mm e 1.200 mm, dependendo da região, sendo mais elevada no litoral e nas áreas serranas e significativamente menor no interior semiárido (FUNCEME, 2023).

No estado do Ceará, o período chuvoso ocorre predominantemente entre os meses de fevereiro e maio, estando associado, principalmente, à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico responsável pela ocorrência de precipitações na região. Nesse intervalo concentram-se os maiores acumulados pluviométricos anuais, enquanto os demais meses são marcados por baixos índices de precipitação e longos

períodos de estiagem. Estudos climatológicos que analisam a variabilidade da chuva no Nordeste, com base em índices como o Índice Padronizado de Precipitação, evidenciam que essa sazonalidade é fortemente influenciada por mecanismos atmosféricos de grande escala e apresenta variações interanuais significativas (Da Silva *et al.*, 2020).

Além da concentração sazonal, o regime de chuvas cearense é marcado por uma irregularidade interanual significativa, com alternância entre anos mais chuvosos e anos de seca severa. Essa variabilidade impõe desafios à gestão de recursos hídricos e à infraestrutura, especialmente no que se refere à durabilidade de obras rodoviárias expostas a ciclos alternados de umidade intensa e períodos prolongados de seca (Marengo *et al.*, 2022).

2.3.2 Variabilidade espacial e eventos extremos de precipitação

A distribuição espacial das chuvas no Ceará é fortemente heterogênea. Regiões como o litoral, a Serra da Ibiapaba e o Maciço de Baturité apresentam totais pluviométricos superiores à média estadual, enquanto o Sertão Central e os Inhamuns registram os menores volumes anuais. Essa diferença espacial resulta em distintos níveis de exposição das rodovias aos efeitos da água, como infiltração, erosão e falhas nos sistemas de drenagem (FUNCEME, 2023).

Nos últimos anos, observa-se também um aumento na frequência de eventos extremos, caracterizados por chuvas intensas concentradas em curtos intervalos de tempo. Esses eventos tendem a gerar maiores volumes de escoamento superficial, sobrecarregando dispositivos de drenagem e favorecendo a infiltração de água nas camadas do pavimento, acelerando processos de deterioração estrutural e funcional (IPCC, 2023; Qiao *et al.*, 2020). Estudos regionais indicam que mesmo em contextos de redução do volume anual total de chuvas, a intensificação das precipitações extremas pode agravar os danos à infraestrutura viária, pois o pavimento não é projetado para suportar elevados picos de precipitação associados a falhas de drenagem (Gurjão *et al.*, 2020).

2.3.3 Mudanças recentes e projeções futuras do regime de chuvas

As mudanças climáticas globais têm provocado alterações no regime pluviométrico do Nordeste brasileiro, incluindo o estado do Ceará. Relatórios recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) apontam uma tendência de

aumento da variabilidade das chuvas na região, caracterizada tanto pela intensificação e maior frequência de eventos extremos de precipitação quanto pela ocorrência de períodos mais prolongados de estiagem. Essa combinação de secas severas e chuvas concentradas em curtos intervalos acentua a irregularidade da distribuição pluviométrica ao longo do ano, ampliando os riscos de impactos sobre sistemas naturais e infraestrutura, especialmente em áreas já historicamente vulneráveis às variações climáticas.

No contexto cearense, estudos climatológicos realizados no Semiárido do Nordeste brasileiro indicam alterações no padrão tradicional da estação chuvosa, caracterizadas por atrasos no início das precipitações, encurtamento do período chuvoso e aumento da intensidade de eventos pluviométricos isolados. Essas mudanças no regime de chuvas intensificam os ciclos de umedecimento e secagem aos quais os pavimentos rodoviários são submetidos, acelerando processos de fadiga dos materiais e favorecendo o surgimento de defeitos funcionais, como trincas, afundamentos e panelas, especialmente em trechos com condições de drenagem inadequadas (Lima, 2020; Silva *et al.*, 2023).

Projeções climáticas para as próximas décadas indicam que as tendências observadas de maior irregularidade pluviométrica e intensificação de eventos extremos tendem a se acentuar, sobretudo em regiões semiáridas e climaticamente vulneráveis, como o estado do Ceará. O aumento da frequência e da intensidade das chuvas concentradas em curtos intervalos, intercaladas por períodos prolongados de estiagem, pode ampliar os impactos negativos sobre a infraestrutura rodoviária. Nesse cenário, torna-se fundamental a adaptação dos critérios tradicionais de projeto, manutenção e gerenciamento das rodovias, incorporando parâmetros climáticos atualizados, estratégias de drenagem mais eficientes e políticas de manutenção preventiva, de modo a aumentar a resiliência da malha viária frente aos efeitos das mudanças climáticas (Marengo *et al.*, 2022).

2.4 Deterioração do pavimento no estado do Ceará em função do regime de chuvas

O estado do Ceará apresenta uma malha rodoviária extensa e estratégica para a integração regional, o escoamento da produção agrícola e o deslocamento populacional. Entretanto, grande parte dessas rodovias está inserida em um contexto climático caracterizado por elevada variabilidade pluviométrica, com períodos prolongados de estiagem intercalados por episódios de chuvas concentradas e intensas, típicos do semiárido nordestino (FUNCEME, 2020; SILVA *et al.*, 2023). Essa alternância entre longos períodos secos e eventos chuvosos

intensos impõe condições severas aos pavimentos asfálticos, uma vez que os materiais constituintes e as camadas estruturais são submetidos a ciclos sucessivos de secagem, umedecimento e saturação, acelerando os mecanismos de deterioração (Huang, 2004).

A precipitação pluviométrica atua de forma direta e indireta na degradação dos pavimentos asfálticos. De forma direta, a água da chuva infiltra-se através de trincas, juntas e discontinuidades do revestimento, atingindo as camadas inferiores do pavimento. De forma indireta, o acúmulo superficial de água pode comprometer a eficiência do sistema de drenagem, favorecendo a permanência da umidade na estrutura (Berntsen; Saarenketo, 2005). No contexto cearense, no qual muitos trechos rodoviários apresentam sistemas de drenagem deficientes ou inexistentes, esse efeito é potencializado, contribuindo para a redução da capacidade estrutural do pavimento e para o surgimento precoce de defeitos funcionais e estruturais (DNIT, 2006).

2.5 Mecanismos de deterioração induzidos pela água

A presença de água no sistema de pavimento é reconhecida como um dos principais fatores de aceleração da deterioração dos pavimentos asfálticos, atuando tanto no revestimento quanto nas camadas estruturais. A infiltração hídrica compromete a adesão entre os materiais, reduz a capacidade de suporte e intensifica defeitos funcionais e estruturais (Bernucci *et al.*, 2022).

Um dos principais mecanismos de deterioração associados à presença de água é a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados minerais, fenômeno conhecido como *stripping*. A água possui maior afinidade com a superfície dos agregados do que o ligante asfáltico, promovendo o deslocamento deste e reduzindo a coesão interna da mistura asfáltica (Bernucci *et al.*, 2022). Esse mecanismo é especialmente crítico em regiões como o Ceará, onde eventos de chuva intensa ocorrem após longos períodos secos, favorecendo infiltrações rápidas e profundas no revestimento, intensificando o processo de desagregação superficial e a formação de painéis.

A infiltração de água também provoca a saturação das camadas de base e sub-base, reduzindo significativamente sua rigidez e capacidade de suporte. Quando saturadas, essas camadas deixam de dissipar adequadamente as tensões provenientes do tráfego, transferindo esforços excessivos ao revestimento asfáltico (Huang, 2004). Como consequência, observam-se aumentos nas deflexões do pavimento, favorecendo o surgimento de trincas por fadiga, afundamentos em trilha de roda e falhas estruturais progressivas.

Outro efeito relevante da ação da água nos pavimentos asfálticos é o transporte de partículas finas provenientes das camadas inferiores, fenômeno conhecido como *pumping*. A infiltração de água, associada à repetição das cargas do tráfego, promove a mobilização desses materiais finos, que são gradualmente expelidos para a superfície ou redistribuídos no interior da estrutura do pavimento. Esse processo resulta na perda progressiva de material de suporte, no aumento do volume de vazios e na redução da capacidade estrutural das camadas, comprometendo a estabilidade e a integridade do pavimento.

Como consequência, observa-se o aumento das deformações e deflexões sob carregamento, bem como a aceleração da deterioração funcional, refletida no surgimento de defeitos como afundamentos, trincamentos e desagregações superficiais (Nazzaal *et al.*, 2021). No Ceará, esse mecanismo é agravado pela ocorrência de chuvas concentradas em curtos intervalos de tempo, que aumentam os gradientes hidráulicos no interior da estrutura do pavimento.

Estudos recentes realizados no estado do Ceará indicam uma relação consistente entre os índices pluviométricos e a condição funcional dos pavimentos (Gurjão *et al.*, 2020) demonstraram que trechos rodoviários submetidos a maiores volumes de precipitação tendem a apresentar piores índices de condição, evidenciando o papel da água como agente acelerador da deterioração. De forma complementar, Silva *et al.* (2023) destacam que a variabilidade climática observada no Ceará, associada às mudanças climáticas globais, tende a intensificar eventos extremos de precipitação, ampliando os riscos à infraestrutura rodoviária existente.

As projeções climáticas indicam que o Nordeste brasileiro, incluindo o Ceará, deverá experimentar alterações significativas no regime de chuvas, com aumento da frequência de eventos extremos, mesmo em um cenário de redução da precipitação média anual (IPCC, 2023). Essas mudanças ampliam a vulnerabilidade dos pavimentos asfálticos, uma vez que estruturas projetadas com base em condições climáticas históricas passam a operar fora de seus limites de desempenho, exigindo novas abordagens de projeto, manutenção e gestão rodoviária (Qiao *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de incorporar variáveis climáticas, especialmente a pluviometria, nos modelos de avaliação da condição dos pavimentos e no planejamento das intervenções de manutenção. Estratégias preventivas, associadas à melhoria dos sistemas de drenagem e ao uso de materiais mais resistentes à ação da água, são fundamentais para mitigar os efeitos da deterioração acelerada (DNIT, 2006). Além disso, a integração entre dados climáticos e levantamentos da condição funcional do pavimento

configura-se como uma ferramenta essencial para uma gestão rodoviária mais eficiente e adaptada às mudanças climáticas em curso.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do estudo, descrevendo as fontes de dados utilizadas, Pesquisa CNT de Rodovias, no período compreendido entre 2012 e 2024, os métodos de levantamento da condição das rodovias e as técnicas de análise aplicadas. A metodologia foi estruturada de forma a permitir a investigação da relação entre o regime pluviométrico e a condição funcional dos pavimentos asfálticos no estado do Ceará.

3.1 Levantamento da condição das rodovias – Pesquisa CNT de Rodovias

A avaliação da condição das rodovias analisadas neste estudo baseou-se nos dados disponibilizados pela Pesquisa CNT de Rodovias, levantamentos anuais divulgados do ano de 2012 ao de 2024, dados do estado do Ceará, amplamente utilizada como referência nacional para o diagnóstico da infraestrutura viária brasileira. Essa base de dados permite a caracterização da condição funcional das rodovias ao longo do período supracitado, por meio de critérios padronizados que contemplam aspectos relacionados ao pavimento, à sinalização e à geometria das vias. A utilização desses dados possibilita a análise temporal da evolução da condição das rodovias e sua correlação com variáveis externas, como o regime pluviométrico.

3.1.1 Método de levantamento da Pesquisa CNT de Rodovias

A Pesquisa CNT de Rodovias consiste em um levantamento sistemático e periódico de parte da infraestrutura rodoviária brasileira, com o objetivo de avaliar a qualidade das vias sob os aspectos funcionais, operacionais e de segurança. O método adotado é predominantemente visual e qualitativo, realizado por equipes técnicas treinadas que percorrem os trechos rodoviários em veículos, registrando as condições observadas *in loco*, ao longo dos anos vem se ampliando a aplicação de *softwares* de tratamento de imagens e identificação de defeitos por meio do uso de Inteligência Artificial (IA) (CNT).

A avaliação é realizada de forma padronizada, permitindo a comparação temporal e espacial dos resultados. O levantamento contempla apenas rodovias pavimentadas, considerando segmentos homogêneos quanto às características geométricas e operacionais. Embora não envolva ensaios destrutivos ou medições estruturais diretas, o método apresenta

aplicação nacional e relevância para análises de desempenho funcional da malha rodoviária.

3.1.2 Fatores avaliados na Pesquisa CNT de Rodovias

A Pesquisa CNT de Rodovias adota um conjunto de fatores padronizados para avaliar a condição funcional e operacional da malha rodoviária brasileira, permitindo análises comparativas ao longo do tempo e entre diferentes regiões. Esses fatores abrangem tanto aspectos físicos da infraestrutura quanto elementos relacionados à segurança e ao conforto dos usuários, sendo fundamentais para a caracterização do desempenho global das rodovias. Neste estudo, são considerados os principais parâmetros avaliados pela CNT, estado geral, condição do pavimento, sinalização da via e geometria, os quais fornecem uma visão integrada e detalhada das condições dos trechos analisados (CNT):

- a) Estado geral: corresponde a uma avaliação integrada das condições da via, considerando simultaneamente o pavimento, a sinalização e a geometria. Essa classificação busca representar a qualidade global do trecho, refletindo o nível de conforto, segurança e fluidez oferecido ao usuário. O estado geral é classificado em categorias como ótimo, bom, regular, ruim e péssimo, servindo como indicador sintético da condição da rodovia;
- b) Condição do pavimento: refere-se à análise visual dos defeitos superficiais presentes no revestimento asfáltico, tais como trincas, panelas, afundamentos, desgaste superficial e remendos. Essa avaliação é essencial para caracterizar o desempenho funcional do pavimento, uma vez que defeitos superficiais estão diretamente associados à perda de conforto e segurança, além de indicarem possíveis comprometimentos estruturais subjacentes;
- c) Sinalização da via: engloba a análise da sinalização horizontal e vertical, considerando visibilidade, conservação, padronização e adequação às normas vigentes. A deficiência na sinalização compromete diretamente a segurança dos usuários, sobretudo em trechos com condições geométricas desfavoráveis ou sob condições climáticas;
- d) Geometria da via: avalia elementos como largura da pista, acostamentos, curvas, faixas adicionais, obra de arte, rampas e visibilidade. Esses fatores influenciam diretamente a operação do tráfego e a segurança viária, sendo relevantes em rodovias sujeitas a volumes elevados de tráfego pesado ou a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas.

3.2 Análise pluviométrica

A análise pluviométrica constitui uma etapa crucial da metodologia adotada neste estudo. Ela permite caracterizar o comportamento temporal das chuvas ao longo do período analisado (2012 a 2024) e subsidiar a investigação de sua relação com a condição funcional dos pavimentos. Para isso, foram empregados procedimentos estatísticos voltados ao tratamento e à organização das séries históricas de precipitação, bem como métodos de análise de tendências, capazes de identificar padrões, variações e possíveis mudanças no regime pluviométrico ao longo dos anos. Essa abordagem possibilita uma avaliação da evolução dos índices de chuva, fornecendo a base necessária para as análises estatísticas posteriores e para a correlação com os indicadores de desempenho dos pavimentos rodoviários.

3.2.1 Tratamento estatístico de dados pluviométricos

A análise de dados pluviométricos requer o tratamento estatístico adequado das séries históricas, a fim de identificar padrões, variabilidade e possíveis alterações no regime de chuvas. Estudos climatológicos indicam que a utilização de séries temporais longas é útil para reduzir a influência de eventos extremos isolados e aumentar a confiabilidade das análises (Silva *et al.*, 2023).

O método utilizado consiste na organização das médias anuais, a análise de dispersão, a identificação de *outliers* e a verificação de consistência dos dados. Esses métodos permitem compreender a dinâmica da precipitação ao longo do período estudado e sua possível relação com variáveis de engenharia, como a condição do pavimento.

3.2.2 Métodos de análise de tendências e séries históricas

A análise de tendências em séries históricas pluviométricas é empregada em estudos sobre variabilidade e mudanças climáticas. Métodos estatísticos, como regressão linear, testes não paramétricos e coeficientes de correlação, sendo este empregado no presente trabalho, são utilizados para identificar padrões de aumento, redução ou estabilidade da precipitação ao longo do tempo (Lima, 2020). No contexto da engenharia rodoviária, a análise de tendências pluviométricas permite avaliar se alterações no regime de chuvas podem estar associadas ao desempenho funcional das rodovias, sobretudo em regiões semiáridas, como no Ceará.

3.3 Coeficiente de correlação de Pearson

Nesta etapa da metodologia, emprega-se o coeficiente de correlação de Pearson como ferramenta estatística para avaliar o grau de associação linear entre a precipitação pluviométrica e os indicadores do estado geral do pavimento analisados neste estudo. Assim, são apresentados os fundamentos teóricos do coeficiente, as premissas necessárias para sua aplicação, os procedimentos adotados para validação dos resultados, bem como o nível de confiança estatística considerado, assegurando que as análises fossem conduzidas de forma consistente e confiável.

3.3.1 Método do coeficiente de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida estatística que quantifica o grau de associação linear entre duas variáveis quantitativas contínuas. Seu valor varia entre -1 e +1, sendo que valores próximos de +1 indicam correlação linear positiva forte, valores próximos de -1 indicam correlação negativa forte, e valores próximos de zero indicam ausência de correlação linear significativa (Bussab; Morettin, 2017). A tabela 1 ilustra os valores para o coeficiente de Pearson e suas respectivas interpretações.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de Pearson (r)

Coeficiente	Interpretação
$r = 1$	Correlação perfeita
$0,8 < r < 1$	Muito alta
$0,6 < r < 0,79$	Alta
$0,4 < r < 0,59$	Moderada
$0,2 < r < 0,39$	Baixa
$0 < r < 0,19$	Muito baixa
$r = 0$	Nula

Fonte: Bisquerra *et al.* (2004)

3.3.2 Premissas para o uso do método

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson exige o atendimento a um conjunto de premissas estatísticas que garantem a validade e a interpretação adequada dos resultados obtidos. No presente trabalho, essas condições foram analisadas e consideradas da seguinte forma, conforme Conrado e Werneck (2018):

- a) Relação linear entre as variáveis analisadas: o coeficiente de Pearson mede exclusivamente a associação linear entre duas variáveis. Assim, antes de sua aplicação, verificou-se se a relação entre os índices pluviométricos e os indicadores de condição das rodovias apresentava comportamento aproximadamente linear. Essa verificação foi realizada por meio da análise gráfica, utilizando diagramas de dispersão, nos quais foi possível observar tendências crescentes ou decrescentes entre as variáveis, justificando o uso do método;
- b) Dados quantitativos contínuos: o método requer que as variáveis analisadas sejam numéricas e contínuas. Neste estudo, a precipitação foi representada por valores quantitativos de pluviometria média anual, enquanto os indicadores da Pesquisa CNT de Rodovias foram expressos em termos percentuais de extensão classificados em cada categoria (ótimo, bom, regular, ruim e péssimo). Essas variáveis atendem ao requisito de mensuração quantitativa, permitindo a aplicação do coeficiente de Pearson;
- c) Independência das observações: a independência das observações pressupõe que cada par de valores analisado não seja influenciado diretamente pelos demais. No contexto deste trabalho, cada observação corresponde a um ano da série histórica, sendo considerada independente das demais, uma vez que os dados pluviométricos e os levantamentos da CNT são consolidados anualmente e não resultam de medições repetidas de um mesmo evento em curto intervalo de tempo;
- d) Distribuição aproximadamente normal dos resíduos: embora o coeficiente de Pearson seja relativamente robusto a pequenas violações da normalidade, a análise da distribuição dos resíduos contribui para maior confiabilidade estatística. Para isso, foram avaliados os resíduos resultantes da regressão linear entre as variáveis, por meio de gráficos, verificando-se uma dispersão aleatória em torno do valor zero, sem padrões sistemáticos. Esse comportamento indica normalidade aproximada e homoscedasticidade, reforçando a adequação do método empregado.

Dessa forma, o atendimento às premissas estatísticas do coeficiente de Pearson assegurou que as correlações obtidas refletissem, de maneira consistente, o grau de associação entre a variabilidade pluviométrica e a condição funcional das rodovias do estado do Ceará.

3.3.3 Validação dos resultados

A validação da aplicação do coeficiente de Pearson foi realizada por meio da análise dos gráficos de resíduos, os quais demonstraram distribuição aleatória em torno do valor zero, indicando normalidade e homoscedasticidade. Esse comportamento confirma a adequação do método estatístico empregado para a análise proposta.

3.3.4 Nível de confiança adotado

Neste estudo, adotou-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), com abordagem bicaudal, conforme amplamente recomendado em pesquisas de engenharia e ciências aplicadas. A escolha desse nível de significância reflete um equilíbrio adequado entre rigor estatístico e sensibilidade analítica, permitindo identificar associações estatisticamente relevantes sem tornar o teste excessivamente conservador. A abordagem bicaudal foi empregada por não se assumir, a priori, a direção da relação entre as variáveis analisadas, possibilitando a detecção tanto de correlações positivas quanto negativas (Bisquerra *et al.*, 2004).

Esse nível de confiança contribui para a redução da probabilidade de ocorrência do erro tipo I, que consiste na rejeição indevida da hipótese nula quando ela é verdadeira, assegurando maior robustez aos resultados obtidos. Além disso, a adoção de $\alpha = 0,05$ é amplamente aceita na literatura científica, o que favorece a comparabilidade dos achados deste estudo com investigações semelhantes. Conforme destacado por Bisquerra *et al.* (2004), a definição adequada do nível de significância é fundamental para garantir a validade das inferências estatísticas e a confiabilidade das conclusões, especialmente em estudos que buscam identificar relações entre variáveis ambientais e o desempenho de sistemas de infraestrutura.

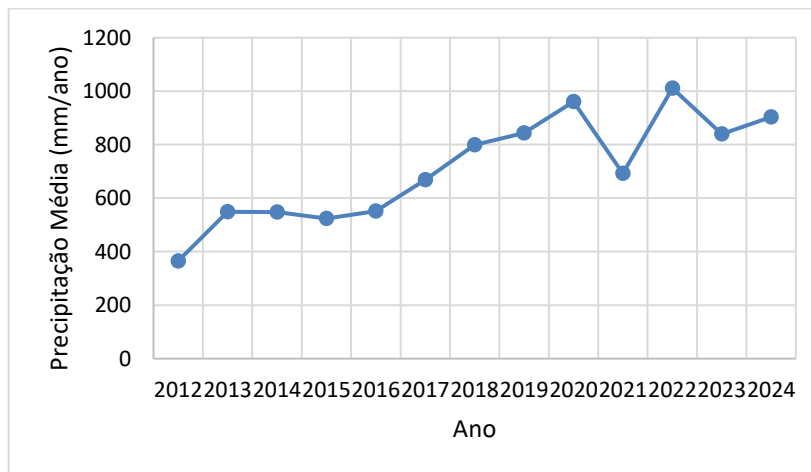
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da análise integrada dos dados pluviométricos e das informações sobre a condição funcional dos pavimentos rodoviários do estado do Ceará, divididos nos fatores de estado geral, condição funcional do pavimento, sinalização e geometria da via, conforme a Confederação Nacional do Transporte (CNT). São discutidos os principais padrões observados, bem como os resultados da aplicação do coeficiente de correlação de Pearson, com o objetivo de identificar e interpretar a existência de associações estatisticamente significativas entre o regime de chuvas e a deterioração dos pavimentos no período compreendido entre 2012 e 2024.

4.1 Análise Pluviométrica

Os dados pluviométricos do estado do Ceará estão ilustrados no Gráfico 1 em milímetros por ano (mm/ano), do ano 2012 a 2024. Dados oriundos de registros da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Gráfico 1 - Gráfico de dispersão da pluviometria do estado do Ceará - (mm/ano)



Fonte: adaptado FUNCEME (2025).

Baseando-se na análise do Gráfico 1, verifica-se uma tendência de aumento na pluviometria média anual. Além disso, há um maior afastamento da tendência dos dados entre os anos de 2018 e 2024, em comparação com os dados de 2012 a 2017, indicando uma maior variação na ocorrência de precipitações no Ceará. Esse comportamento é particularmente relevante para a presente pesquisa, pois a intensificação da variabilidade pluviométrica implica

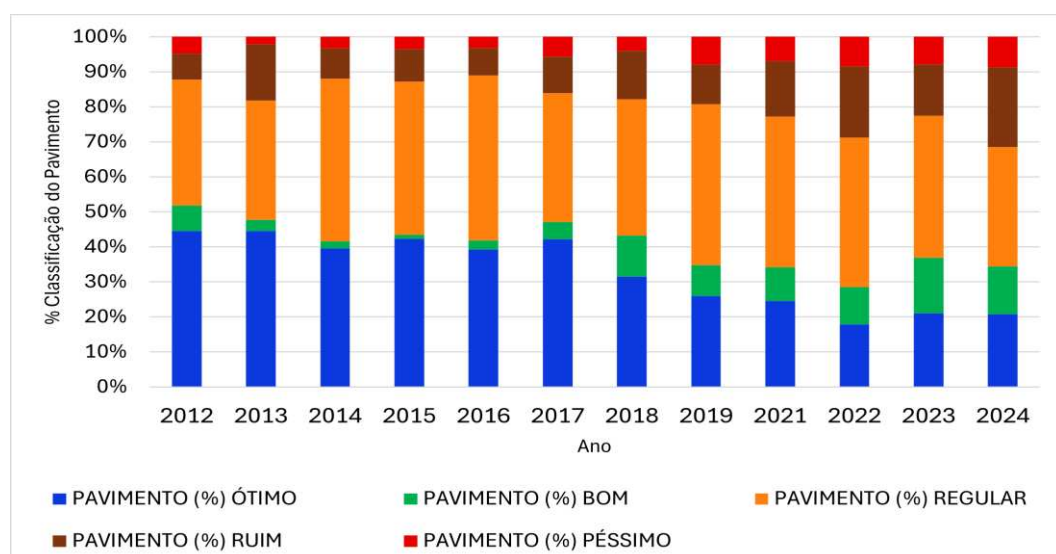
condições mais severas de exposição dos pavimentos asfálticos a ciclos alternados de umedecimento e secagem.

O aumento da dispersão dos dados no período mais recente sugere maior frequência de eventos extremos de precipitação, os quais tendem a potencializar mecanismos de deterioração associados à infiltração de água e à sobrecarga dos sistemas de drenagem. Dessa forma, a tendência observada reforça a necessidade de analisar a relação entre o regime de chuvas e a evolução da condição funcional das rodovias do Ceará, justificando o emprego de métodos estatísticos para investigar a associação entre precipitação e desempenho do pavimento ao longo do tempo.

4.2 Análise do impacto da pluviometria na condição funcional do pavimento das rodovias

O Gráfico 2 apresenta a evolução da classificação do pavimento asfáltico no estado do Ceará no período compreendido entre 2012 e 2024. As informações são oriundas da Pesquisa CNT de Rodovias, publicada anualmente, com exceção do ano de 2020, em que o levantamento não foi realizado em decorrência das restrições impostas pela pandemia da Covid-19. O gráfico ilustra a distribuição percentual das diferentes classes de condição do pavimento, ótimo, bom, regular, ruim e péssimo, ao longo da série histórica analisada, permitindo a visualização das variações temporais e a identificação de tendências associadas à evolução da qualidade funcional do revestimento asfáltico no período considerado.

Gráfico 2 - Evolução das classificações - pavimento



Fonte: adaptado CNT (2025).

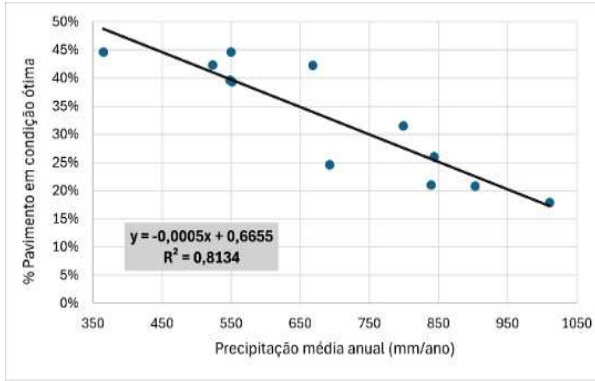
Ao analisar o gráfico 2, observa-se uma tendência clara de redução da parcela do pavimento asfáltico classificada como ótima, sobretudo a partir do ano de 2018, indicando uma perda progressiva do desempenho funcional da malha rodoviária ao longo dos anos mais recentes. Paralelamente, verifica-se um aumento gradual das classificações bom, ruim e péssimo, o que evidencia um deslocamento do estado geral do pavimento para condições inferiores, compatível com o avanço natural dos processos de deterioração e com a intensificação de fatores externos atuantes no período analisado.

Por outro lado, a classificação regular apresenta comportamento relativamente estável ao longo da série histórica, sugerindo que essa faixa atua como uma condição intermediária de transição entre estados superiores e inferiores, absorvendo parte das variações sem apresentar oscilações expressivas. Esse padrão pode estar associado tanto às características do método de avaliação visual adotado quanto à própria dinâmica de degradação do pavimento, na qual trechos tendem a migrar gradualmente de condições boas para ruins, permanecendo por períodos mais longos na classificação regular.

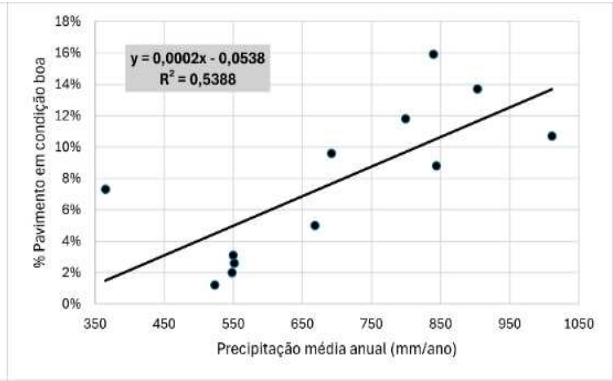
De forma geral, os resultados indicam um processo contínuo de degradação funcional, mais acentuado nos últimos anos da série, reforçando a necessidade de análises integradas que considerem fatores climáticos, operacionais e de manutenção para explicar a evolução observada nas condições do pavimento. Futuramente, tais análises corroborarão para um melhor planejamento de manutenção e reabilitação, enriquecendo e embasando de maneira mais ampla, considerando todos os aspectos citados, desta forma,

O gráfico 3 apresenta a relação entre a evolução temporal das diferentes classificações da condição do pavimento, conforme os critérios adotados pela Pesquisa CNT de Rodovias, e os registros da pluviometria média anual no estado do Ceará. Cada gráfico permite analisar, de forma individualizada, o comportamento das classes ótimo, bom, regular, ruim e péssimo frente às variações dos índices pluviométricos ao longo dos anos. Essa abordagem possibilita uma compreensão mais detalhada da forma como a variabilidade das chuvas pode estar associada às mudanças observadas na condição funcional dos pavimentos, permitindo identificar padrões de associação positiva ou negativa entre o aumento da precipitação e a evolução das classificações. Dessa forma, os gráficos contribuem para a análise integrada entre fatores climáticos e desempenho da infraestrutura rodoviária.

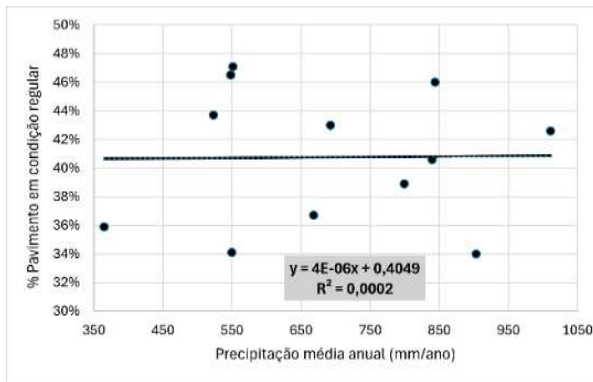
Gráfico 3 - Gráfico de dispersão pavimento versus Precipitação média anual



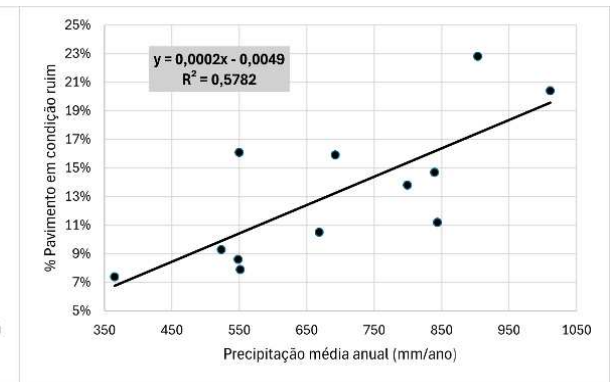
a) Ótimo



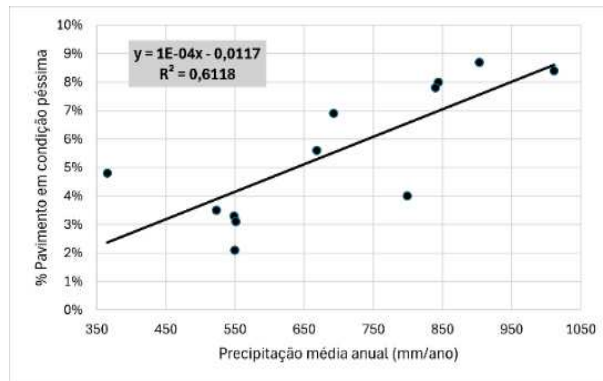
b) Bom



c) Regular



d) Ruim



e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 2 sintetiza os valores dos coeficientes de correlação de Pearson obtidos para cada classificação da condição do pavimento asfáltico, relacionando-os com a precipitação média anual no Ceará. Essa tabela constitui um elemento central da análise, uma vez que permite quantificar o grau e o sentido da associação linear entre a variabilidade pluviométrica e a evolução das diferentes classes de condição funcional do pavimento. A partir desses coeficientes, torna-se possível identificar quais classificações apresentam maior sensibilidade às variações de precipitação, bem como avaliar a consistência dos resultados observados nos gráficos, reforçando a interpretação integrada entre análise visual e análise estatística.

Tabela 2 - Resumo de correlação condição funcional do pavimento x precipitação

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON				
ÓTIMO	BOM	REGULAR	RUIM	PÉSSIMO
-0,90	-0,73	0,02	-0,76	-0,78

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Observando os resultados da análise entre a classificação da condição do pavimento, obtida pela Pesquisa CNT de Rodovias, e os valores anuais de precipitação, verifica-se uma correlação forte entre o aumento das chuvas e a redução do percentual de segmentos avaliados como ótimos. O coeficiente de correlação encontrado foi de $-0,90$, superior em magnitude ao valor crítico para o tamanho da amostra (12 anos), considerando uma abordagem bilateral, nível de significância de 5% e valor crítico de 0,576, comprovando significância estatística. Para as condições avaliadas como ruim e péssima, também foram identificadas correlações fortes e estatisticamente significativas, indicando que o incremento da precipitação está diretamente associado ao agravamento do estado funcional do pavimento no período compreendido entre 2012 e 2024. Esses resultados reforçam o papel determinante das variáveis climáticas, especialmente a chuva, no processo de deterioração das rodovias.

De forma isolada, a correlação estatística obtida não é suficiente para explicar de forma abrangente a deterioração da condição do pavimento associada ao aumento das chuvas médias anuais no estado do Ceará ao longo do período analisado. Isso se deve ao fato de que o desempenho dos pavimentos é influenciado por múltiplos fatores, como volume e composição do tráfego, práticas e frequência de manutenção, características estruturais, qualidade dos materiais e eficiência dos sistemas de drenagem.

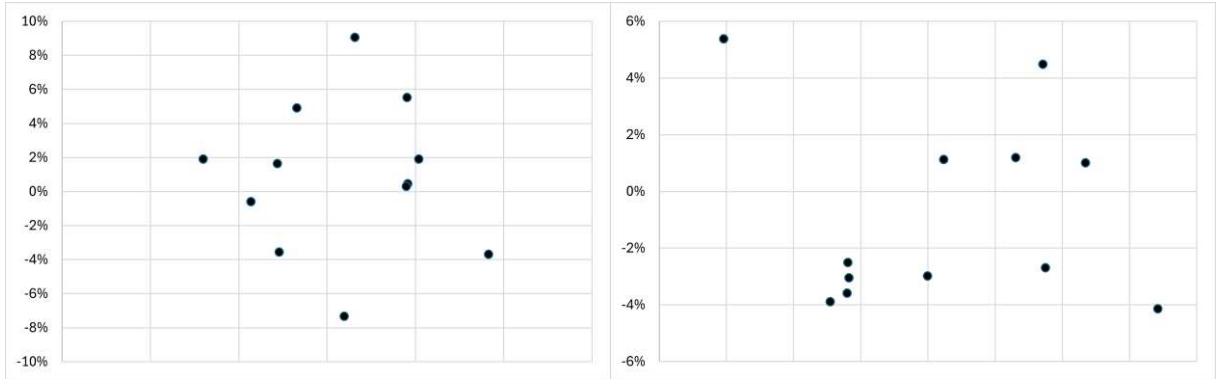
No entanto, os resultados encontrados mostram-se coerentes tanto com o método de levantamento adotado pela Pesquisa CNT de Rodovias, de caráter predominantemente visual

e funcional, quanto com o comportamento físico-mecânico dos pavimentos asfálticos quando submetidos à ação da água proveniente da precipitação. A infiltração de água por meio de fissuras e trincas existentes pode acelerar processos de deterioração, como a perda de aderência agregado–ligante e a redução da capacidade de suporte das camadas inferiores, contribuindo para a progressiva piora da condição funcional do pavimento.

De acordo com o método de levantamento da Pesquisa CNT de Rodovias, de caráter visual e qualitativo, a classificação ótima é atribuída apenas aos trechos que não apresentam quaisquer defeitos ou imperfeições superficiais. Nesse contexto, o aumento da precipitação média anual e a concentração das chuvas nos primeiros meses do ano no estado do Ceará podem estar contribuindo para a aceleração dos processos iniciais de deterioração dos pavimentos asfálticos. A forte correlação positiva observada entre a precipitação e a classificação bom indica um deslocamento gradual das condições, no qual pavimentos anteriormente classificados como ótimos passam a apresentar defeitos incipientes, suficientes para rebaixar sua avaliação, mas ainda sem atingir estágios mais severos de degradação.

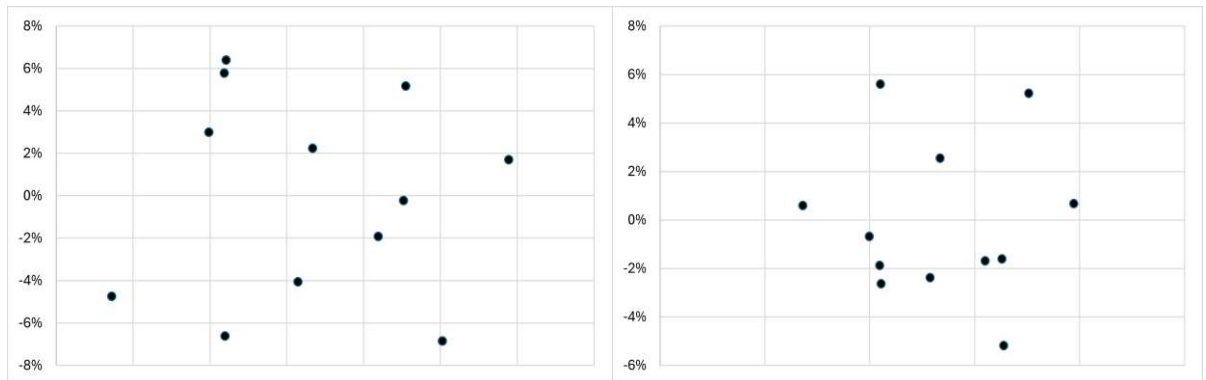
Esse comportamento evidencia uma dinâmica progressiva de deterioração, em que a redução da extensão de pavimentos em condição ótima ocorre simultaneamente ao aumento da classe bom, não por melhorias estruturais, mas pelo avanço natural dos defeitos associados à ação da água. Além disso, os gráficos de resíduos apresentados no gráfico 4 reforçam a consistência estatística da análise, uma vez que demonstram distribuição aproximadamente aleatória em torno do valor zero, indicando normalidade dos resíduos e validando a aplicação do coeficiente de correlação de Pearson para a avaliação da relação entre precipitação e condição funcional do pavimento.

Gráfico 4 - Gráfico de resíduos pavimento versus Precipitação média anual



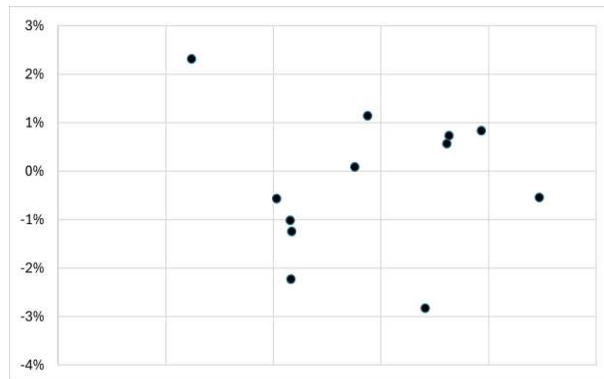
a) Ótimo

b) Bom



c) Regular

d) Ruim



e) Péssimo

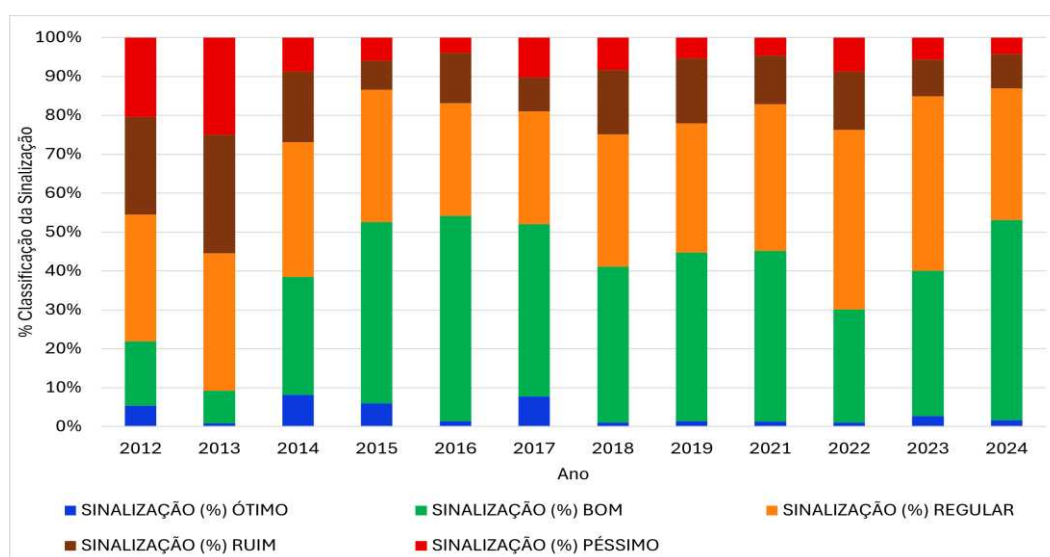
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os gráficos de resíduos reforçam a adequação do uso do coeficiente de correlação de Pearson, uma vez que exibem distribuição aleatória em torno de zero, indicando normalidade e ausência de padrões que violem os pressupostos do método. Além disso, observa-se maior dispersão nas categorias ótimo, bom e regular, comportamento esperado diante da influência de fatores externos, especialmente o aumento da precipitação ao longo dos anos, que acentuam a variabilidade das condições estruturais. Por outro lado, as classes ruim e péssima apresentam variações mais restritas, possivelmente devido à adoção de práticas pontuais de manutenção que estabilizam temporariamente tais condições, ou ainda pela própria limitação do método de avaliação da CNT.

4.3 Análise do impacto da pluviometria na sinalização das rodovias

O gráfico 5 apresenta a evolução da classificação da sinalização das rodovias avaliadas, com base nos dados coletados anualmente pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) no âmbito da Pesquisa CNT de Rodovias. Esse indicador reflete as condições da sinalização horizontal e vertical das vias, considerando aspectos como visibilidade, conservação e conformidade com as normas técnicas vigentes. A análise desse gráfico permite compreender o comportamento temporal da qualidade da sinalização, bem como identificar tendências de melhoria, estabilidade ou deterioração ao longo dos anos avaliados.

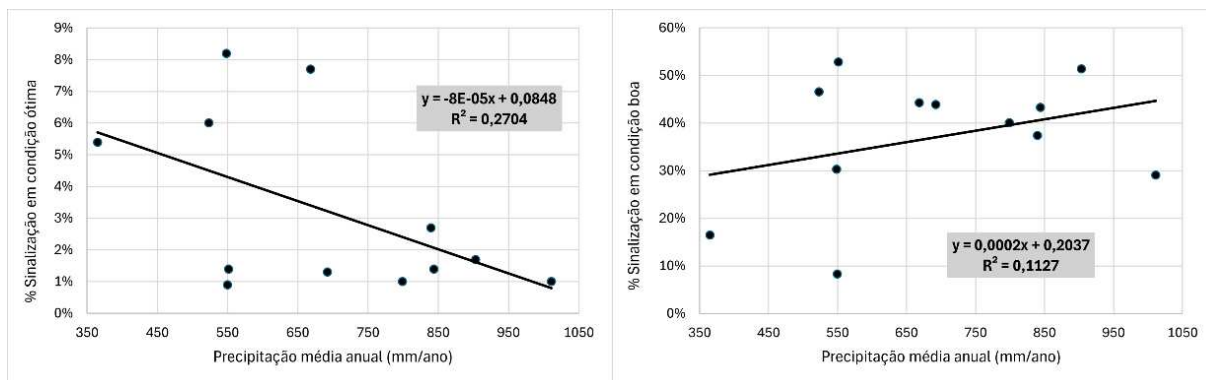
Gráfico 5 - Evolução das classificações - sinalização da via



Fonte: adaptado CNT (2025).

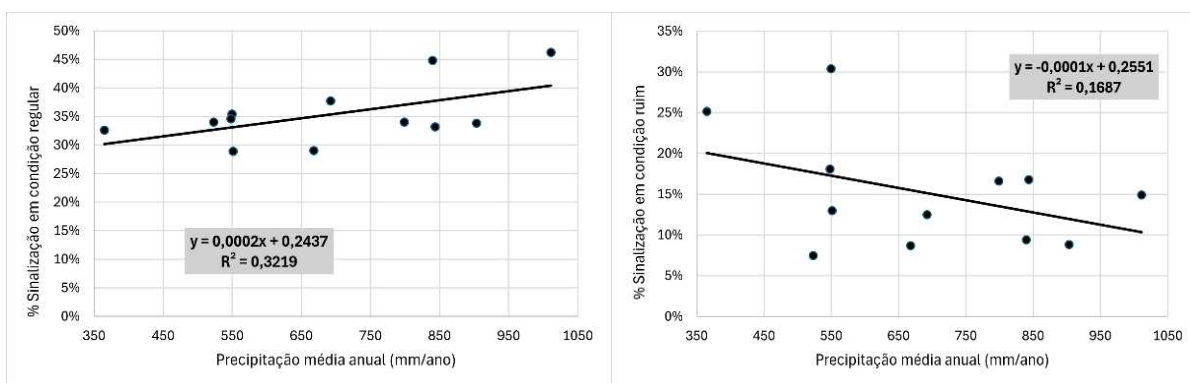
Analisando-se o gráfico 5, não se observa qualquer tendência de classificação que se assemelhe ao constatado na subseção anterior, ao analisar a classificação do pavimento asfáltico. O gráfico 6 relaciona a evolução de cada classificação da condição da sinalização e os registros da pluviometria média anual no Ceará.

Gráfico 6 - Gráfico de dispersão sinalização versus Precipitação média anual



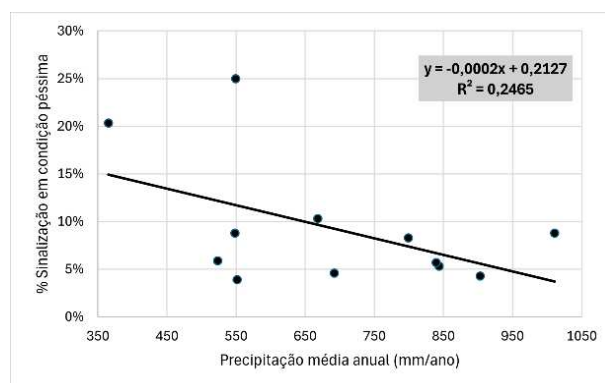
a) Ótimo

b) Bom



c) Regular

d) Ruim



e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 3 resume os coeficientes de Pearson para cada classificação da condição da sinalização da via e dados de precipitação.

Tabela 3 - Resumo de correlação condição da sinalização x precipitação

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON				
ÓTIMO	BOM	REGULAR	RUIM	PÉSSIMO
-0,52	0,33	0,57	-0,41	-0,50

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A variação pluviométrica apresenta influência limitada sobre a condição da sinalização rodoviária, sobretudo quando comparada aos seus efeitos sobre o pavimento. Os principais impactos potenciais associados à chuva concentram-se no recobrimento parcial da sinalização vertical pela vegetação adjacente à faixa de domínio e no desgaste progressivo da sinalização horizontal, em função da ação combinada da água, do tráfego e do envelhecimento dos materiais refletivos.

Entretanto, no contexto deste estudo, tais efeitos tendem a ser atenuados, uma vez que o levantamento da condição das rodovias ocorre predominantemente no segundo semestre do ano, período caracterizado pela estiagem no estado do Ceará. Nessa época, a cobertura vegetal encontra-se em condição menos desenvolvida, reduzindo a probabilidade de obstrução visual da sinalização vertical. Ademais, a ausência de chuvas significativas durante o período de avaliação minimiza a influência direta da precipitação sobre o desgaste recente da sinalização horizontal, contribuindo para que a variabilidade pluviométrica exerça papel secundário na classificação da condição da sinalização viária observada nos dados analisados.

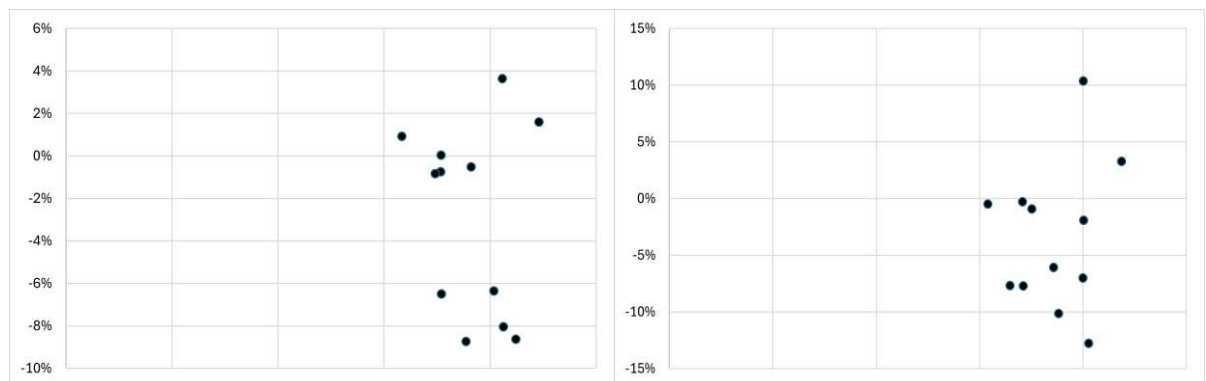
Analisando o gráfico 7, somente o gráfico 7 a) (sinalização ótima x precipitação média anual) apresenta uma distribuição dos resíduos em torno da tendência central ocorre de forma aproximadamente aleatória e simétrica, sem padrões evidentes de heterocedasticidade ou concentração sistemática, o que sugere comportamento próximo à normalidade. Esse aspecto confere validade à aplicação da correlação linear de Pearson, ainda que os resultados indiquem que a precipitação não atua como fator determinante isolado na degradação da sinalização, reforçando o papel complementar de fatores como manutenção e visibilidade, entretanto, os demais gráficos não apresentam as mesmas características, corroborando para os valores de Pearson encontrados

Gráfico 7 - Gráfico de resíduos sinalização versus Precipitação média anual



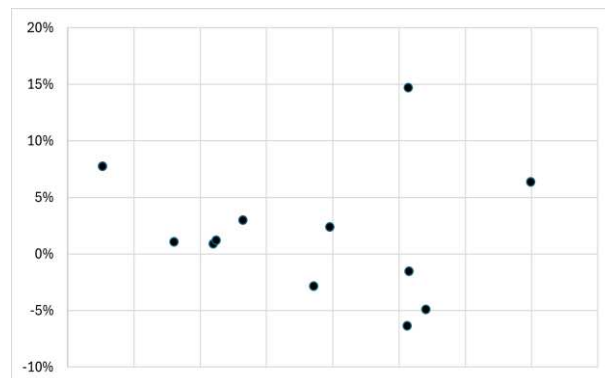
a) Ótimo

b) Bom



c) Regular

d) Ruim



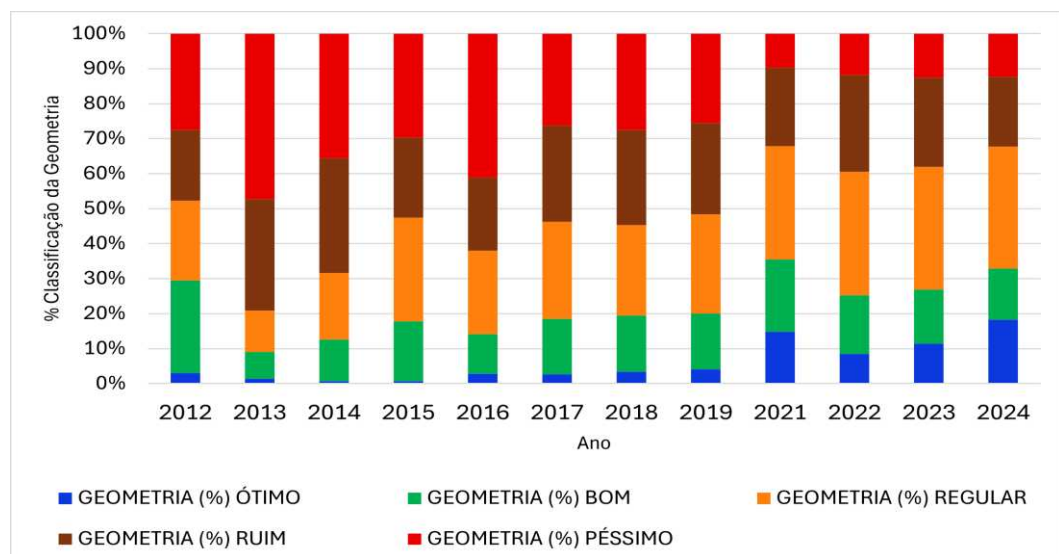
e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.4 Análise do impacto da pluviometria na geometria das rodovias

O gráfico 8 ilustra a classificação da geometria das rodovias avaliadas, conforme os dados levantados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) e publicados anualmente na Pesquisa CNT de Rodovias. A representação gráfica possibilita a análise da evolução das condições geométricas das vias ao longo dos anos, considerando aspectos relacionados à segurança e à adequação operacional da infraestrutura viária.

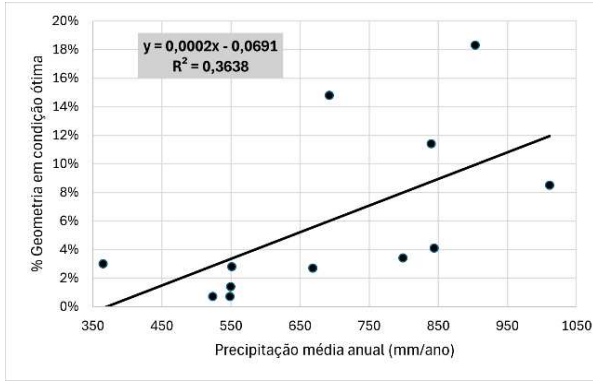
Gráfico 8 - Evolução das classificações - geometria da via



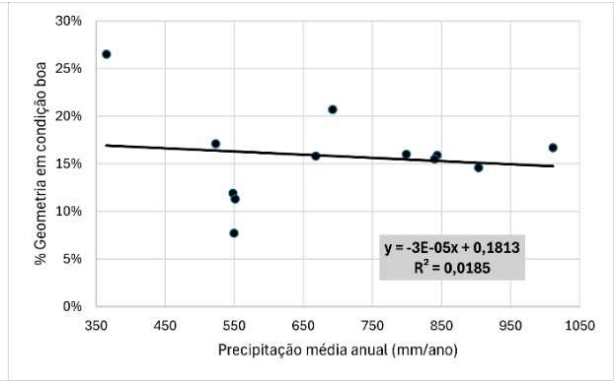
Fonte: adaptado CNT (2025).

O gráfico 8 apresenta a relação entre a evolução das diferentes classificações da geometria da via, ótimo, bom, regular, ruim e péssimo, e os registros da precipitação média anual no estado do Ceará ao longo do período analisado. Esses gráficos de barras permitem avaliar o comportamento de cada classe geométrica em função da variabilidade pluviométrica, possibilitando a identificação de tendências, padrões de concentração dos dados e níveis de dispersão. A análise conjunta desses resultados contribui para a compreensão da sensibilidade da geometria viária às condições climáticas, bem como para a comparação de sua resposta em relação aos demais parâmetros avaliados na Pesquisa CNT de Rodovias.

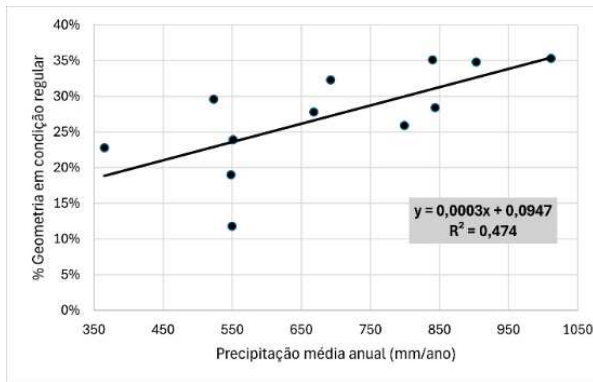
Gráfico 9 - Gráfico de dispersão geometria versus Precipitação média anual



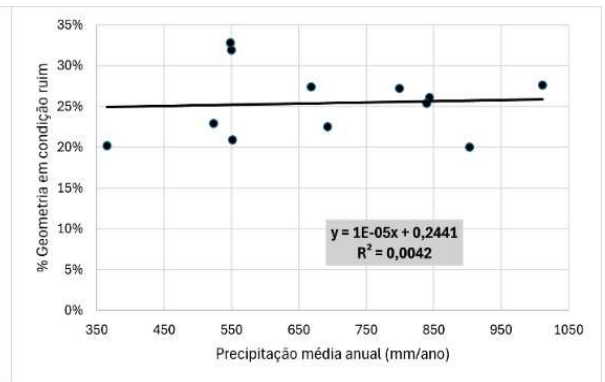
a) Ótimo



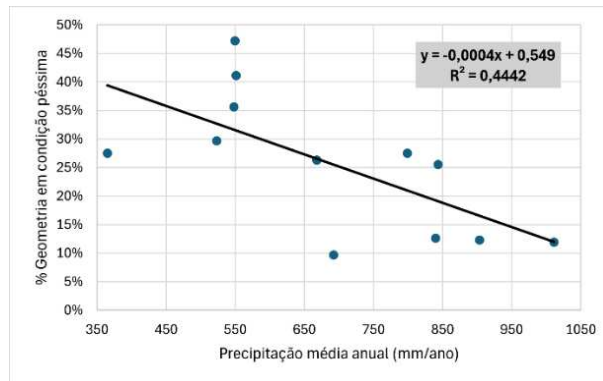
b) Bom



c) Regular



d) Ruim



e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 4 - Resumo de correlação condição da geometria x precipitação

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON				
ÓTIMO	BOM	REGULAR	RUIM	PÉSSIMO
0,60	-0,14	0,69	0,06	-0,67

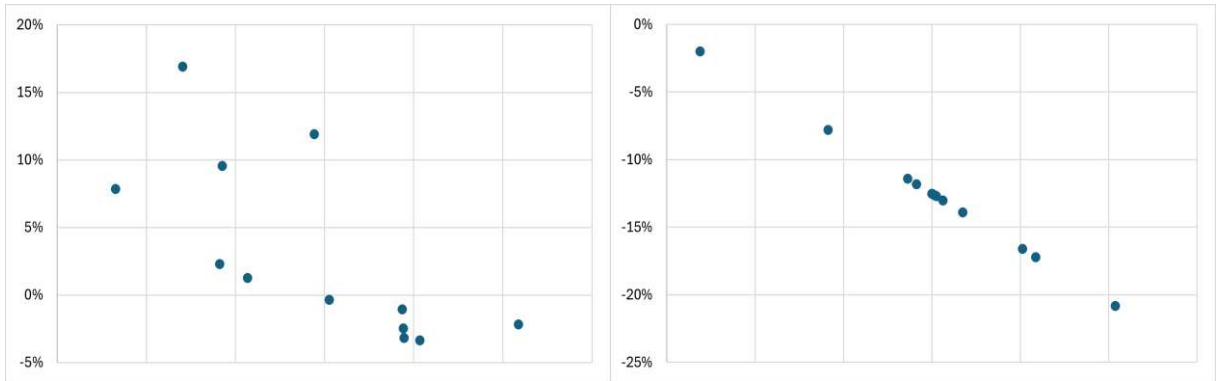
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A análise da correlação entre a precipitação e a condição da geometria das rodovias indica que não há uma relação direta e consistente entre o regime pluviométrico e a deterioração geométrica. Os valores obtidos mostram correlação moderada positiva para as classificações ótima (0,60) e regular (0,69), enquanto as classes ruim (0,06) e boa (-0,14) apresentam correlações fracas, e a condição péssima indica correlação moderada negativa (-0,67).

Esses resultados sugerem que a geometria da via é pouco sensível às variações de precipitação no período compreendido entre 2012 e 2024, o que é coerente do ponto de vista técnico, uma vez que elementos geométricos, como traçado, largura de pista, curvas e rampas, são definidos na fase de projeto e tendem a permanecer estáveis ao longo do tempo. Assim, diferentemente do pavimento, a geometria não sofre deterioração progressiva diretamente associada à ação da água, sendo mais influenciada por aspectos de concepção, adequação ao tráfego e intervenções estruturais pontuais do que pelas variações pluviométricas.

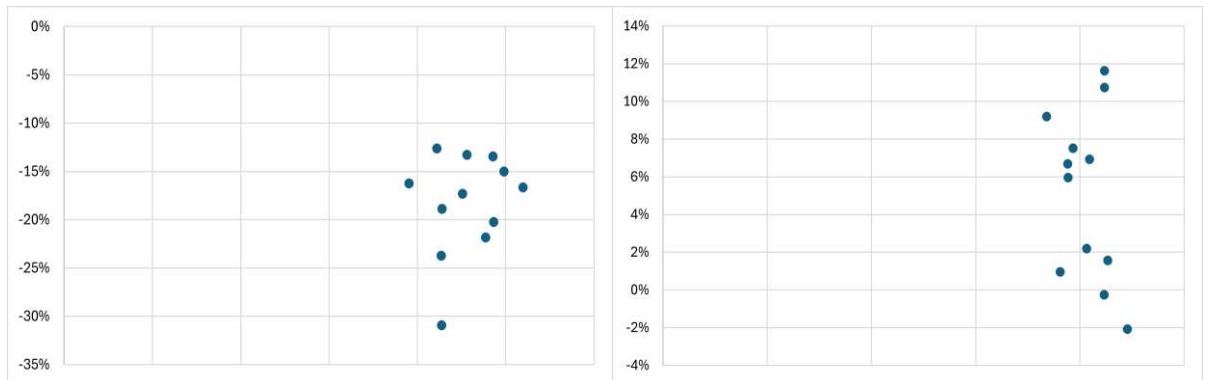
O gráfico 10 representa os resíduos da análise da correlação linear, observando-se a distribuição constata-se que não há uma distribuição dos valores em torno de 0, desta forma, a correlação linear não seria a análise estatística ideal para esse parâmetro, reforçando os resultados da tabela 4.

Gráfico 10 - Gráfico de resíduos geometria versus Precipitação média anual



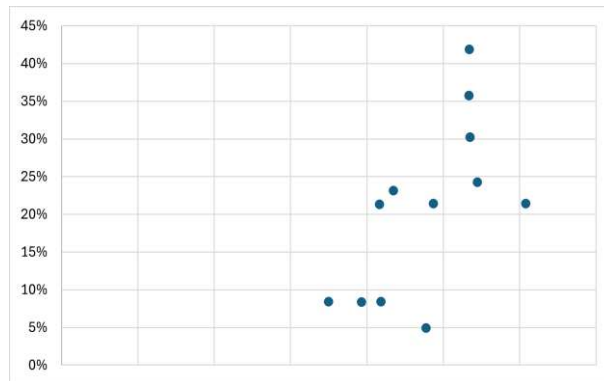
a) Ótimo

b) Bom



c) Regular

d) Ruim



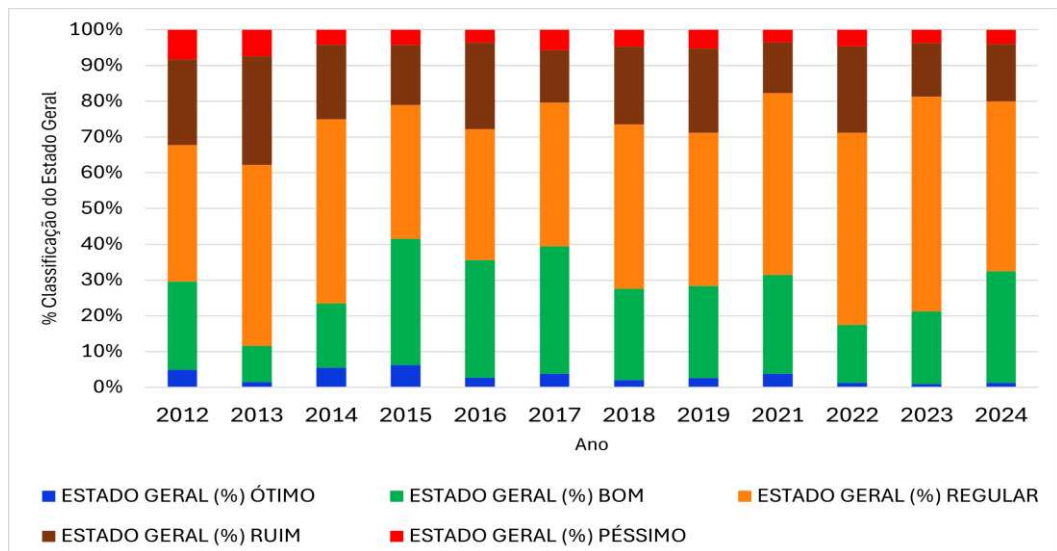
e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.5 Análise do impacto da pluviometria estado geral das rodovias

O gráfico 11 apresenta a classificação do estado geral das vias levantadas, de acordo com os dados levantados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) e divulgados, anualmente (com exceção do ano de 2020, por conta da Pandemia da Covid-19), na Pesquisa CNT de Rodovias.

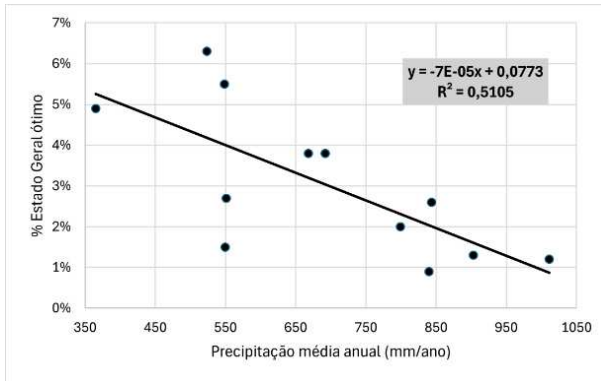
Gráfico 11 - Evolução das classificações - estado geral



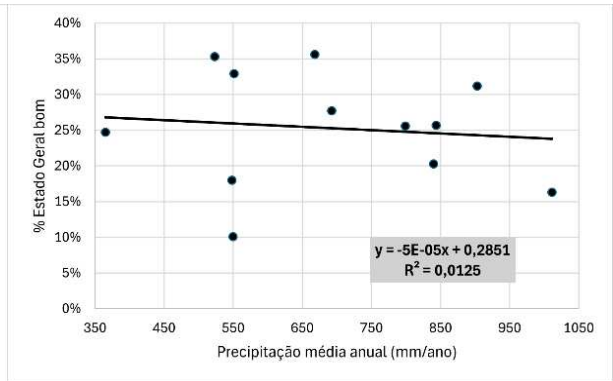
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

O gráfico 12 apresentam a relação entre a evolução das diferentes classificações do estado geral da via, ótimo, bom, regular, ruim e péssimo, e os registros da precipitação média anual no estado do Ceará ao longo do período analisado. Por meio desses gráficos de dispersão, é possível visualizar o comportamento da condição global das rodovias em função da variabilidade pluviométrica, identificando tendências de redução das condições superiores e possíveis migrações para classes intermediárias ou inferiores em anos mais chuvosos. Essa representação gráfica auxilia na interpretação dos resultados estatísticos e na compreensão integrada dos efeitos da precipitação sobre o desempenho geral da malha rodoviária cearense.

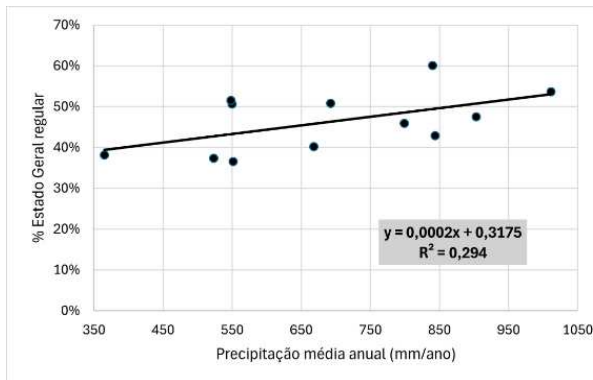
Gráfico 12 - Gráfico de dispersão estado geral versus Precipitação média anual



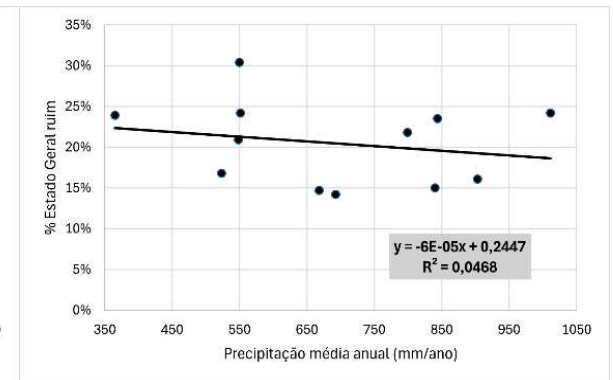
b) Ótimo



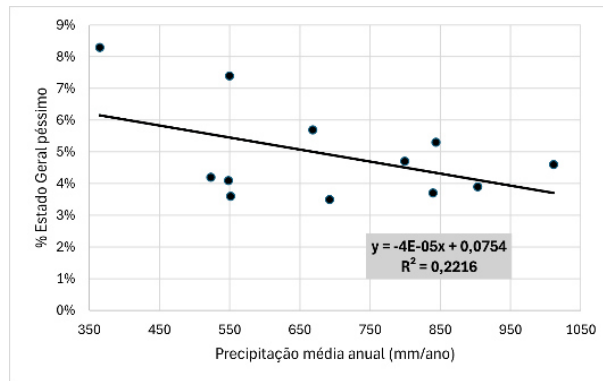
b) Bom



c) Regular



d) Ruim



e) Péssimo

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A tabela 5 resume os coeficientes de correlação de Pearson entre as classificações do estado da via e a precipitação média anual no Ceará. Esses valores quantificam a intensidade e o sentido da relação linear entre a pluviometria e a condição funcional das rodovias, auxiliando na identificação das classes mais sensíveis às variações climáticas.

Tabela 5 - Resumo de correlação estado geral x precipitação

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON				
ÓTIMO	BOM	REGULAR	RUIM	PÉSSIMO
-0,71	-0,11	0,54	-0,22	-0,47

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

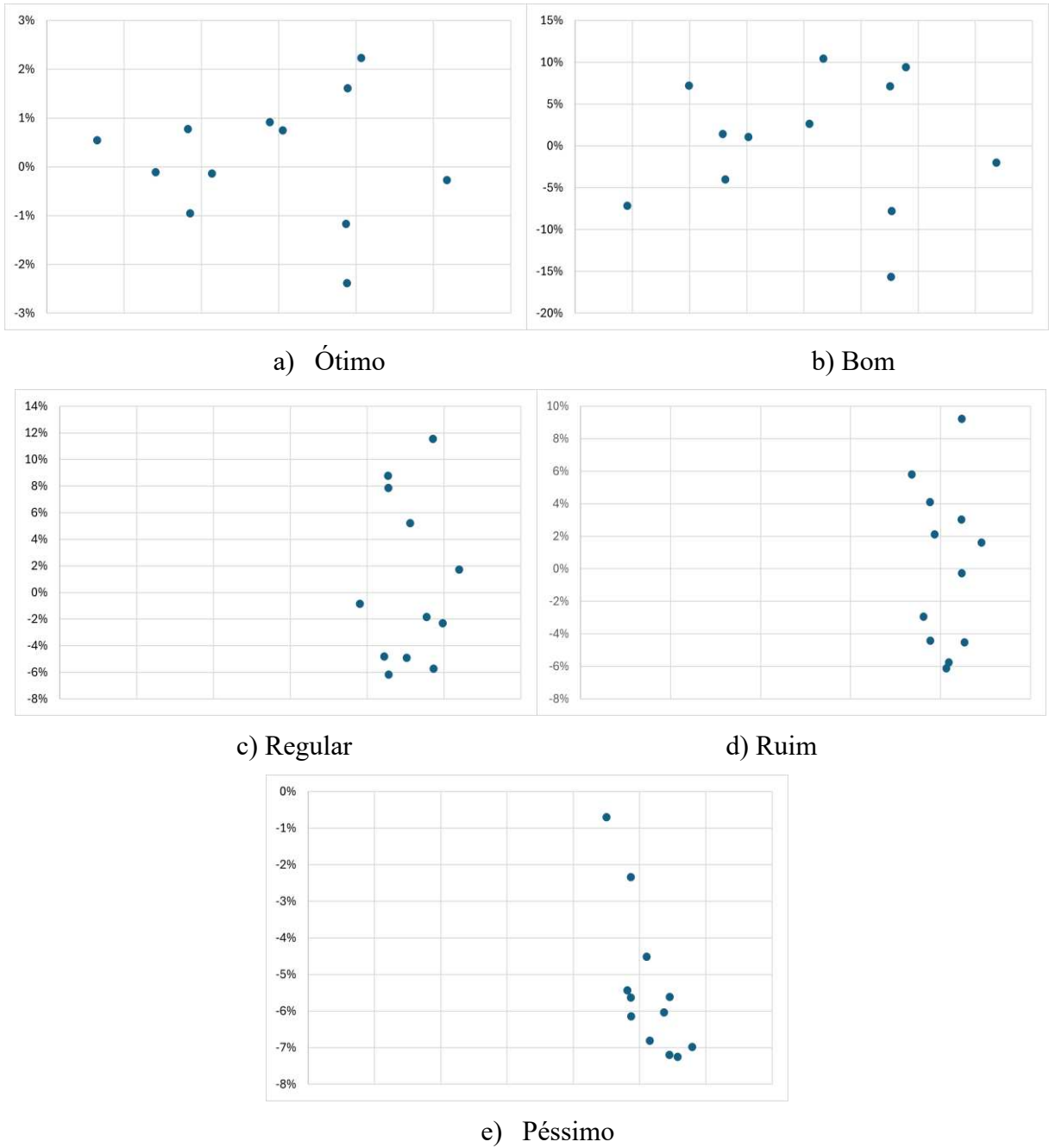
Com base nos coeficientes de correlação entre precipitação e estado geral das rodovias, observa-se que o aumento da pluviometria está associado principalmente a uma redução da parcela de rodovias classificadas como ótima, evidenciada pela correlação negativa forte (-0,71). Esse resultado indica que, em períodos mais chuvosos, há tendência de perda da condição global considerada ideal, refletindo o efeito conjunto da água sobre os diferentes componentes avaliados no estado geral.

Para a classificação regular, verifica-se uma correlação positiva moderada (0,54), sugerindo que o aumento da precipitação contribui para a migração de trechos anteriormente em melhores condições para patamares intermediários de desempenho. Esse comportamento é coerente com a deterioração progressiva induzida pela água, que inicialmente afeta o pavimento e, de forma indireta, compromete a avaliação global da rodovia.

As correlações observadas para as categorias bom, ruim e péssimo apresentam valores baixos a moderados, indicando menor sensibilidade direta do estado geral da rodovia à variação pluviométrica nessas classificações. Esse resultado reforça que a influência da precipitação se manifesta na redução das condições superiores e no aumento das condições intermediárias, enquanto os estados mais críticos tendem a ser influenciados também por outros fatores, como tráfego, idade do pavimento, práticas de manutenção e limitações do método de avaliação.

O gráfico 13 representa os resíduos da análise da correlação linear do estado geral e a precipitação média anual, dentre eles somente o gráfico 13 a) apresenta homoscedasticidade, indicando normalidade dos resíduos e validando a aplicação do coeficiente de correlação de Pearson para a avaliação da relação.

Gráfico 13 - Gráfico de resíduos sinalização versus Precipitação média anual



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.6 Análise integrada dos resultados de correlação

A tabela 6 apresenta o resumo dos coeficientes de correlação entre os parâmetros avaliados na Pesquisa CNT de Rodovias, pavimento, sinalização, geometria da via e estado geral, e a precipitação pluviométrica, considerando as diferentes classes de condição (ótimo, bom, regular, ruim e péssimo). Os valores obtidos permitem analisar o sentido e a intensidade da relação entre o regime de chuvas e a evolução da condição da infraestrutura rodoviária, evidenciando como o aumento da precipitação pode estar associado à melhoria ou à deterioração dos indicadores avaliados ao longo do período analisado.

Tabela 6 - Resumo de correlação parâmetros x precipitação

Parâmetro	Classificação				
	Ótimo	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Pavimento	-0,90	0,73	0,02	0,76	0,78
Sinalização	-0,52	0,34	0,57	-0,41	-0,50
Geometria	0,60	-0,14	0,69	0,06	-0,67
Estado Geral	-0,71	-0,11	0,54	-0,22	-0,47

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Baseando-se nos coeficientes de correlação de Pearson, é possível extrair implicações para a gestão de pavimentos e para o planejamento de ações de manutenção e reabilitação da malha rodoviária do estado do Ceará, especialmente no que se refere à influência do regime pluviométrico. Para a condição do pavimento, observa-se uma correlação fortemente negativa entre a precipitação e a classificação ótimo (-0,90), indicando que o aumento da pluviometria média anual está diretamente associado à redução da extensão de pavimentos em condições ideais. Em contrapartida, as correlações positivas com as classificações bom (0,73) e ruim (0,76) sugerem um deslocamento progressivo do estado do pavimento para categorias inferiores à medida que a exposição à água se intensifica. Esse comportamento reforça o papel da precipitação como agente acelerador da deterioração funcional, ainda que não seja o único fator atuante. Do ponto de vista gerencial, esses resultados indicam a importância de intervenções preventivas em trechos ainda classificados como bons, evitando sua rápida evolução para condições ruins, que demandam ações de maior custo.

No caso da sinalização, as correlações apresentam magnitudes moderadas, podendo-se destacar a relação negativa com a condição ótimo (-0,52) e positiva com a condição regular (0,57). Esses resultados indicam que a precipitação exerce influência limitada, porém

perceptível, sobretudo na degradação gradual da sinalização, possivelmente associada ao desgaste da sinalização horizontal e à redução da visibilidade da sinalização vertical. Para a gestão rodoviária, isso sugere a necessidade de manutenção periódica da sinalização, especialmente após períodos chuvosos, ainda que a chuva não seja o fator predominante de deterioração nesse componente.

Quanto à geometria da via, observa-se correlação positiva com as classificações ótimo (0,60) e regular (0,69), e negativa com péssimo (-0,67). Esse comportamento indica que a geometria apresenta menor sensibilidade direta à variabilidade pluviométrica, o que é coerente com seu caráter mais permanente e estrutural. Ainda assim, a presença de correlação com a classe regular pode refletir impactos indiretos da chuva, como erosões em acostamentos, falhas de drenagem e problemas localizados que afetam a avaliação geométrica. Para a gestão, os resultados indicam que ações corretivas na geometria tendem a ser menos frequentes, porém devem estar associadas a melhorias nos sistemas de drenagem.

Por fim, o estado geral, que sintetiza os três parâmetros (pavimento, sinalização e geometria), apresenta correlação negativa significativa com a classificação ótimo (-0,71) e positiva com a condição regular (0,54). Esse resultado confirma que o aumento da precipitação média anual está associado à perda gradual da qualidade global das rodovias, representada pela Pesquisa CNT de rodovias pelo estado geral, refletindo principalmente a deterioração da condição funcional do pavimento, que de acordo com os resultados obtidos, possui maior peso na avaliação integrada. Para a tomada de decisão das estratégias de manutenção e reabilitação, esses achados reforçam a necessidade de incorporar variáveis climáticas, especialmente a pluviometria, nos modelos de priorização de manutenção e reabilitação, permitindo intervenções mais efetivas, preventivas e de maior resiliência frente às condições climáticas do estado do Ceará. Em síntese, os resultados evidenciam que a precipitação não atua de forma isolada, mas exerce influência relevante sobre a evolução da condição funcional das rodovias, fornecendo subsídios técnicos importantes para o planejamento estratégico de manutenções e reabilitações da malha viária, alinhados aos objetivos deste trabalho.

Apesar da relevância dos resultados obtidos, é importante destacar que a análise desenvolvida apresenta limitações inerentes à abordagem adotada. A correlação estatística, embora permita identificar associações significativas entre a precipitação e a condição funcional das rodovias, não estabelece relações diretas de causalidade, uma vez que a deterioração dos pavimentos resulta da atuação conjunta de múltiplos fatores. Aspectos como volume e composição do tráfego, condições de drenagem, características dos materiais, idade

da infraestrutura, práticas e frequência de manutenção, bem como variações térmicas, não foram explicitamente considerados no modelo estatístico empregado, podendo influenciar os resultados observados. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros incorporem análises multivariadas e abordagens espaciais, capazes de integrar variáveis climáticas adicionais e parâmetros estruturais e operacionais das rodovias. Ademais, a utilização de dados em escala mais detalhada, por trecho ou segmento viário, pode contribuir para uma compreensão mais precisa dos mecanismos de deterioração associados ao regime pluviométrico, ampliando a robustez das inferências e fornecendo subsídios ainda mais consistentes para o aprimoramento das políticas de gestão e manutenção da malha rodoviária do estado do Ceará.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a relação entre a variabilidade pluviométrica e a condição funcional das rodovias do estado do Ceará, a partir da integração entre dados da Pesquisa CNT (Confederação Nacional do Transporte) de Rodovias e séries históricas de precipitação. Para isso, foram avaliados os indicadores de condição do pavimento, sinalização, geometria e estado geral, permitindo investigar de forma estatística a associação entre o regime de chuvas e o desempenho funcional da malha rodoviária no período compreendido entre 2012 e 2024. Constatou-se que a precipitação pluviométrica exerce uma maior influência sobre a condição do pavimento, evidenciando correlações, sobretudo na redução da parcela de pavimentos classificados como ótimos e no aumento das classificações inferiores, esse comportamento reforça o papel da água como agente acelerador da deterioração.

Em relação à sinalização viária, os resultados apontaram baixa ou inexistente correlação com a variabilidade pluviométrica, indicando que a precipitação não se configura como fator determinante para sua condição. Esse resultado pode ser explicado pela menor sensibilidade da sinalização às variações climáticas e pelo fato de a Pesquisa CNT de Rodovias ser realizada, em sua maioria, no segundo semestre, período de estiagem no Ceará, quando os efeitos indiretos das chuvas, como crescimento da vegetação e desgaste da sinalização horizontal, são menos evidentes.

Quanto à geometria da via, observou-se a ausência de correlações consistentes com os índices pluviométricos, o que era esperado, uma vez que os elementos geométricos das rodovias estão associados principalmente a características de projeto e implantação, não sofrendo alterações diretas em função da variabilidade das chuvas no curto ou médio prazo. Dessa forma, a precipitação não se mostrou um fator relevante para explicar as variações observadas nesse indicador.

A análise do estado geral, que resulta da combinação entre pavimento, sinalização e geometria, apresentou comportamento intermediário, refletindo principalmente a influência da condição do pavimento, que se mostrou o componente mais sensível à ação da precipitação. Assim, as correlações observadas para o estado geral demonstram que a degradação funcional das rodovias cearenses associada às chuvas ocorre de forma indireta, sendo mediada principalmente pelo desempenho funcional do pavimento.

De modo geral, os resultados atendem aos objetivos propostos, ao demonstrar que a variabilidade pluviométrica possui impacto diferenciado sobre os distintos componentes avaliados, sendo mais relevante para a condição do pavimento e menos significativa para sinalização e geometria. Por fim, destaca-se que, apesar das limitações inerentes ao método visual e qualitativo da Pesquisa CNT de Rodovias, os achados contribuem para a compreensão do papel das chuvas na deterioração funcional da malha rodoviária do Ceará.

Recomenda-se que estudos futuros incorporem variáveis adicionais, como tráfego, temperatura, condições de drenagem e dados estruturais, bem como métodos quantitativos complementares, de modo a aprofundar as análises e subsidiar estratégias de manutenção e reabilitação, além da gerência de pavimentos rodoviários mais resilientes frente às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ASTM. **ASTM D6433-20: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- BERNTSEN, Geir; SAARENKETO, Timo. **Norwegian Public Roads Administration**, 2005.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2022.
- BISQUERRA, R. et al. **Introdução à estatística aplicada à educação**. Porto Alegre: Artmed, 2004.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Transporte Rodoviário: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 25 mai. 2025.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília: CNT, 2012–2024. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 02 out. 2025.
- CONRADO, D.; WERNECK, R. **Estatística aplicada à engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- DA SILVA, Djane Fonseca et al. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. **Dados de precipitação pluviométrica do estado do Ceará**. Fortaleza, 2025. Disponível em: <https://www.funceme.br>. Acesso em: 02 out. 2025.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. **Climatologia do Ceará**. Fortaleza: FUNCEME, 2020.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. **Boletim climatológico anual do Ceará**. Fortaleza: FUNCEME, 2023.
- GURJÃO, Nayara de Oliveira et al. **Avaliação do índice de condição da manutenção rodoviária em função de dados pluviométricos do Ceará**. 2020.
- HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

CALVIN, Katherine et al. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023.

LIMA, J. R. S. **Variabilidade climática e tendências pluviométricas no Nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Climatologia, Curitiba, v. 26, p. 1–18, 2020.

MARENGO, J. A. et al. **Climate change risks in Brazil: a synthesis of current knowledge**. Climate Research, Oldendorf, v. 88, p. 1–21, 2022.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2021.

NAZZAL, Munir D. et al. Evaluation of moisture damage in asphalt mixtures at macro-and nanoscales. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 12, p. 04021369, 2021.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

QIAO, Y. et al. **Climate change effects on pavement performance: a comprehensive review**. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Reston, v. 146, n. 2, p. 1–15, 2020.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. **The international road roughness experiment**. Washington, DC: World Bank, 1986.

SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads, and parking lots**. 2. ed. New York: Springer, 2005.

YE, Z. et al. **Mechanisms of asphalt pavement deterioration under coupled traffic and environmental effects**. Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 324, p. 126–141, 2022.

ZHANG, X.; WANG, Y.; LI, J.; et al. **Weathering aging resistance in seasonal frozen regions: A comparative study of SBS- and SBR-modified asphalt binders through rheological and morphological characterization**. Scientific Reports, v. 15, art. 98396, 2025.

ZHANG, Allen A. et al. **Intelligent pavement condition survey: overview of current researches and practices**. Journal of road engineering, v. 4, n. 3, p. 257-281, 2024.