UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

Thales da Silva Soares Pereira

Investigação dos Domínios Climáticos do território brasileiro e sua influência nas prescrições normativas acerca da durabilidade do concreto

Juiz de Fora
2026

Thales da Silva Soares Pereira

Investigação dos Domínios Climáticos do território brasileiro e sua influência nas prescrições normativas acerca da durabilidade do concreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Thales da Silva Soares.
Investigação dos Domínios Climáticos do território brasileiro e sua influência nas prescrições normativas acerca da durabilidade do concreto / Thales da Silva Soares Pereira. -- 2026.
228 f. : il.

Orientadora: Maria Teresa Gomes Barbosa
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2026.

1. Durabilidade das estruturas. 2. Agressividade ambiental. 3. Macroclima. 4. Dados meteorológicos. 5. Vida útil de projeto. I. Barbosa, Maria Teresa Gomes, orient. II. Título.

THALES DA SILVA SOARES PEREIRA

INTITULADA INVESTIGAÇÃO DOS DOMÍNIOS CLIMÁTICOS DO TERRITÓRIO BRASILEIRO E SUA INFLUÊNCIA NAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS ACERCA DA DURABILIDADE DO CONCRETO,

Dissertação apresentada ao PPG Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Ambiente Construído

Aprovada em 27 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) . Maria Teresa Gomes Barbosa - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof(a) Dr (a) . Paula de Oliveira Ribeiro - Membro Interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof (a) Dr (a) . Mônica Regina Garcez - Membro Externo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Juiz de Fora, 29/01/2026.

Documento assinado eletronicamente por **Maria Teresa Gomes Barbosa**, **Professor(a)**, em 12/05/2026, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Mônica Regina Garcez**, **Usuário Externo**, em 13/05/2026, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Paula de Oliveira Ribeiro**, **Professor(a)**, em 18/05/2026, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2847971** e o código CRC **97F688A9**.

À memória do Prof. Fábio de Oliveira Sanches, cuja sabedoria permanece como alicerce deste trabalho.

À Prof.ª. Maria Teresa Gomes Barbosa, mentora que plantou e nutriu a semente da pesquisa.

A meus pais, avó e irmãos, fundação do meu crescimento pessoal e acadêmico.

E a todos que forneceram o suporte e a resistência necessários para que este sonho se concretizasse.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, e acima de tudo, agradeço aO Senhor, Arquiteto e Engenheiro supremo de todas as coisas, cuja presença constante e orientação divina têm sido o alicerce desta jornada. Sua providência manifestou-se de formas extraordinárias e precisas: conduziu-me a pessoas que transformaram minha trajetória acadêmica, revelou oportunidades únicas de crescimento e iluminou caminhos em momentos decisivos. Nos instantes de maior incerteza, Sua sabedoria me guiou para encontrar respostas técnicas e os propósitos mais profundos de minha pesquisa e de minha própria essência como pesquisador.

À minha mãe, Leíse da Silva Soares Pereira, agradeço pelo amor incondicional e pela fortaleza emocional que sempre demonstrou. Sua capacidade de enxergar além das aparências e de oferecer apoio nos momentos mais desafiadores é essencial em cada etapa desta jornada.

Ao meu pai, Valdecir Soares Pereira, sou grato pela ética de trabalho incansável e pela determinação que me transmitiu desde cedo. Seus ensinamentos sobre responsabilidade e comprometimento formaram os pilares morais que sustentam minha vida acadêmica e todas as minhas decisões profissionais.

À minha avó, Ana Maria da Silva, agradeço pelo amor, companheirismo e pela sabedoria transmitida ao longo dos anos. Seus ensinamentos de vida, sua resiliência e seu apoio constante foram importantes para moldar meu caráter e minha busca pela excelência em tudo que faço, ainda que pareça algo inviável.

Aos meus irmãos, Víctor da Silva Soares Pereira e Dandara da Silva Soares Pereira, agradeço a cumplicidade singular que desenvolvemos. Seu apoio e sua capacidade de trazer leveza aos momentos mais intensos foram fundamentais nesta jornada.

A Emanuel, amigo e irmão em Cristo da IASD Juiz de Fora - Central, dedico um reconhecimento especial. Sua amizade é fonte de constante suporte espiritual e emocional, elementos essenciais para a superação dos desafios inerentes a esta jornada acadêmica. Adicionalmente, sua colaboração técnica demonstrou-se fundamental, especialmente quando os códigos de importação dos dados do INMET para o banco de dados do SQL *Server* 2022 apresentaram problemas. Essa assistência foi um ponto de virada que contribui diretamente para o avanço da etapa de análise desta pesquisa.

À professora Dra. Maria Teresa Gomes Barbosa, expresso minha mais profunda gratidão por sua orientação e mentoria inspiradora. Seu convite para integrar a iniciação científica em 2020 foi o catalisador de uma transformação profunda em minha trajetória acadêmica e profissional. Sua orientação precisa e dedicada me apresentou aos fundamentos dos materiais e da durabilidade, despertando em mim uma verdadeira paixão pela investigação científica. Seu apoio, desde as longas horas no laboratório até as apresentações nos congressos do IBRACON, da criação da Liga Acadêmica UFJFck às inúmeras oportunidades de crescimento acadêmico, moldou esta dissertação e minha identidade como pesquisador e profissional.

Ao professor Dr. Giuliano T. Novais, expresso minha sincera gratidão pela generosidade em compartilhar seus valiosos dados sobre os Domínios Climáticos brasileiros. Sua contribuição foi fundamental para enriquecer a base geográfica desta pesquisa, permitindo uma análise mais precisa e abrangente da influência climática na durabilidade do concreto armado e protendido no Brasil. Seu trabalho e disposição em colaborar com pesquisadores exemplificam o verdadeiro espírito da comunidade científica.

A João Paulo Soares de Oliveira, secretário do PROAC, dedico um agradecimento que ultrapassa as fronteiras profissionais. Sua presença em minha trajetória acadêmica estabeleceu uma fraternidade genuína que se fortalece diariamente. Seus conselhos foram decisivos para meu ingresso no mestrado e para minha evolução como pesquisador e ser humano.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), manifesto meu reconhecimento pelo apoio financeiro (Proc. Nº 88887.887947/2023-00), que viabilizou minha dedicação integral a esta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído (PROAC) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), agradeço pela estrutura excepcional e pelo ambiente acadêmico estimulante.

À Liga Acadêmica UFJFck, expresso minha gratidão pela oportunidade de participar desde sua concepção, enriquecendo significativamente minha formação acadêmica.

Esta pesquisa representa muito mais que uma contribuição acadêmica – materializa um compromisso profundo com a inovação e a sustentabilidade na construção civil. A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização deste trabalho, expresso minha gratidão.

Todo aquele, pois, que ouve estas minhas palavras e as pratica será comparado a um homem prudente que edificou a sua casa sobre a rocha. E caiu a chuva, vieram as enchentes, sopraram os ventos e deram com ímpeto contra aquela casa, que não caiu, porque fora edificada sobre a rocha. (Mateus 7:24-25, 2017).

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido é desafio central na engenharia civil, sobretudo em um país de dimensões continentais e diversidade climática como o Brasil. A norma ABNT NBR 6118:2023 classifica a agressividade ambiental por tipologias qualitativas de microambiente, critério que pode não capturar a variabilidade macroclimática do território. Diante dessa lacuna, esta dissertação investigou a agressividade macroclimática brasileira e sua relação com as prescrições normativas de durabilidade, com o objetivo de quantificá-la por meio de perfis geográficos por variável, espacializá-los por domínio climático e distinguir a influência natural da antrópica. A metodologia qualiquantitativa apoiou-se em dados de estações meteorológicas e de sensoriamento remoto, abrangendo variáveis termodinâmicas e químicas, cada uma classificada em três classes interpretativas – baixa/insignificante, moderada e alta/crítica – e espacializada em mapas individualizados. Os resultados revelaram que a agressividade não se distribui de forma homogênea nem acompanha diretamente as tipologias da norma, organizando-se em dois grupos de domínios: um com umidade relativa em classe alta/crítica, que fornece eletrólito à corrosão, e outro com temperatura em classe moderada, que acelera a difusão iônica. Conclui-se que o macroclima brasileiro é, em ampla medida, mais agressivo do que as tipologias normativas pressupõem, oferecendo subsídios técnicos para a revisão normativa futura.

Palavras-chave: Durabilidade das estruturas; Agressividade ambiental; Macroclima; Dados meteorológicos; Vida útil de projeto.

ABSTRACT

The durability of reinforced and prestressed concrete structures is a central challenge in civil engineering, particularly in a country of continental dimensions and climatic diversity such as Brazil. The Brazilian standard ABNT NBR 6118:2023 classifies environmental aggressiveness through qualitative micro-environment typologies, a criterion that may fail to capture the macroclimatic variability of the territory. Considering this gap, this dissertation investigated the macroclimatic aggressiveness of Brazil and its relationship with the normative durability prescriptions, aiming to quantify it through variable-specific geographic profiles, spatialize them by climatic domain, and distinguish natural from anthropogenic influence. The qualitative-quantitative methodology relied on data from meteorological stations and remote sensing, covering thermodynamic and chemical variables, each classified into three interpretative classes – low/negligible, moderate, and high/critical – and spatialized into individual maps. The results revealed that aggressiveness is not homogeneously distributed nor does it directly follow the normative typologies, organizing into two groups of domains: one with relative humidity in the high/critical class, which supplies the electrolyte for corrosion, and another with temperature in the moderate class, which accelerates ionic diffusion. It is concluded that the Brazilian macroclimate is largely more aggressive than the normative typologies assume, offering technical support for future normative revision.

Keywords: Structural durability; Environmental aggressiveness; Macroclimate; Meteorological data; Design service life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sílica ativa (a) e metacaulim (b) 30
Figura 2 – DCs brasileiros, segundo Novais (2019) 46
Figura 3 – Fluxograma metodológico 58
Figura 4 – Fluxograma de classificação dos cenários de calibração dos perfis geográficos 64
Figura 5 – Mapa do perfil geográfico da temperatura (T) 76
Figura 6 – Representação esquemática da zona de transição de interface (ZTI) 77
Figura 7 – Mapa do perfil geográfico da amplitude térmica (ΔT) 80
Figura 8 – Mapa do perfil geográfico da umidade relativa do ar (UR) 84
Figura 9 – Mapa do perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}) 89
Figura 10 – Concentração de CO_2 atmosférico no Observatório de Mauna Loa (1958–2025) 91
Figura 11 – Mapa do perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico ($[CO_2]$) 96
Figura 12 – Mapa do perfil geográfico da deposição de cloretos ($[Cl^-]$) 101
Figura 13 – Mapa do perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx]) 106
Figura 14 – Mapa do perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre ([SOx]) 112
Figura 15 – Mapa do perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico ($[SO_4^{2-}]$) 117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação da Agressividade Ambiental e riscos associados 35
Quadro 2 – c_{nom} em função da CAA para obras convencionais (Δc = 10 mm) 36
Quadro 3 – Parâmetros de qualidade do CA/CP em função da CAA 37
Quadro 4 – Limites de fissuração e proteção da armadura por CAA 38
Quadro 5 – Correspondência entre CAA e consumo de cimento 39
Quadro 6 – Parâmetros técnicos para concreto em condições específicas de exposição 40
Quadro 7 – Critérios técnicos para concreto exposto a ambientes contendo sulfatos 40
Quadro 8 – Limites recomendados de íons cloreto para proteção das armaduras no concreto 41
Quadro 9 – Requisitos para concreto sujeito a soluções aquosas agressivas 41
Quadro 10 – Hierarquia Climática de Novais (2019) e critérios de delimitação 49
Quadro 11 – Variáveis características dos DCs no Brasil 50
Quadro 12– Fonte dos dados por variável e subvariável geográfica 59
Quadro 13 – Significado das cores de classe do perfil geográfico 65
Quadro 14 – Critérios de definição dos perfis geográficos por variável (Cenários de Calibração) 71
Quadro 15 – Estatísticas descritivas das variáveis amostrais do Brasil para calibração dos perfis geográficos 72
Quadro 16 – Perfil geográfico da temperatura (T) 73
Quadro 17 – Estatísticas descritivas de T por DC 74
Quadro 18 – Perfil geográfico da amplitude térmica (ΔT) 78
Quadro 19 – Estatísticas descritivas de ΔT por DC 79
Quadro 20 – Perfil geográfico da umidade relativa do ar (UR) 82
Quadro 21 – Estatísticas descritivas de UR por DC 82
Quadro 22 – Classificação das chuvas quanto a intensidade, segundo *World Meteorological Organization* (*WMO*) 85
Quadro 23 – Perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}) 87
Quadro 24 – Estatísticas descritivas de i_{prec} por DC 87
Quadro 25 – Perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico ([CO_2]) 92

Quadro 26 – Estatísticas descritivas de [CO_2] por DC 93
Quadro 27 – Classificação da poluição por salinidade atmosférica por deposição de cloretos 97
Quadro 28 – Perfil geográfico da deposição de cloretos ([Cl^-]) 98
Quadro 29 – Estatísticas descritivas de [Cl^-] por DC 100
Quadro 30 – Perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx]) 103
Quadro 31 – Estatísticas descritivas de [NOx] por DC 104
Quadro 32 – Classificação de poluição por dióxido de enxofre (SO_2) 107
Quadro 33 – Perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre ([SOx]) 109
Quadro 34 – Estatísticas descritivas de [SOx] por DC 110
Quadro 35 – Perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico ([SO_4^{2-}]) 114
Quadro 36 – Estatísticas descritivas de [SO_4^{2-}] por DC 115
Quadro 37 – Perfil das variáveis geográficas por DC 118
Quadro 38 – Comparação entre as variáveis selecionadas dos perfis geográficos e a tipologia normativa da NBR 6118 (ABNT, 2023b) 120
Quadro 39 – Diretrizes propositivas para revisão da NBR 6118 (ABNT, 2023b) baseadas no macroclima brasileiro 125
Quadro 40 – Estatísticas descritivas das variáveis-amostras do Brasil para [Cl^-] por faixa de distância da orla marinha ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$) 221

LISTA DE CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO

Código 1 – Função *VBA* para unificar planilhas do INMET (2000-2024) 177
Código 2 – Consulta *SQL* para quantificação dos microestratos únicos (M) 180
Código 3 – Comando de exportação via *BCP* para arquivo *CSV* 183
Código 4 – Rotina *Python* para processamento de [CO_2]: leitura *NetCDF* e estatística global 204
Código 5 – Rotina *Python* para processamento de cloretos: soma de componentes e conversão de unidades 206
Código 6 – Rotina *Python* para processamento de NOx: leitura HDF5 e conversão física (*PBL*) 208
Código 7 – Rotina *Python* para processamento de SOx: leitura HDF5 e conversão física (*PBL*) 209
Código 8 – Rotina *Python* para processamento de sulfatos: leitura *NetCDF* e estatística global 210
Código 9 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de CO_2 por DC 213
Código 10 – Rotina *Python* para estatística zonal de deposição de cloretos por DC 214
Código 11 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de NOx por DC 215
Código 12 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de SOx por DC 217
Código 13 – Rotina *Python* para estatística zonal de deposição de sulfatos por DC 218
Código 14 – Rotina *Python* para quantificação espacial das faixas de distância da orla marinha por DC 220
Código 15 – Geração vetorial das faixas de distância da orla marinha (*buffers*) 223
Código 16 – Rotina *Python* para análise espacial exploratória de cloretos por faixas de distância da orla marinha 225
Código 17 – Rotina *Python* para geração dos mapas temáticos (perfis geográficos) 226
Código 18 – Rotina *Python* para geração exploratória dos mapas de distância da orla marinha 228

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	*American Concrete Institute*
ACV/LCCA	Análise de Ciclo de Vida e Custos
AIRS	*Atmospheric Infrared Sounder*
AIRS/Aqua L3 CLIMCAPS	*Atmospheric Infrared Sounder/Aqua Level 3 Community Long-term Infrared Microwave Combined Atmospheric Product System*
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BCP	*Bulk Copy Program*
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado (do inglês *Calcium Silicate Hydrate*)
C3A	aluminato tricálcico – $3CaO \cdot Al_2O_3$
CA	concreto armado
CA/CP	concreto armado e protendido
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CAAs	classes de agressividade ambiental
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEN	*Comité Européen de Normalisation*
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CP	concreto protendido
CRF	concreto reforçado com fibras
CSV	*Comma-Separated Values*
DC	Domínio Climático Brasileiro; Domínio Climático
DCs	Domínios Climáticos Brasileiros; Domínios Climáticos
DEF	formação tardia de etringita; *Delayed Ettringite Formation*
DU	*Dobson Units*; Unidades Dobson
ELS-D	estado-limite de serviço de descompressão
ELS-DP	estado-limite de serviço de descompressão parcial

ELS-F	estado-limite de serviço de formação de fissuras
ELS-W	estado-limite de serviço de abertura de fissuras
EPSG	*European Petroleum Survey Group*
ETA	estação de tratamento de água; estações de tratamento de água
ETE	estação de tratamento de esgoto; estações de tratamento de esgoto
ETp	evapotranspiração potencial
fib	*Fédération Internationale du Béton*
GES DISC	*Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*
GMAO	*Global Modeling and Assimilation Office*
GUID	*Globally Unique Identifier*
HDF-EOS5	*Hierarchical Data Format – Earth Observing System 5*
HNT	*Halloysite Nanotubes*; Nanotubos de Haloisita
IA	inteligência artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	*International Organization for Standardization*
LDH	*Layered Double Hydroxides*; Hidróxidos Duplos Lamelares
MAUP	*Modifiable Areal Unit Problem*; Efeito Modificável da Unidade de Área
MERRA-2	*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2*
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NetCDF	*Network Common Data Form*
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
NRMCA	*National Ready Mixed Concrete Association*
OAE	obra de arte especial; ponte; viaduto; túnel; passarela; bueiro; galeria; muro de arrimo; cortina atirantada; barragem; eclusa; dique; *pier*; quebra-mar; *dolphin*; cais; porto

OAEs	obras de arte especiais; pontes; viadutos; túneis; passarelas; bueiros; galerias; muros de arrimo; cortinas atirantadas; barragens; eclusas; diques; *piers*; quebra-mares; *dolpins*; cais; portos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OMI	*Ozone Monitoring Instrument*
OMNO2d	Produto diário de NO_2 do OMI/Aura, versão 003
OMSO2e	Produto diário de SO_2 do OMI/Aura, versão 003
ONU	Organização das Nações Unidas
PBL	Camada Limite Planetária; *Planetary Boundary Layer*
PIB	Produto Interno Bruto
QGIS	*Quantum GIS*
RAA	reação álcali-agregado
RAS	reação álcali-sílica; reação álcali-silicato
SEEG/OC	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPSS	"*IBM SPSS Statistics*"; *Statistical Package for the Social Sciences*
SQL	*Structured Query Language*; linguagem de consulta estruturada
T-SQL	*Transact-SQL*
TMMMF	Temperatura Média do Mês mais Frio
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UV	Ultravioleta; radiação ultravioleta
VBA	*Visual Basic for Applications*
VU	Vida Útil
VUP	Vida Útil de Projeto
VUP_m	vida útil mínima de projeto
WMO	*World Meteorological Organization*
ZTI	zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

Δc	Tolerância de execução para o cobrimento
$\Delta d_{orla,[Cl^-]}$	Faixa de distância da orla marinha
ΔT	Amplitude térmica máxima diária; amplitude térmica diária
Φ	Diâmetro das barras da armadura
Φ_n	Diâmetro equivalente de um feixe de barras
a/c	Razão entre massa de água e a massa de cimento; água/cimento
AA	Agentes agressivos
AIQ	Amplitude(s) interquartil(is); Intervalo interquartil
a_p	Distância da face do elemento estrutural à armadura de protensão mais próxima desta face
c	Concentração de reagentes do eletrodo
c_{min}	Espessura mínima do cobrimento para a armadura passiva/ativa
CV	Coeficiente de variação
$d_{orla,[Cl^-]}$	Distância da orla marinha
E_a	Energia de ativação
F	Constante de Faraday
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto (aos 28 dias de idade)
f_{ctk}	Resistência característica à tração do concreto (aos 28 dias de idade)
i_{corr}	Densidade de corrente de corrosão
i_{prec}	Intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária; intensidade pluviométrica
IQR	Método do intervalo interquartil; variável de cálculo do método do intervalo interquartil
k	Constante de taxa de reação
M	Número de microestratos únicos
n	Coeficiente estequiométrico de elétrons
n_f	Quantidade de barras no feixe
P_c	Concentração de SO_2
P_d	Taxa de deposição de SO_2
pH	Potencial hidrogeniônico

R	Constante dos gases
r_d	Raio da partícula seca
Rs	Radiação solar
S_d	Taxa de deposição de cloretos; taxa de deposição superficial de cloretos
T	Temperatura
UR	Umidade relativa do ar
w_k	Valor característico da abertura de fissuras
Y	Número de dias
$[Cl^-]$	Deposição total de íons cloreto; taxa de deposição total de íons cloreto
$[CO_2]$	Concentração de CO_2 atmosférico; concentração de dióxido de carbono atmosférico
[NOx]	Concentração de óxidos de nitrogênio
$[SO_4^{2-}]$	Deposição total de sulfato particulado atmosférico; taxa de deposição total de sulfatos; sulfatos particulados
[SOx]	Concentração de óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 OBJETIVOS 24
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 24
2 DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO/PROTENDIDO (CA/CP) 26
2.1 DURABILIDADE 26
2.2 PROTEÇÃO FÍSICA 29
2.3 PROTEÇÃO QUÍMICA 32
2.4 REQUISITOS DA NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA 34
3 DCs BRASILEIROS 44
3.1 INTRODUÇÃO AOS DOMÍNIOS 44
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DCs 48
3.2.1 Domínio Árido 50
3.2.2 Domínio Equatorial 51
3.2.3 Domínio Equatorial Ameno 52
3.2.4 Domínio Semiárido 53
3.2.5 Domínio Subtropical 54
3.2.6 Domínio Temperado 55
3.2.7 Domínio Tropical 56
3.2.8 Domínio Tropical Ameno 57
4 METODOLOGIA 58
4.1 DESENHO DA PESQUISA 58
4.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E DOCUMENTAL 59
4.3 COLETA E PREPARAÇÃO DE DADOS GEOGRÁFICOS 60
4.4 CONSTRUÇÃO DOS PERFIS GEOGRÁFICOS 61
4.4.1 Metodologia híbrida e cenários de calibração 61
4.4.2 Padronização dos perfis e definição das classes interpretativas 64
4.4.3 Especificidades metodológicas para variáveis geográficas químicas 65
4.4.4 Espacialização individual e leitura combinada dos perfis 66
4.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE GEOPROCESSAMENTO 67
4.6 COMPARAÇÃO COM A NORMA E SUBSÍDIOS PARA REVISÃO NORMATIVA 68

4.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO 68
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 70
5.1 PERFIS GEOGRÁFICOS POR VARIÁVEL 70
5.1.1 Perfil geográfico da temperatura 73
5.1.2 Perfil geográfico da umidade relativa do ar 80
5.1.3 Perfil geográfico da precipitação pluviométrica máxima diária 84
5.1.4 Perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico 89
5.1.5 Perfil geográfico da deposição de cloretos 96
5.1.6 Perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio 102
5.1.7 Perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre 106
5.1.8 Perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico 112
5.2 LEITURA COMBINADA DOS PERFIS GEOGRÁFICOS POR DC 117
5.3 COMPARAÇÃO COM A NORMA E SUBSÍDIOS PARA REVISÃO NORMATIVA 119
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 123
6.1 CONCLUSÃO DO TRABALHO 123
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 126
REFERÊNCIAS 127
APÊNDICE A – Descrição do conjunto populacional e fontes de dados 174
APÊNDICE B – Processamento de variáveis do INMET (T, UR, i_{prec}) 176
B.1 PADRONIZAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS ARQUIVOS BRUTOS 176
B.1.1 Características do algoritmo de padronização 177
B.2 PROCESSO DE AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA 178
B.3 EXPORTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE 182
B.3.1 Preparação das variáveis para importação 184
APÊNDICE C – Obtenção e processamento de variáveis de satélite ([CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}], [Cl^-]) 186
C.1 CONCENTRAÇÃO DE CO_2 ATMOSFÉRICO ([CO_2]) 186
C.2 CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO ([NOx]) 188
C.3 CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDOS DE ENXOFRE ([SOx]) 190
C.4 DEPOSIÇÃO TOTAL DE SULFATO PARTICULADO ATMOSFÉRICO ([SO_4^{2-}]) 192
C.5 DEPOSIÇÃO DE ÍONS CLORETO ([Cl^-]) 194

APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil) 197
D.1 IMPORTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS DADOS DO INMET (2025) 197
D.2 REVISÃO DAS PROPRIEDADES DAS VARIÁVEIS 199
D.3 CONTROLE DE QUALIDADE E INSPEÇÃO VISUAL DOS DADOS 200
D.4 AGREGAÇÃO TEMPORAL DE VARIÁVEIS DO INMET (T, UR, i_{prec} E, EM CARÁTER EXPLORATÓRIO, Rs) 200
D.5 PROCESSAMENTO GLOBAL DAS VARIÁVEIS DE SATÉLITE (*PYTHON*) 203
APÊNDICE E – Caracterização climática regionalizada (por DC) 211
E.1 SEGMENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO INMET (2025) (*SPSS (IBM, 2022)*) 211
E.2 SEGMENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SATÉLITE (*PYTHON* (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2025)) 212
E.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA 219
APÊNDICE F – Rotinas em *Python* para processamento espacial e geração cartográfica 222
F.1 GERAÇÃO VETORIAL DAS FAIXAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($d_{orla,[Cl^-]}$) 222
F.2 ANÁLISE ESPACIAL EXPLORATÓRIA DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS POR FAIXAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$) 224
F.3 GERAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS (PERFIS GEOGRÁFICOS) 225
F.4 GERAÇÃO EXPLORATÓRIA DOS MAPAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($d_{orla,[Cl^-]}$) 227

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido (CA/CP) é um desafio central na engenharia civil, especialmente em um país de dimensões continentais e diversidade climática como o Brasil (Barbosa *et al.*, 2022; Pereira, 2023). As normas técnicas brasileiras, como a NBR 6118 (ABNT, 2023b), estabelecem diretrizes para garantir a durabilidade, definindo parâmetros de proteção física e química.

Nesse contexto, são definidas classes de agressividade ambiental (CAAs) pela normalização brasileira (NBR 6118 (ABNT, 2023b)) que visam subsidiar os parâmetros mínimos de projeto de CA/CP, baseadas em critérios qualitativos, podendo não refletir integralmente a variabilidade climática intrarregional e interregional, como as diferenças de temperatura, umidade relativa, precipitação e concentração e deposição de agentes agressivos (Chess; Green, 2020; Kaewunruen *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Pereira; Branquinho; Barbosa, 2024). Tal fato pode levar a projetos estruturais subdimensionados ou superdimensionados, comprometendo a durabilidade, a segurança e a sustentabilidade das construções (Pellizzer *et al.*, 2020; Wally *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo principal analisar os macroclimas das diferentes regiões do território brasileiro considerando as variáveis geográficas dos Domínios Climáticos (DCs) [1] e o seu impacto nas prescrições da normalização brasileira.

Salienta-se que a durabilidade, como um dos “pilares” da construção civil, transcende a capacidade estrutural, representando a habilidade de resistir ao

[1] DCs (Domínios Climáticos): referem-se a regiões delimitadas por padrões climáticos homogêneos, caracterizadas por variáveis como temperatura, precipitação e umidade relativa, obtidos a partir de métodos científicos de classificação em escala regional (não global) (Novais, 2019; Novais; Machado, 2023b). Tais delimitações baseiam-se na análise de séries históricas de dados meteorológicos, fundamentando a definição de zonas com respostas térmicas e hídricas similares (Carpio *et al.*, 2015). Esses domínios são “[...] controlados pela TMMMF [Temperatura Média do Mês mais Frio], por sistemas atmosféricos, por atuações de anticiclones, frentes frias e pela possibilidade de formação de geada.” (Novais; Galvani, 2022, p. 5). A definição dos DCs possibilita a identificação precisa de restrições e potencialidades climáticas regionais, condicionando decisões sobre estratégias construtivas, eficiência energética e seleção de materiais, conforme evidenciado em estudos de mapeamento climático para projetos de edificações, planejamento urbano e análise da demanda energética (Carpio *et al.*, 2015; Xiong *et al.*, 2019).

desgaste imposto pelas intempéries e pela vida útil (VU) dos sistemas construtivos (Barbosa *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2022; Pereira, 2023).

A busca por esse “pilar” nas construções de CA/CP vai além do desempenho estrutural, alinhando-se também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2019a). Esta dissertação destaca-se particularmente em três ODS:

- ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura): Ao promover a construção de infraestruturas mais resilientes (ONU, 2019b).
- ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis): Adaptando as construções às condições climáticas brasileiras (ONU, 2019c).
- ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima): Incentivando a inovação no setor da construção civil (ONU, 2019e).

As conexões com os ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (ONU, 2019d) e 17 (Parcerias e Meios de Implementação) (ONU, 2019f) também serão contempladas, indiretamente, ao longo deste trabalho.

Normas e códigos técnicos aplicados ao projeto de estruturas na construção civil possuem, entre suas atribuições, a definição de requisitos para o controle de qualidade, critérios de produção e diretrizes para a correta utilização de materiais e componentes estruturais, com vistas à conformidade do desempenho funcional e à extensão da durabilidade das edificações, dentre as quais se destacam as estruturas de CA/CP (Mumberger; Tutikian; Bolina, 2022; Silva; Quissanga; Silva, 2022). Sendo assim, a NBR 6118 (ABNT, 2023b, p. 13) define a durabilidade como a “[...] capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.”.

Dado este aspecto, cada local (macroclima e/ou microclima) apresenta configurações singulares quanto ao risco ambiental fornecido à durabilidade do concreto, relevante em territórios de grande extensão, como o Brasil, no qual há grande diversidade climática – há oito DCs: (i) Árido, (ii) Equatorial, (iii) Equatorial Ameno, (iv) Semiárido, (v) Subtropical, (vi) Temperado [2], (vii) Tropical e (viii) Tropical

[2] Anteriormente o domínio Temperado era considerado como distinto do Subtropical Frio, que foi incorporado a ele. "Depois de fechar todas as hierarquias climáticas, ainda tive de fazer alguns ajustes e modificações. O antigo domínio Subtropical Frio, que era diferenciado do

Ameno (Pereira, 2023; Novais, 2019; Novais; Machado, 2023b). A adaptação das construções a esse mosaico climático é fundamental para a resiliência das infraestruturas frente aos eventos climáticos extremos e às mudanças nos padrões ambientais (ONU, 2019e).

Com a premissa de descrever os ambientes, a NBR 6118 (ABNT, 2023b) apresenta quatro CAAs baseadas no risco de deterioração, a saber, (CAA [3] I) insignificante, (CAA II) pequeno, (CAA III) grande e (CAA IV) elevado. O enquadramento do projeto do empreendimento, isto é, o CA/CP, em uma das classes é feito pelo projetista, utilizando como critério o tipo de região de alocação: rural, submersa, urbana, marinha, industrial ou sujeitas a respingos de maré (ABNT, 2023b). Além dessa abordagem, a norma (em sua seção 7.4.2, p. 18) também permite que ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade da estrutura sejam utilizados para estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos, proporcionando uma avaliação mais precisa e adaptada às condições particulares do projeto.

Entretanto, a avaliação da agressividade ambiental se torna dependente da interpretação do projetista sobre as condições de exposição da estrutura, o que pode introduzir subjetividade e imprecisão (Pereira; Barbosa; Soranço, 2023). Por exemplo, duas cidades classificadas genericamente como "urbanas" pela NBR 6118 (ABNT, 2023b) podem apresentar microclimas distintos, com diferentes níveis de poluição e umidade, resultando em mecanismos de deterioração do concreto distintos.

Além da diversidade climática natural dos DCs, a influência antrópica decorrente da ocupação do território modifica as condições de exposição locais. Ambientes urbanos densamente ocupados desenvolvem microclimas próprios, como o fenômeno das ilhas de calor, que podem resultar em temperaturas médias mais elevadas em comparação com áreas rurais circundantes (Amorim; Dubreuil; Amorim, 2021; Fernandes *et al.*, 2023; Pivetta, 2023). Essa alteração, por sua vez, pode influenciar a cinética das reações de deterioração do concreto, potencialmente

Temperado apenas pela sua localização mais próxima do Trópico, foi anexado definitivamente ao Temperado, pois os dois têm a mesma faixa de Temperatura Média do Mês Mais Frio (TMMMF), e a diferença agora fica por conta dos tipos onde estão inseridos." (Novais, 2023a, p. x)

[3] CAA (Classe de Agressividade Ambiental): classificação que caracteriza as condições de exposição da estrutura ou de suas partes ao ambiente em que se encontra, considerando as ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas (ABNT, 2023b).

acelerando processos como a carbonatação e reações expansivas (Liu; Chen; Yu, 2020; Xu *et al.*, 2022).

Espera-se que os resultados desta pesquisa forneçam subsídios para futuras revisões da NBR 6118 (ABNT, 2023b), promovendo uma abordagem mais precisa e regionalizada para o projeto de estruturas de CA/CP no Brasil. A incorporação de parâmetros climáticos mais detalhados nas prescrições normativas pode resultar em estruturas mais duráveis, seguras e sustentáveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em analisar quantitativamente a agressividade ambiental macroclimática do território brasileiro, a fim de fornecer subsídios complementares para futuras revisões das prescrições de durabilidade de estruturas de CA/CP da NBR 6118 (ABNT, 2023b).

Para o alcance do objetivo principal, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

i) Desenvolver perfis geográficos independentes para as variáveis geográficas termodinâmicas e químicas determinantes na degradação do concreto;
ii) Espacializar esses perfis por meio de mapas temáticos nacionais individuais, em articulação com os Domínios Climáticos brasileiros;
iii) Caracterizar o perfil geográfico macroclimático atual do Brasil, distinguindo a influência natural da antrópica, de modo a oferecer subsídios técnicos para a tomada de decisão em projetos de engenharia.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, organizados para proporcionar um aprofundamento lógico e sequencial na temática proposta.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do problema, a justificativa da pesquisa e os objetivos (geral e específicos) que norteiam o estudo, além desta organização estrutural.

O Capítulo 2 expõe a fundamentação teórica, abordando os conceitos de durabilidade das estruturas de CA/CP, os principais agentes agressivos ambientais (climáticos e antrópicos) e os parâmetros estabelecidos pela normalização brasileira vigente (NBR 6118 (ABNT, 2023b)).

O Capítulo 3 caracteriza os Domínios Climáticos (DCs) do território brasileiro, detalhando as variáveis termodinâmicas e químicas que compõem o escopo da pesquisa e sua relevância para a degradação do concreto.

O Capítulo 4 detalha a metodologia desenvolvida. Descreve-se a coleta e o processamento de dados (estações meteorológicas e sensoriamento remoto), a estruturação dos perfis geográficos independentes (variáveis geográficas termodinâmicas e químicas), os critérios de espacialização e as limitações inerentes à abordagem macroclimática.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e as discussões. Inclui os mapas temáticos individualizados por variável, a análise do perfil de agressividade macroclimática por DC e a avaliação da complementaridade desses dados em relação às Classes de Agressividade Ambiental (CAA) da norma, evidenciando as diferenças de escala de análise (macro versus micro).

Por fim, o Capítulo 6 consolida as conclusões da pesquisa, destacando os subsídios técnicos gerados para futuras atualizações normativas e sugerindo diretrizes para trabalhos futuros.

O documento é encerrado com as referências bibliográficas e os apêndices, que contêm o detalhamento dos códigos de programação, rotinas de geoprocessamento e dados estatísticos suplementares.

2 DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO/PROTENDIDO (CA/CP)

A durabilidade condiciona a capacidade das estruturas de CA/CP de suportarem, além dos esforços mecânicos, as influências ambientais que podem comprometer seu desempenho. Ela envolve a garantia de VU com bom desempenho frente a ataques causados por fatores físicos, químicos e biológicos (além da combinação de um ou mais desses), garantindo a longevidade e a segurança das construções (Raupach; Büttner, 2014; Barbosa *et al.*, 2022; ABNT, 2023b).

Neste capítulo, apresenta-se o tema da durabilidade para o CA/CP e as exigências normativas a ela associadas.

2.1 DURABILIDADE

O concreto, material amplamente empregado na construção civil, consiste em uma mistura de cimento, agregados e água, que, pelo processo de hidratação, forma uma matriz resistente, porém porosa, característica que o torna suscetível à penetração de agentes agressivos do ambiente, como água, gases e íons dissolvidos (Mehta; Monteiro, 2005; Irassar *et al.*, 2015; Chess; Green, 2020). Quando combinado com armaduras de aço (armadura passiva [4]), constitui o concreto armado (CA), que utiliza a resistência do aço para suportar esforços de tração e demais solicitações, ou o concreto protendido (CP), no qual cabos de aço (armadura ativa [5]) são tensionados para aumentar a capacidade estrutural, ambos amplamente utilizados em edificações e infraestruturas (Neville; Brooks; Cremonini, 2013; Cholfe; Bonilha, 2018; Korec *et al.*, 2023).

Entretanto, a porosidade do concreto facilita o ingresso de elementos como CO_2 e Cl^-, que atuam como vetores de degradação (Sales *et al.*, 2014; Bolina;

[4] Em estruturas de concreto, existem dois tipos principais de armaduras: passiva e ativa. A armadura passiva, utilizada no concreto armado (CA), é composta por barras de aço que não são tensionadas antes da concretagem, funcionando como um reforço que resiste às tensões conforme a estrutura é carregada (Cholfe; Bonilha, 2018; ABNT, 2023b).

[5] Armadura ativa: também conhecida como armadura de protensão, é característica do concreto protendido (CP) e é tensionada antes ou durante a concretagem, criando uma força compressiva no concreto que aumenta sua resistência e desempenho estrutural. O CP pode conter tanto armaduras ativas quanto passivas, combinando os benefícios de ambos os sistemas (Cholfe; Bonilha, 2018; ABNT, 2023b).

Tutikian; Helene, 2019). Por conseguinte, a durabilidade das estruturas de CA/CP torna-se um desafio técnico que exige a consideração das condições ambientais, as quais regulam a intensidade e a velocidade dos processos de degradação, particularmente em territórios de grande diversidade climática como o Brasil (Barbosa *et al.*, 2022; Araruna, 2023).

As estruturas de CA/CP estão sujeitas a processos de deterioração que, se não forem adequadamente considerados, podem levar à perda de funcionalidade e à necessidade de manutenção não planejada, comprometendo a integridade estrutural e aumentando os riscos de segurança (Chess; Green, 2020).

Sendo assim, a normalização brasileira enfatiza que:

> As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. (ABNT, 2023b, p. 15).

A NBR 12655 – “Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento” (ABNT, 2022a) também reforça que a durabilidade está vinculada às propriedades do concreto e à conformidade com os critérios de projeto estabelecidos.

Normas internacionais fornecem subsídios variados e complementares sobre a durabilidade das estruturas de concreto. O *American Concrete Institute* (*ACI*) define durabilidade como a "capacidade de uma estrutura ou elemento de resistir à deterioração que comprometa o desempenho ou limite a vida útil da estrutura no ambiente relevante considerado no projeto" (*ACI* 318-19, 2019, p. 37). A *Fédération Internationale du Béton* (*fib*), através do *fib* Model Code, a associa à "capacidade das estruturas, produtos ou materiais continuarem sendo úteis após um período prolongado de uso" (*fib*, 2010, p. 11) e destaca a importância de considerar influências ambientais durante o planejamento da VU, projeto e construção de uma estrutura. Essas influências podem ser físicas, e/ou químicas e/ou biológicas, variando desde o nível macro (afetando a estrutura como um todo) até o nível micro (influências localizadas) (*fib*, 2010).

O *Comité Européen de Normalisation* (*CEN*), através do *Eurocode 2*, enfatiza a necessidade de alcançar a VU de projeto das estruturas, propondo medidas específicas para proteger os elementos estruturais contra ações ambientais. Essas

medidas incluem a seleção criteriosa de materiais, detalhes construtivos, controle de qualidade, inspeções e verificações contínuas. Ademais, ressalta que a durabilidade de uma estrutura depende principalmente da espessura do cobrimento de concreto e da qualidade do concreto, especialmente se as larguras das fissuras forem limitadas às máximas características permitidas (*CEN*, 2004).

A importância do estudo da durabilidade baseia-se no fato de que, se inadequada, poderá acarretar custos elevados de manutenção e reparo. A exemplo disso, mencionam-se os custos de reparo e manutenção de fissuras em CA, que são cerca de 84 % a 125 % mais altos do que os custos de construção/m³ (Sidiq *et al.*, 2020; van der Bergh *et al.*, 2021). Esse cenário ilustra a necessidade de priorizar a durabilidade desde a fase de projeto, evitando futuros gastos exorbitantes com os serviços de manutenção (François; Laurens; Deby, 2018).

Somado aos impactos econômicos diretos, a durabilidade inadequada do CA/CP apresenta consequências ambientais. O processo frequente de manutenção e reparo consome grandes quantidades de recursos materiais e financeiros e gera emissões adicionais de carbono e resíduos de construção (François; Laurens; Deby, 2018). Em países industrializados, mais de 40 % de todos os investimentos na indústria da construção são destinados à manutenção e reparo/reforço de estruturas de concreto (Vladislavovic *et al.*, 2020).

A deterioração precoce das estruturas de CA/CP também possui implicações sociais, dado que a perda de funcionalidade de uma estrutura pode resultar em interrupções no uso, desalojamento de moradores e paralisação de serviços essenciais, afetando a qualidade de vida dos usuários (Daniyal; Akhtar, 2019). Nesse contexto, destaca-se a relevância de infraestruturas essenciais como as estações de tratamento de esgoto (ETE) e as estações de tratamento de água (ETA), cujas estruturas de concreto são frequentemente expostas a ambientes agressivos, incluindo alta umidade relativa e presença de agentes químicos, que aceleram processos de corrosão das armaduras (Xavier; Filgueiras, 2023).

Associado ao exposto, trata-se de um fator importante para a sustentabilidade das construções, pois está diretamente ligado à capacidade de uma estrutura de manter sua funcionalidade e segurança ao longo do tempo, com mínimo impacto ambiental. Em conformidade com as recomendações de uso racional dos recursos, a sustentabilidade na construção civil envolve o uso eficiente dos materiais durante a

construção e a minimização dos recursos necessários para a manutenção ao longo da VU da estrutura (Busse, 2023; Kapliński, 2023).

Os principais componentes que favorecem a durabilidade estrutural incluem a proteção física e química do CA/CP, bem como a qualidade do processo de construção, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023b). Esses elementos são relevantes para mitigar os diferentes mecanismos de degradação, como a ação de agentes químicos e climáticos.

A proteção física se refere à espessura de cobrimento adequada das armaduras para prevenir o ingresso de agentes agressivos, enquanto a proteção química envolve a utilização de misturas de concreto que minimizem a permeabilidade e maximizem a resistência aos ataques químicos (Keo *et al.*, 2022; Asmara, 2024). Ademais, a qualidade do processo construtivo reduz a probabilidade de falhas estruturais que potencializam patologias físicas, biológicas e químicas (*ACI*, 2019; ABNT, 2023a).

2.2 PROTEÇÃO FÍSICA

A proteção física do CA/CP condiciona sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo, e a espessura mínima do cobrimento das armaduras passiva e ativa (c_{min}) atua como barreira física (e química) contra a penetração de agentes agressivos, como cloretos e dióxido de carbono, que podem desencadear processos corrosivos. Conforme destacado na NBR 6118 (ABNT, 2023b, p. 18), "[...] a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento da armadura".

A eficácia do cobrimento na proteção das armaduras contra a ação de agentes agressivos está diretamente relacionada à sua espessura. Neville (2016) explica que o aumento da c_{min} proporciona uma barreira física efetiva, retardando a penetração desses agentes. Consequentemente, estruturas com valores de c_{min} maiores tendem a apresentar período mais prolongado até que esses agentes atinjam concentrações críticas na superfície das armaduras, desde que se empreguem concretos com resistência à compressão adequada, baixa razão a/c, consumo mínimo de cimento, processo de cura adequado e seleção criteriosa de materiais e formulação de mistura (Souto, 2024), conforme especificado pelas normas nacionais.

A execução correta do c_{min} é requisito para sua funcionalidade, e o processo de cura condiciona a qualidade do concreto superficial. Taylor (2014) ressalta a importância dos procedimentos de cura, especialmente nos primeiros 30 a 50 mm da superfície do CA/CP. Esta região, denominada *covercrete* (concreto de cobrimento), é responsável pela proteção e passivação das armaduras.

Outra prática favorável à qualidade do cobrimento é a seleção criteriosa dos materiais componentes do concreto. Misturas de alta densidade e a incorporação de adições minerais, como sílica ativa e metacaulim (Figura 1), podem reduzir a porosidade e aumentar a resistência à penetração de agentes agressivos. Para alcançar esse objetivo, são sugeridas três abordagens principais: definição de um limite máximo para a razão a/c, estabelecimento de uma resistência mínima e especificação de um consumo mínimo de cimento (Neville, 2016). Alinhado a essa perspectiva, Dutra (2023) observa que uma razão a/c não superior a 0,45 pode ser mais eficaz na redução da permeabilidade do que o uso de aditivos impermeabilizantes por cristalização, oferecendo a vantagem adicional de utilizar materiais já disponíveis nos canteiros de obras e potencialmente mais econômicos.

Figura 1 – Sílica ativa (a) e metacaulim (b)



Fonte: (a) e (b) – *Mikrosilika Trade* ([*s. d.*]).

O monitoramento da c_{min} é um processo contínuo que abrange desde a execução da estrutura até sua VU. Durante a construção, o uso de espaçadores assegura o posicionamento correto das armaduras e mantém o cobrimento conforme especificado em projeto (Palm *et al.*, 2020). A falta e/ou a insuficiência de indicações nos projetos estruturais sobre o posicionamento dos espaçadores pode comprometer a obtenção da c_{min} normatizada (Maran *et al.*, 2015).

Para verificar a adequação do cobrimento após a concretagem e durante a VU da estrutura, há metodologias não destrutivas baseadas em equipamentos de medição específicos, como o pacômetro – aparelho que emprega tecnologia de ondas eletromagnéticas de baixa frequência para detectar e localizar as armaduras no interior do concreto, permitindo estimar sua posição em relação à superfície (Raupach; Büttner, 2014; Pedroza, 2018).

Raupach e Büttner (2014) descrevem métodos magnéticos e indutivos para a detecção não destrutiva e aferição. Eles explicam que o método de campo alternado opera de maneira similar a um transformador de potência, em que a presença de materiais magnéticos próximos ao ímã de jugo – um componente magnético que concentra e direciona o fluxo magnético para aumentar a eficiência do campo gerado – influencia a corrente induzida na bobina receptora. *ACI* 228.2R-13 (*ACI*, 2013) complementa essa informação, destacando que a precisão da estimativa da profundidade do cobrimento pode ser afetada pelas dimensões e espaçamento das barras.

A aplicação de revestimentos protetores emerge como estratégia complementar de proteção física, em constante evolução, para oferecer proteção em ambientes agressivos (Merah, 2021). A eficácia desses produtos tem se tornado um critério decisivo na seleção entre as diversas opções disponíveis no mercado. Aguirre-Guerrero, Robayo-Salazar e Gutiérrez (2017) demonstraram a capacidade de revestimentos geopoliméricos híbridos de reduzir a permeabilidade a agentes agressivos e aumentar a resistividade elétrica do CA/CP, contribuindo para uma proteção mais eficiente.

Além dos revestimentos, outras estratégias de proteção física incluem a utilização de barreiras como membranas impermeáveis e a implementação de sistemas de drenagem para prevenir o acúmulo de água, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023b). Raupach e Büttner (2014) destacam a importância dessas medidas adicionais, especialmente em ambientes agressivos, como regiões costeiras, onde a exposição à água do mar pode acelerar os processos de corrosão.

As técnicas de proteção física, como as mencionadas anteriormente, demonstram seu desempenho em casos práticos na literatura. A título de exemplo, Possan *et al*. (2020) relataram um estudo de caso envolvendo uma construção paralisada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, em que a adoção de medidas de proteção, incluindo a proteção de armaduras expostas com

pasta de cimento e a impermeabilização de áreas críticas, representou um custo de apenas 1,4 % do valor total do investimento da obra. Esse baixo custo, em comparação com o investimento total, demonstra a viabilidade econômica da proteção física como estratégia para garantir a durabilidade das estruturas, mesmo em situações de paralisação das obras.

A proteção física das estruturas no Brasil deve levar em conta a diversidade climática do país, que abrange desde regiões equatoriais até zonas temperadas. A NBR 6118 (ABNT, 2023b) fornece diretrizes para classes de agressividade ambiental e cobrimentos mínimos, mas cabe aos projetistas adaptá-las às particularidades regionais. Palm *et al*. (2020) destacam que a norma permite reduções no cobrimento nominal para concretos de maior resistência e em projetos com controle rigoroso de execução. No entanto, eles apontam a falta de parâmetros claros para definir esse controle rigoroso, o que pode levar a interpretações variadas na especificação do cobrimento.

2.3 PROTEÇÃO QUÍMICA

A proteção química do CA/CP modifica a microestrutura e a composição química da pasta de cimento, reduzindo a permeabilidade e elevando as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (Neville, 2016).

A porosidade, principal determinante dessa permeabilidade, está ligada à capacidade do concreto de resistir à penetração de agentes agressivos. Concretos com baixa razão a/c e adequadamente curados apresentam uma rede de poros mais refinada e desconectada, dificultando o ingresso de substâncias nocivas como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono (Neville, 2016; Helene, 2022). Sharobim e Fouad (2022) verificaram que o aumento da razão a/c de 0,35 para 0,50 poderá aumentar em 100 % a profundidade de carbonatação, enquanto um aumento para 0,60 poderá aumentá-la em 218 %.

Para aperfeiçoar essa proteção, a indústria da construção tem desenvolvido e aplicado diversos tipos de aditivos químicos, que modificam as propriedades do CA/CP tanto no estado fresco quanto no endurecido. Entre os aditivos mais utilizados para aumentar a durabilidade do CA/CP, destacam-se os redutores de água, que

permitem a diminuição da razão a/c sem prejuízo da trabalhabilidade (Oliveira, 2016; IBI Brasil, 2021).

Além dos redutores de água, outros aditivos atuam na proteção química do CA/CP. Os incorporadores de ar, por exemplo, introduzem um sistema controlado de microbolhas de ar esféricas e desconectadas na matriz cimentícia; embora aumentem o volume total de vazios, essa porosidade intencional e distribuída é distinta da rede de poros capilares e aprimora a resistência aos ciclos de gelo-degelo, posto que as bolhas funcionam como câmaras de alívio para as tensões geradas pela expansão da água congelada. Por sua vez, os modificadores de viscosidade aumentam a coesão e reduzem a segregação do concreto, contribuindo para uma microestrutura mais homogênea (*Marketing* Tecnosil, 2017; ABNT, 2019). Aditivos específicos para redução da permeabilidade, como os cristalizantes, atuam formando compostos que bloqueiam os poros do concreto, tornando-o mais resistente à penetração de água e agentes agressivos (Polesello; Maus, 2020).

As adições minerais também contribuem para a proteção química. Materiais como a sílica ativa, a cinza volante e a escória granulada de alto-forno, quando utilizados em proporções adequadas, melhoram a microestrutura do concreto e sua resistência a ataques químicos (Cappellesso *et al.*, 2016; Neville, 2016). Essas adições atuam tanto por efeito físico, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento, quanto por efeito químico, por meio de reações pozolânicas que consomem o hidróxido de cálcio e formam produtos de hidratação adicionais (Neville, 2016).

A sílica ativa, por exemplo, é particularmente eficaz na redução da permeabilidade e no aumento da resistência a sulfatos e à penetração de cloretos. Já a cinza volante e a escória de alto-forno, além de melhorarem a trabalhabilidade do concreto fresco, contribuem para a redução do calor de hidratação e para o aumento da resistência mecânica em idades avançadas (Cappellesso *et al.*, 2016; Neville, 2016; Prakash *et al.*, 2021).

Em ambientes de elevada agressividade, como os industriais e marítimos, demandam-se estratégias mais específicas, incluindo o uso combinado de cimentos especiais, adições minerais, aditivos redutores de permeabilidade e revestimentos protetores (Bolzoni *et al.*, 2022; Sharobim; Fouad, 2022). No contexto brasileiro, a proteção química requer adaptação às condições locais, considerando fatores como temperatura, umidade relativa do ar e concentração de agentes agressivos (Pereira, 2023; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023). Frente às mudanças climáticas, a proteção

química ganha relevância adicional: Bastidas-Arteaga e Stewart (2015) verificaram que o aumento da classe de resistência do concreto é geralmente mais custo-efetivo do que o aumento da espessura de cobrimento em ambientes agressivos.

As inovações nesse campo têm ampliado as opções de proteção do CA/CP; desafios persistem, contudo, como a interação entre diferentes aditivos e adições minerais, a durabilidade a longo prazo dos tratamentos superficiais e o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis (Zunita; Kevin, 2022; Kermani; Khalatbari, 2024). Pesquisas futuras devem concentrar-se em mecanismos de resposta múltipla e na melhoria da eficiência de inibidores inteligentes, minimizando possíveis impactos negativos nas propriedades do concreto (Liu; Shi, 2024). Essa evolução, combinando aditivos, adições minerais, revestimentos superficiais e inibidores de corrosão avançados, pode contribuir para a durabilidade e sustentabilidade das estruturas de CA/CP.

2.4 REQUISITOS DA NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA

As normas técnicas se destacam na engenharia civil, estabelecendo diretrizes e requisitos para garantir a qualidade, segurança e durabilidade das estruturas. No contexto do CA/CP, a normalização brasileira tem evoluído de modo constante ao longo dos anos, refletindo o avanço do conhecimento técnico e as demandas crescentes por construções mais duráveis e sustentáveis (Borges, 2019; Pereira; Branquinho; Barbosa, 2024).

A conformidade com as normas técnicas é necessária para assegurar que as estruturas atendam aos requisitos de segurança e durabilidade ao longo de sua VU. Essa conformidade protege os usuários e contribui para a economia e sustentabilidade do setor da construção civil, reduzindo a necessidade de intervenções precoces e prolongando a VU das edificações (Mumberger; Tutikian; Bolina, 2022; ABNT, 2023b).

No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2023b) destaca-se como a principal norma que rege o projeto de estruturas de concreto. Além dela, outras normas brasileiras complementam o arcabouço normativo relacionado à durabilidade do CA/CP. Entre elas, destacam-se a NBR 12655 (ABNT, 2022a), que trata do preparo, controle e recebimento do concreto, a NBR 14931 (ABNT, 2023a), que aborda a execução de

estruturas de CA, CP e concreto reforçado com fibras (CRF), e a NBR 15575 (ABNT, 2013; ABNT, 2024), que estabelece requisitos de desempenho para edificações habitacionais.

Entre os principais requisitos fornecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023b), destacam-se a definição das CAAs – Quadro 1, que orientam a escolha dos materiais e o detalhamento das estruturas, e os critérios para o cobrimento mínimo das armaduras. Para garantir o cumprimento desse requisito, a norma ainda estabelece o conceito de cobrimento nominal (c_{nom}), que é o c_{min} acrescido de uma tolerância de execução (Δc), sendo Δc igual a 10 mm em obras convencionais, podendo ser reduzido para 5 mm em casos de controle rigoroso, conforme explicitado no projeto (Quadro 2).

As CAAs representam níveis crescentes de agressividade, de I a IV, e essa classificação orienta o projeto de estruturas duráveis ao determinar requisitos específicos de qualidade do concreto e de proteção das armaduras. Para os ambientes mais agressivos (Classes III e IV), a norma exige concretos com menor razão a/c e maior cobrimento das armaduras, visando aumentar a proteção contra a corrosão (ABNT, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

Quadro 1 – Classificação da Agressividade Ambiental e riscos associados

Classe de Agressividade Ambiental	**Agressividade**	**Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto**	**Risco de deterioração da estrutura**
I	Fraca	Rural, Submerso	Insignificante
II	Moderada	Urbano [a, b]	Pequeno
III	Forte	Marinho, Industrial [a, b]	Grande
IV	Muito forte	Industrial [a, c], Respingo de maré	Elevado

[a] Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

[b] Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

[c] Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023b).

Quadro 2 – c_{nom} em função da CAA para obras convencionais (Δc = 10 mm)

Tipo de estrutura [a, b]	**Componente ou elemento**	**CAA**			
		I	**II**	**III**	**IV** [e]
		c_{nom} (mm)			
CA	Laje [d]	20	25	35	45
	Viga [d]/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo [f]	30	30	40	50
CP [c]	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

[a] CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

[b] CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

[c] Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

[d] Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências deste Quadro podem ser substituídas pelas listadas abaixo, respeitado $c_{nom} \geq 15$ mm:

a) $c_{nom} \geq \Phi$ barra;

b) $c_{nom} \geq \Phi$ feixe = $\Phi_n = \Phi \sqrt{n_f}$;

c) $c_{nom} \geq 0{,}5\ \Phi$ bainha.

[e] Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da CAA IV.

[f] No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter $c_{nom} \geq$ 45 mm.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023b).

Como apresentado, a classificação das CAAs permite identificar os riscos de deterioração associados às condições ambientais e, consequentemente, adotar medidas de proteção adequadas. Essa abordagem contribui para a durabilidade das estruturas, alinhando o projeto às exigências específicas de cada ambiente. Além disso, a norma prevê a possibilidade de ajustes na classificação em situações de microclima ou regiões de clima seco, conforme as notas explicativas, demonstrando a necessidade de flexibilidade e adaptabilidade às condições locais (ABNT NBR 6118, 2023c).

A norma também estabelece limites para a razão a/c e resistência característica à compressão (f_{ck}) mínima do concreto (Quadro 3), fatores que influenciam diretamente na durabilidade das estruturas. Um ponto distintivo é a abordagem integrada, que vai além das propriedades do material, abrangendo também aspectos

de projeto e execução. Ela também estabelece requisitos para drenagem, formas arquitetônicas e estruturais, detalhamento das armaduras e controle de fissuração (Quadro 4) (ABNT NBR 6118, 2023c).

No que tange ao controle de fissuração, os limites estabelecidos para o CP (níveis 1, 2 e 3 – Quadro 4) são particularmente importantes, posto que a armadura de protensão (fios, cabos, cordoalhas), submetida a altas tensões, é especialmente vulnerável à corrosão caso seja exposta a agentes agressivos. Por conseguinte, os estados-limite de serviço mais restritivos (ELS-F, ELS-D, ELS-DP) e a exigência de proteção especial para ancoragens em CAAs III e IV visam assegurar a integridade do sistema de protensão frente ao risco de corrosão. A norma reconhece, assim, que a durabilidade resulta da interação de múltiplos fatores (ABNT NBR 6118, 2023c).

Quadro 3 – Parâmetros de qualidade do CA/CP em função da CAA

Concreto [a]	**Tipo** [b, c]	**CAA**			
		I	**II**	**III**	**IV**
Razão a/c em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto [d] – NBR 8953 (ABNT, 2015)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

[a] O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2022a).

[b] CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

[c] CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

[d] O sistema de classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015) organiza os concretos estruturais em classes de resistência, identificadas pela letra 'C' seguida de um número que representa o f_{ck} em MPa, medida em corpos de prova cilíndricos, e divididas em dois grupos: Grupo I (C20 a C50) e Grupo II (C55 a C100), conforme a resistência crescente.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023b).

Quadro 4 – Limites de fissuração e proteção da armadura por CAA

Tipo de concreto estrutural	Tipo de protensão	CAA	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço utilizada em projeto
Concreto simples	–	I a IV	Não há	–
CA	–	I	ELS-W $w_k \leq 0{,}4$ mm	Frequente
		II e III	ELS-W $w_k \leq 0{,}3$ mm	
		IV	ELS-W wk ≤ 0,2 mm	
CP nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração	I	ELS-W $w_k \leq 0{,}2$ mm	Frequente
	Pós-tração	I e II		
CP nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração	I e II	Verificar as duas condições abaixo:	
			ELS-F	Frequente
	Pós-tração	I a IV	ELS-D [a]	Quase Permanente
CP nível 3 (protensão completa)	Pré-tração	I a IV	Verificar as duas condições abaixo:	
			ELS-F	Rara
	Pós-tração	I a IV	ELS-D [a]	Frequente

Notas:

1. Para as CAAs III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.
2. No caso de pré-tração em estruturas de concreto pré-fabricado, devem ser atendidos os requisitos da NBR 9062 (ABNT, 2017).
3. ELS-W: estado-limite de serviço de abertura de fissuras é a condição que controla o tamanho máximo permitido para as fissuras.

   ELS-F: estado-limite de serviço de formação de fissuras é o ponto em que as primeiras fissuras começam a aparecer na superfície do concreto.

   ELS-D: estado-limite de serviço de descompressão é a condição na qual não há tensões de tração no concreto na seção transversal da peça protendida.

   ELS-DP: estado-limite de serviço de descompressão parcial é a situação em que se permite uma pequena tração no concreto, na região onde se inicia a armadura de protensão.
4. No projeto de lajes lisas e cogumelos protendidos, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as CAAs.

[a] A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm, onde a_p, em elementos de CP, é a distância entre a face do elemento estrutural e a borda da armadura de protensão mais próxima desta face.

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023b).

A NBR 12655 (ABNT, 2022a), por sua vez, complementa a NBR 6118 (ABNT, 2023b) ao detalhar os requisitos para o preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto, com foco na garantia da qualidade e durabilidade das estruturas (Seção 5.2). Esta norma explicita a necessidade de o projeto estrutural especificar os requisitos de durabilidade, incluindo a CAA adotada (Seção 4.2, alínea c), quantidade mínima de cimento (combinação dos Quadros 3 e 5), e estabelece critérios para a composição do concreto e a escolha dos materiais (Seção 5.1).

Quadro 5 – Correspondência entre CAA e consumo de cimento

Concreto	**Tipo**	**CAA**			
		I	**II**	**III**	**IV**
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto (kg/m³)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
CA	corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.				
CP	corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.				

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2022a).

Ademais, a NBR 12655 (ABNT, 2022a) define os requisitos mínimos para o concreto em condições especiais de exposição, como a presença de sulfatos ou cloretos (Quadros 6 e 7), e explicita os limites máximos de íons cloreto na mistura para a proteção das armaduras (Quadros 8 e 9). Contudo, cabe ressaltar que a norma carece de detalhamento sobre os métodos de avaliação da agressividade ambiental *in loco*, limitando-se a reproduzir as classes da NBR 6118 (ABNT, 2023b). Um diferencial desta norma é a exigência explícita de que o responsável pelo projeto estrutural especifique os requisitos de durabilidade, incluindo a CAA adotada (ABNT, 2022a).

Quadro 6 – Parâmetros técnicos para concreto em condições específicas de exposição

Condições de exposição	**Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal**	**Mínimo valor de f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa**
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2022a).

Quadro 7 – Critérios técnicos para concreto exposto a ambientes contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	**Sulfato solúvel em água (SO_4) presente no solo** **% em massa**	**Sulfato solúvel (SO_4) presente na água** **ppm**	**Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal [a]**	**Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)** **MPa**
Fraca	0,00 - 0,10	Ver Quadro 9	Conforme Quadro 3	Conforme Quadro 3
Moderada [b]	0,10 - 0,20	150 - 1500	0,50	35
Severa [c]	> 0,20	> 1500	0,45	40

[a] Baixa relação a/c ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

[b] A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO_4 seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

[c] Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2022a).

Quadro 8 – Limites recomendados de íons cloreto para proteção das armaduras no concreto

Condições de serviço da estrutura	**Teor máximo de íons cloreto (Cl^-) no concreto** **% sobre a massa de cimento**
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2022a).

Quadro 9 – Requisitos para concreto sujeito a soluções aquosas agressivas

Condições de exposição	**pH [a] (NBR 16937-7 (ABNT, 2021f))**	**CO_2 agressivo mg/L (NBR 16937-5 (ABNT, 2021d))**	**Íon magnésio mg/L (NBR 16937-3 (ABNT, 2021b))**	**Íon amônia mg/L (NBR 16937-2 (ABNT, 2021a))**	**Resíduo sólido mg/L (NBR 16937-4 (ABNT, 2021c))**	**Sulfatos ppm (NBR 16937-6 (ABNT, 2021e))**	**Máxima relação a/c [a]**	**Mínimo f_{ck} MPa**
Fraca	7 - 6	< 30	< 100	< 100	> 150	< 150	Conforme Quadro 3	Conforme Quadro 3
Moderada	6 - 5,5	30 - 45	150 - 200	100 - 150	150 - 50	150 - 1500	0,50	35
Severa	< 5,5	> 45	> 200	> 150	< 50	> 1500	0,45	40
[a]	Propriedade adimensional.							
NOTA	Este Quadro não é exaustivo e, para casos em que as soluções aquosas apresentem movimentação, temperatura elevada, maior mobilidade iônica, valores de pH diferentes ou outros, recomenda-se consultar a literatura técnica aplicável aceita pela comunidade tecno científica internacional, como as constantes na Bibliografia da NBR 12655 (ABNT, 2022a).							

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2022a).

A NBR 14931 (ABNT, 2023a), que trata da execução de estruturas de concreto, aborda aspectos para a durabilidade que estão relacionados ao processo construtivo. A norma estabelece requisitos para o lançamento, adensamento e cura do concreto, bem como para o posicionamento e proteção das armaduras durante a execução. Um ponto de destaque é a ênfase na importância da cura adequada para o desenvolvimento das propriedades do concreto e, consequentemente, para sua durabilidade.

Embora a NBR 14931 (ABNT, 2023a) mencione a execução de estruturas com fibras, cabe notar que, mesmo na NBR 16935 (ABNT, 2021g), que trata especificamente do CRF, os mecanismos específicos de degradação ou corrosão associados aos diferentes tipos de fibras (metálicas, poliméricas, naturais) e sua influência na durabilidade a longo prazo sob diferentes condições de agressividade ambiental representam um campo que pode demandar detalhamento adicional em normas específicas ou revisões futuras, visto que o foco principal da NBR 6118 (ABNT, 2023b) recai sobre o CA/CP com armaduras convencionais.

No contexto da durabilidade, a NBR 15575 (ABNT, 2013; ABNT, 2024) introduz uma abordagem baseada em desempenho, estabelecendo requisitos mínimos de VU para os diversos sistemas que compõem uma edificação. Para o sistema estrutural, a norma define uma vida útil mínima de projeto (VUP_m) de 50 anos, o que impacta diretamente nas especificações de durabilidade do CA/CP. Um diferencial desta norma é a exigência de elaboração de um Manual de Uso, Operação e Manutenção, que deve incluir informações específicas sobre a manutenção preventiva da estrutura (ABNT, 2024; Pereira; Branquinho; Barbosa, 2024).

Cabe mencionar, rapidamente, casos especiais como concreto pré-moldado (NBR 9062) e pontes e viadutos (NBR 7187). A NBR 9062 (ABNT, 2017) enfatiza o controle rigoroso na fabricação de elementos pré-moldados, estabelecendo critérios para cobrimento da armadura, qualidade do CA/CP e detalhamento das ligações, considerando as particularidades do processo de fabricação e montagem. Por sua vez, a NBR 7187 (ABNT, 2021h) fornece requisitos adicionais para pontes e viadutos, exigindo sistemas de drenagem eficientes e detalhamento cuidadoso de juntas e aparelhos de apoio. Contudo, em relação às CAAs, a NBR 7187 (ABNT, 2021h) não apresenta uma classificação distinta da NBR 6118 (ABNT, 2023b), mas reforça a necessidade de considerar o risco de deterioração inerente a esses tipos de

estruturas, usualmente expostas a condições agressivas como umidade, cloretos (em regiões litorâneas) e ciclos de gelo-degelo (em regiões de serra).

As normas brasileiras, em geral, apresentam requisitos de durabilidade alinhados com normas internacionais de referência, como o *Eurocode* 2 (*CEN*, 2004) e o *ACI* 318-19 (*ACI*, 2019). No entanto, consideram as particularidades do ambiente e das práticas construtivas nacionais. Por exemplo, a classificação de agressividade ambiental na NBR 6118 (ABNT, 2023b) é adaptada às condições geográficas típicas do Brasil, segundo Mumberger, Tutikian e Bolina (2022). Um aspecto comum a todas é a ênfase na importância da manutenção preventiva. As normas reconhecem que, mesmo com um projeto adequado e uma execução cuidadosa, a durabilidade só pode ser assegurada com a realização de inspeções periódicas e intervenções de manutenção ao longo da VU da estrutura, conforme NBR 6118 e NBR 15575-1 (ABNT, 2023b; ABNT, 2024).

Outro aspecto relevante é a interconexão entre as diferentes normas que visa garantir uma coerência nas exigências de durabilidade em todas as etapas do processo construtivo (Pereira; Branquinho; Barbosa, 2024).

A evolução das normas reflete o compromisso do setor com estruturas mais duráveis e sustentáveis, abordando aspectos de materiais, projeto, execução e manutenção, contribuindo assim para a qualidade e longevidade das edificações brasileiras (Barbosa *et al.*, 2022; ABNT, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023; Pereira; Branquinho; Barbosa, 2024).

3 DCs BRASILEIROS

A compreensão dos DCs condiciona o estudo da durabilidade do CA/CP, uma vez que as condições ambientais exercem influência direta sobre o desempenho e a VU. A variabilidade climática no Brasil, caracterizada por diferentes regimes de temperatura, precipitações e umidade, acarreta desafios específicos à construção civil, especialmente no que tange à proteção e manutenção das estruturas de CA/CP (Barbosa *et al.*, 2022; Pereira, 2023; Novais; Machado, 2023b).

Nesse contexto, o estudo de cada um dos domínios oferece subsídios para a análise da agressividade ambiental e suas implicações nas prescrições normativas para o CA/CP, permitindo uma abordagem mais precisa e regionalizada das estratégias de projeto e execução de obras.

A evolução das classificações climáticas no Brasil espelha o avanço do conhecimento científico e a necessidade crescente de entender as nuances climáticas em um país de dimensões continentais. Desde as primeiras propostas, como as de Morize em 1889 e 1922 (Sant'Anna Neto, 2001) e Delgado de Carvalho em 1917 (Carvalho, 1917), até as abordagens mais recentes, como a de Nimer em 1972 (Nimer, 1979), há um refinamento contínuo na caracterização dos climas brasileiros (Sant'Anna Neto, 2001; Nascimento; Luiz; Oliveira, 2023). Esse desenvolvimento resulta em sistemas de classificação mais complexos e detalhados, que incorporam elementos climáticos tradicionais, dinâmica atmosférica e a interação entre o clima e os fatores geográficos locais (Nascimento; Luiz; Oliveira, 2023).

3.1 INTRODUÇÃO AOS DOMÍNIOS

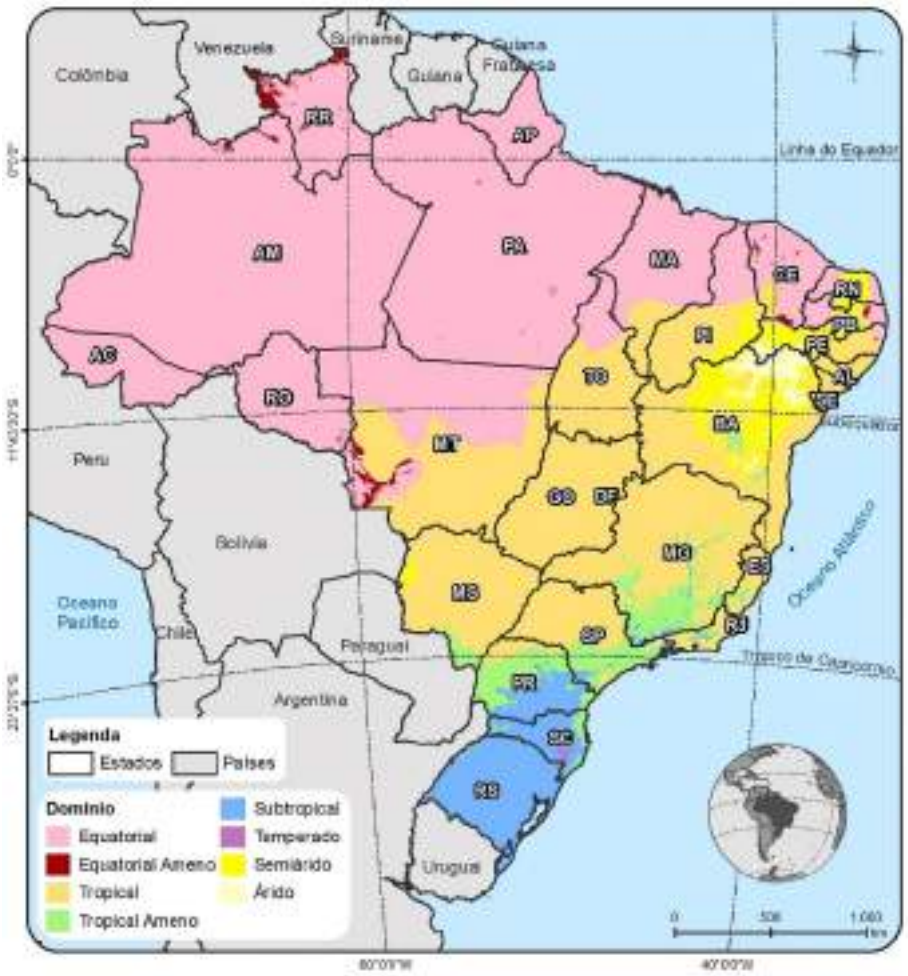
Os DCs representam unidades espaciais caracterizadas por padrões climáticos relativamente homogêneos, resultantes da interação entre fatores astronômicos, atmosféricos e geográficos. No contexto brasileiro, a compreensão desses domínios é necessária para o planejamento ambiental, econômico e, no caso específico deste estudo, para a análise da durabilidade do CA/CP em diferentes regiões do país. A importância deles reside na sua capacidade de sintetizar as principais características climáticas de uma região, fornecendo subsídios para a análise de riscos ambientais e

para o desenvolvimento de estratégias de mitigação (Novais, 2019; Barbosa *et al.*, 2022; Pereira, 2023).

O sistema de classificação climática proposto por Novais (2019) apresenta um nível de detalhamento que se destaca de abordagens anteriores, como as de Morize (Sant'Anna Neto, 2001), Delgado de Carvalho (Carvalho, 1917), Köppen (1936) e Nimer (1979), além de ser mais atual. Estruturado em 8 níveis hierárquicos, ele abrange desde as Zonas Climáticas e Climas Zonais, influenciados por fatores astronômicos, até os Domínios, Subdomínios e Tipos Climáticos, os quais refletem variações climáticas em escala regional (detalhes em "3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DC"). Essa metodologia permite uma análise climática mais precisa e minuciosa, contribuindo para uma compreensão aprimorada da variabilidade climática no território brasileiro (Novais; Galvani, 2022; Fialho *et al.*, 2023; Novais; Machado, 2023b, 2023a).

Segundo essa proposta, há 8 DCs no Brasil: Árido, Equatorial, Equatorial Ameno, Semiárido, Subtropical, Temperado, Tropical e Tropical Ameno (mapa ilustrativo dessa distribuição, como o apresentado por Novais e Machado (2023b), está na Figura 2). Essa diversidade climática reflete a complexidade geográfica e atmosférica do país, cobrindo desde regiões de altas precipitações e temperaturas elevadas constantes a áreas caracterizadas por escassez hídrica e grandes amplitudes térmicas (Novais; Machado, 2023b).

Figura 2 – DCs brasileiros, segundo Novais (2019)



Fonte: Novais; Machado (2023b).
Nota: Figura aprimorada com IA para melhor qualidade visual.

A distribuição espacial desses domínios no território brasileiro revela padrões complexos e zonas de transição que refletem a interação entre fatores geográficos e atmosféricos, como latitude, altitude, continentalidade e sistemas atmosféricos. O domínio Equatorial domina a região Norte, enquanto o Tropical se estende pelo Centro-Oeste, parte do Sudeste e litoral nordestino. O Subtropical abrange grande parte da região Sul e áreas elevadas do Sudeste; os domínios Semiárido e Árido concentram-se no interior do Nordeste, com ocorrências isoladas em outras regiões; e os domínios Equatorial Ameno, Tropical Ameno e Temperado ocorrem em áreas de maior altitude, criando enclaves climáticos [6] dentro de domínios mais amplos, como evidencia o mapa da Figura 2 (Fialho *et al.*, 2023; Novais; Machado, 2023b).

[6] Enclaves climáticos: referem-se a áreas com características climáticas distintas que se destacam em relação à região geográfica circundante. Em outras palavras, são "ilhas" de

As zonas de transição entre eles demandam atenção especial, pois representam áreas de grande complexidade e dinamismo climático. Essas regiões de interface frequentemente apresentam características mistas, combinando elementos de dois ou mais domínios adjacentes. Por exemplo, a transição entre os domínios Tropical e Subtropical no Sudeste do Brasil cria condições climáticas únicas, com influências tanto de sistemas tropicais quanto de frentes frias de origem polar (Novais, 2019; Novais; Machado, 2023b). Essas zonas de transição são particularmente sensíveis a mudanças climáticas e podem servir como indicadores precoces de alterações nos padrões climáticos regionais.

A importância dos domínios para o estudo da durabilidade do CA/CP transcende a caracterização ambiental, oferecendo o embasamento para a análise de riscos e o desenvolvimento de estratégias de mitigação (Luo; Wang; Niu, 2013; Pereira, 2023). As variações de temperatura, umidade relativa e precipitações entre os diferentes domínios influenciam diretamente processos como a carbonatação, a corrosão de armaduras e a degradação do concreto por agentes químicos (Benítez *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2025). Compreender essas variações permite o desenvolvimento de soluções de engenharia mais adequadas e específicas para cada região, contribuindo para o aumento da VU estrutural e o melhor aproveitamento de recursos (Benítez *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2022; Pereira, 2023).

Nóbrega, Farias e Santos (2015) observaram uma tendência de aumento nos padrões pluviométricos em grande parte do estado de Pernambuco, com chuvas cada vez mais concentradas em poucos dias ao longo do ano, o que pode acelerar os processos de deterioração do CA/CP e exige reavaliação contínua das estratégias de projeto e manutenção (Borges *et al.*, 2014; Nóbrega; Santiago, 2016).

A aplicação da classificação climática proposta por Novais (2019) oferece uma oportunidade para o aprimoramento das análises de durabilidade do CA/CP no Brasil. A identificação de 119 unidades climáticas no território nacional, considerando até a quinta hierarquia (tipos climáticos), permite uma caracterização mais precisa das condições ambientais em escala sub-regional (Novais; Machado, 2023b; Fialho *et al.*, 2023).

---

condições climáticas específicas inseridas em um contexto mais amplo de variabilidade climática (Araújo; Machado; Souza, 2019; Novais; Machado, 2023b).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DCs

A compreensão dos DCs requer uma análise minuciosa dos diversos fatores que influenciam sua formação e distribuição em todo o Brasil. A complexidade do clima no Brasil deriva da interação de elementos geográficos, atmosféricos e oceânicos, que se combinam de formas distintas nas diversas regiões do país.

A latitude, por exemplo, condiciona a distribuição da insolação, influenciando diretamente os padrões de temperatura e precipitação (Gobo; Bibiano; Galvani, 2019; Novais, 2019). A altitude, por sua vez, modifica as condições térmicas locais, criando microclimas e zonas de transição entre DCs (Jung *et al.*, 2019). A maritimidade e a continentalidade afetam a amplitude térmica (ΔT) e os regimes pluviométricos, enquanto as massas de ar e as correntes marítimas atuam como agentes dinâmicos na circulação atmosférica regional (Rodrigues, 2020; Novais; Machado, 2023b).

A Hierarquia Climática, que se refere à organização dos elementos climáticos em diferentes níveis de generalização e detalhe, adotada nesta dissertação, é composta por 8 níveis hierárquicos, cada um correspondendo a uma escala específica de análise climática. As categorias estão apresentadas no Quadro 10, junto com os critérios utilizados em sua delimitação (Fialho *et al.*, 2023; Novais; Machado, 2023b). Os DCs se encontram no terceiro nível hierárquico.

Quadro 10 – Hierarquia Climática de Novais (2019) e critérios de delimitação

Ordem	Taxonomia	Critérios de delimitação
1	Zona Climática	Posição latitudinal (altura solar)
2	Clima Zonal	O critério de divisão é a TMMMF [a]
3	Domínios (DCs)	Sistemas atmosféricos, além da variável: TMMMF
4	Subdomínios	Quantidade de meses secos (Precipitação < Evapotranspiração Potencial)
5	Tipos	Fatores Geográficos (Relevo e Vegetação)
6	Subtipos	Unidade geomorfológica
7	Mesoclimas	Feições Geográficas [b] e antrópicas [c] (que interferem no fluxo energético)
8	Topoclimas	Vertentes do relevo [d]
[a]	TMMMF (Temperatura Média do Mês Mais Frio): é definida como a média aritmética das temperaturas, coletadas tanto durante o dia quanto à noite, no mês do ano em que os valores médios são os mais baixos (Köppen, 1936; Barry; Chorley, 2003; Novais, 2019). É um dado que orienta a classificação de climas e a compreensão da distribuição térmica em diferentes regiões, sendo útil tanto para estudos geográficos quanto para projetos de engenharia civil, em que a temperatura mínima pode influenciar a durabilidade de materiais e o comportamento de estruturas (Cecconello; Tutikian, 2012; Fialho *et al.*, 2023).	
[b]	Elementos naturais da paisagem (relevo, vegetação, corpos d'água, solos) que influenciam os padrões climáticos locais, modificando temperatura, umidade e ventos (Fialho *et al.*, 2023).	
[c]	Elementos da paisagem resultantes da ação humana (urbanização, desmatamento, indústrias) que alteram os padrões climáticos naturais, criando microclimas específicos (Fialho *et al.*, 2023).	
[d]	Superfícies inclinadas do terreno (encostas) que, devido à sua orientação (exposição solar, direção dos ventos) e declividade, influenciam a incidência solar, a temperatura, a umidade e a circulação dos ventos, criando topoclimas distintos (Fialho *et al.*, 2023).	

Fonte: Adaptado de Fialho *et al.* (2023).

A apresentação da Hierarquia Climática (Fialho *et al.*, 2023) no Quadro 10 explicita a natureza multiescalar dos controles climáticos que atuam sobre o território brasileiro, indo além da mera descrição de uma estrutura de classificação. Compreender que os DCs são influenciados tanto por fatores de larga escala, como a radiação solar e os sistemas atmosféricos, quanto por elementos regionais e locais, como o relevo e a vegetação, é necessário para a análise da durabilidade do CA/CP. Essa perspectiva integrada permite identificar os principais agentes de deterioração em cada DC e propor estratégias de mitigação mais eficazes.

O Quadro 11 consolida as principais características de cada DC, detalhadas a seguir (Barbosa *et al.*, 2022; Novais; Machado, 2023b; Novais, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

Quadro 11 – Variáveis características dos DCs no Brasil

Domínio	Principais variáveis climáticas			
	T média anual (°C)	TMMMF (°C)	Precipitação média anual (mm)	Evapotranspiração potencial (ETp) [a] média anual (mm)
Árido	26,1	23,5	451	1487
Equatorial	26,0	25,1	2117	1454
Equatorial Ameno	22,9	21,5	1870	1124
Semiárido	25,8	23,5	615	1465
Subtropical	18,3	13,1	1809	877
Temperado	13,6	9,3	2164	697
Tropical	24,6	22,3	1328	1323
Tropical Ameno	20,6	16,8	1609	970

[a] ETp (Evapotranspiração potencial): representa a quantidade máxima de água que poderia ser perdida para a atmosfera por evaporação e transpiração, caso houvesse água disponível sem limitações. Quando a ETp supera a precipitação durante todo o ano, como no Semiárido, isso resulta em um ambiente constantemente seco, com vegetação adaptada à escassez de água e desafios para a agricultura. A ETp é influenciada principalmente por fatores como temperatura (T), umidade relativa do ar (UR), insolação e velocidade do vento (Sousa; Moura, 2022).

Fonte: Adaptado de Novais (2023b).

3.2.1 **Domínio Árido**

O domínio Árido, o mais recentemente identificado no território brasileiro, ocupa uma área de aproximadamente 100.596 km² (Novais, 2023b), abrangendo os estados Alagoas (AL), Bahia (BA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE). É caracterizado por condições climáticas extremas, com precipitação anual inferior a 500 mm e ETp excedendo a precipitação em todos os meses do ano (Novais; Machado, 2023b). A TMMMF varia entre 18,7 °C e 27,6 °C, ocorrendo tipicamente em julho. A precipitação anual é baixa, variando de 325 mm a 499 mm, com longos períodos de estiagem. A vegetação é predominantemente xerófita [7], adaptada às condições de extrema aridez (Novais, 2023b).

No contexto econômico, a escassez hídrica impõe desafios a esse DC. No entanto, áreas com acesso à irrigação, como o polo Petrolina-Juazeiro, destacam-se na fruticultura de exportação (Lacerda; Lacerda, 2004; Araújo; Belchior; Viegas, 2016).

[7] Conjunto de plantas adaptadas a ambientes com pouca disponibilidade de água, como regiões áridas e semiáridas, caracterizadas por folhas pequenas ou espessas, raízes profundas e outros mecanismos que ajudam a reduzir a perda de água e possibilitam a sobrevivência em condições de seca prolongada (Seddon, 1974; Fairbridge, 1997).

Essa atividade, embora importante para a economia local, pode levar a alterações no uso e ocupação do solo, com desmatamento para a expansão das áreas cultivadas (Gestão ambiental na agropecuária, 2007; SEEG/OC, 2024).

A decomposição da matéria orgânica resultante do desmatamento e o uso de maquinário agrícola elevam localmente a concentração de CO_2 e NOx na atmosfera. Embora não sejam variáveis climáticas, esses agentes antrópicos, quando combinados com as altas temperaturas locais, aceleram a degradação química do concreto (Pereira, 2023; SEEG/OC, 2024). Além disso, a irrigação intensiva pode elevar a umidade do solo e a concentração de sais, aumentando o risco de corrosão das armaduras e ataque por sulfatos (Mohanavelu; Naganna; Al-Ansari, 2021).

Para o CA/CP, a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar impõe severos ciclos de secagem e retração térmica, acelerando processos de deterioração física. A presença de sais no solo em algumas áreas aumenta o risco de ataques químicos (Barbosa *et al.*, 2022; Novais; Machado, 2023b; Novais, 2023b; Pereira, 2023).

3.2.2 **Domínio Equatorial**

O domínio Equatorial, predominante na região Norte do Brasil, abrange uma área de 4.685.742 km², nos estados Acre (AC), Amapá (AP), Amazonas (AM), Ceará (CE), Maranhão (MA), Mato Grosso (MT), Paraíba (PB), Pará (PA), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), Rondônia (RO), Roraima (RR) e Tocantins (TO); é caracterizado por temperaturas elevadas e constantes ao longo do ano. A Temperatura Média no Mês Mais Frio (TMMMF) neste domínio varia entre 22,5 °C e 28,2 °C, enquanto a precipitação média anual apresenta grande variabilidade, oscilando de 500 mm a mais de 4.500 mm em algumas localidades (Novais; Machado, 2023b). Essa diversidade pluviométrica resulta em subdomínios que variam de úmidos a secos, influenciando diretamente a vegetação e o uso do solo na região.

O relevo é composto por planícies aluviais, planaltos residuais e depressões, contribuindo para a formação de microclimas diversos. A cobertura vegetal predominante é a Floresta Amazônica, embora áreas extensas tenham sido convertidas para atividades agropecuárias nas últimas décadas. As condições termodinâmicas deste domínio, caracterizadas pela interação contínua entre alta

umidade relativa e temperaturas elevadas, criam um ambiente propício à aceleração da cinética das reações químicas de degradação. Para o CA/CP, esse macroclima atua como um catalisador natural, reduzindo o tempo de iniciação e propagação de ataques por agentes agressivos, exigindo parâmetros de projeto mais rigorosos para garantir a VU (Novais, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

3.2.3 **Domínio Equatorial Ameno**

Nas áreas mais elevadas da região equatorial brasileira, encontra-se o domínio Equatorial Ameno, cobrindo cerca de 61.057 km² do território nacional – abrange Amazonas (AM), Ceará (CE), Mato Grosso (MT), Paraíba (PB), Pará (PA), Pernambuco (PE), Rondônia (RO) e Roraima (RR) (Amapá (AP) e Rio Grande do Norte (RN) são abrangidos, porém, em extensão desprezível, não sendo visíveis fora de programas de geoprocessamento, podendo ser classificados como polígonos espúrios [8]).

Destaca-se por apresentar um clima mais fresco em comparação com as regiões circundantes, devido à sua topografia elevada. Nele, as temperaturas são mais brandas, com a TMMMF oscilando entre 18 °C e 22,5 °C. Um aspecto característico deste domínio é sua elevada pluviosidade. Em certos locais, como nas encostas da Serra do Imeri no Amazonas, os índices anuais podem alcançar 5.960 mm (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023b).

O cenário geográfico é dominado por formações como o Planalto das Guianas e as Serras do Tumucumaque, além de outras elevações espalhadas pela Amazônia e Nordeste (Novais, 2023b). Essa diversidade topográfica propicia o desenvolvimento de uma variedade de ecossistemas, desde florestas densas na Amazônia até manchas de Mata Atlântica e Cerrado nas serras nordestinas. Do ponto de vista da

[8] Polígonos espúrios (*sliver polygons*): no contexto de geoprocessamento e análise espacial, referem-se a pequenas áreas ou fragmentos residuais resultantes de operações de sobreposição, recorte ou intersecção de geometrias vetoriais, que não possuem significância prática ou representativa para a análise em questão (Barbosa *et al.*, 2007; Delafontaine *et al.*, 2009; Esri, 2026). Esses polígonos geralmente surgem devido a imprecisões na delimitação de feições, diferenças de escala entre bases cartográficas, ou artefatos computacionais durante operações espaciais automatizadas, apresentando dimensões desprezíveis que não alteram a interpretação dos resultados (Sae-Jung; Chen; Phuong, 2008; Delafontaine *et al.*, 2009; Kratochvílová; Cajthaml, 2025; Esri, 2026).

engenharia civil, essas condições ambientais peculiares – com temperaturas mais amenas e alta umidade – podem impactar de forma específica a durabilidade do CA/CP, especialmente no que tange à lixiviação e erosão do concreto (Novais, 2023b; Pereira, 2023).

3.2.4 **Domínio Semiárido**

O Semiárido brasileiro ocupa cerca de 277.599 km², estendendo-se pelos estados de Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), Rio de Janeiro (RJ) e Sergipe (SE). A característica definidora deste domínio é a evapotranspiração potencial (ETp) superior à precipitação em todos os meses do ano (Novais; Machado, 2023b).

A TMMMF varia entre 18 °C e 27,8 °C, ocorrendo geralmente em julho. A precipitação anual é baixa, variando de 500 mm a 1.030 mm, com distribuição fortemente irregular ao longo do ano. A vegetação predominante é a Caatinga, adaptada às condições de escassez hídrica (Novais, 2023b).

O domínio enfrenta desafios devido à escassez de água, condição que impõe severas restrições às atividades agrícolas, com exceção de áreas que dispõem de infraestrutura de irrigação, como o Vale do São Francisco (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023b). Nessas, a fruticultura irrigada se destaca, permitindo o cultivo de espécies como manga, uva, melão e melancia, impulsionando a economia regional (Fonseca, 2022; Baiardi; Ribeiro, 2023).

Em contraste, a pecuária extensiva e a agricultura de sequeiro, atividades tradicionais, dependem das limitadas e irregulares precipitações, resultando em menor produtividade e maior vulnerabilidade socioeconômica (Mesquita, 2016; Hernández-Bernal, 2018; Maia *et al.*, 2018). As elevadas temperaturas e as baixas taxas de umidade relativa aceleram processos de retração e fissuração do CA/CP, facilitando o ingresso de agentes agressivos. Além disso, a presença de sais no solo em algumas áreas pode levar ao ataque por sulfatos (Barbosa *et al.*, 2022; Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023b; Pereira, 2023; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

3.2.5 **Domínio Subtropical**

Esse domínio abrange uma área de aproximadamente 447.507 km², estendendo-se além do Trópico de Capricórnio em direção norte-nordeste, contemplando os estados da Bahia (BA), Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS), Rio de Janeiro (RJ), Santa Catarina (SC) e São Paulo (SP) (Amazonas (AM) é abrangido, porém, em extensão desprezível, não sendo visível fora de programas de geoprocessamento, podendo ser classificado como polígono espúrio). Caracteriza-se por temperaturas mais amenas, com a TMMMF variando entre 10 °C e 15 °C, geralmente ocorrendo em julho. A precipitação apresenta distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, com médias anuais entre 1200 mm e 3400 mm, sendo as encostas da Serra do Mar em São Paulo as áreas mais chuvosas (Novais; Machado, 2023b).

Economicamente, esse domínio é de grande importância para o Brasil, abrigando regiões de intensa atividade agrícola, com destaque para a produção de grãos, frutas temperadas e vinicultura (Fonseca, 2022; Novais, 2023b; Possani *et al.*, 2024). A indústria também é proeminente, especialmente nos estados do Sul e em São Paulo. O turismo nas regiões serranas e litorâneas, abrangendo atividades como ecoturismo, turismo de aventura (trilhas, *rafting*, *canopy*), turismo náutico, enoturismo [9] e turismo cultural, representa uma atividade econômica relevante para diversos municípios deste domínio, com potencial para geração de renda e empregos (Novais, 2023b).

Em contrapartida, a concentração de empreendimentos turísticos e o aumento da circulação de veículos podem intensificar a emissão de poluentes atmosféricos, além de promover a impermeabilização do solo e a alteração de padrões de drenagem (Carvalho; Oliveira, 2014; Bernardes, 2018; Martins, 2023; Pereira, 2023). Tais alterações, por sua vez, podem impactar a taxa de carbonatação e a concentração de

[9] Enoturismo: segmento do turismo que envolve a visitação a regiões produtoras de vinho e outros produtos derivados da uva, com foco na experiência gastronômica, cultural e paisagística associada à vitivinicultura (Binfare; Galvão; Castro, 2016). Caracteriza-se por atividades como visitas a vinícolas e adegas, degustações de vinhos, experiências gastronômicas com harmonizações, e imersão na cultura e paisagens das regiões vinícolas, como exemplificado em áreas como a Serra Gaúcha e o Vale dos Vinhedos no Rio Grande do Sul (Valduga; Minasse, 2018). É uma modalidade que integra aspectos de turismo rural, gastronômico e cultural, promovendo o desenvolvimento econômico e a valorização do patrimônio cultural e natural das regiões produtoras (Box Brazil, 2024).

íons cloreto em áreas urbanas e costeiras, modificando as condições de exposição das estruturas de CA/CP e exigindo adaptações nas estratégias de projeto e manutenção (Silvestro; Romano; Molin, 2020; Barbosa *et al.*, 2022; Helene, 2022).

O relevo é diversificado, incluindo planícies costeiras, serras e planaltos interiores. A vegetação original, composta principalmente por Mata Atlântica e Araucárias, sofreu extensiva modificação devido à urbanização e atividades agrícolas (Ribeiro *et al.*, 2009; Carvalho, 2012). Para as estruturas de CA/CP, as condições climáticas apresentam desafios únicos: a ocorrência de geadas e a amplitude térmica mais acentuada podem afetar a durabilidade do concreto, exigindo considerações especiais no projeto e na manutenção de estruturas, especialmente em relação a ciclos de congelamento e descongelamento em algumas regiões (Barbosa *et al.*, 2022; Novais, 2023b; Pereira, 2023; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

3.2.6 **Domínio Temperado**

No território brasileiro, o domínio Temperado ocupa uma área relativamente pequena, de 4.309 km². Localiza-se principalmente nos estados de Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) (Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG), Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP) são abrangidos, porém, em extensão desprezível, não sendo visíveis fora de programas de geoprocessamento, podendo ser classificados como polígonos espúrios), ultrapassando o trópico meridional nas áreas mais altas do relevo do Sudeste, acima de 1.800 metros de altitude. A TMMMF neste DC é a mais baixa do Brasil, ficando abaixo de 10 °C, com registros chegando a 5,7 °C no Pico das Agulhas Negras (MG/RJ) (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023b).

A precipitação é bem distribuída ao longo do ano, com médias anuais variando de 1.450 mm no Caparaó (Minas Gerais) a 3.300 mm nos Aparados da Serra (Rio Grande do Sul). Um fenômeno característico é a ocorrência de geadas semanais do final do outono ao início da primavera, com precipitação anual de neve na Região Sul (Novais, 2023b).

Economicamente, apresenta uma diversidade de atividades, incluindo o turismo de inverno e a produção agrícola. A fruticultura de clima frio, com destaque para a produção de maçã, é uma importante fonte de renda em áreas como São Joaquim (Santa Catarina) (Novais, 2023b). Além disso, a silvicultura, com o cultivo de

pinus e eucalipto, contribui para a economia regional (Oliveira, 2013; Silva; Sposito; Santana, 2020). A produção de erva-mate e a pecuária complementam o cenário econômico, explorando os recursos naturais da região (Silva; Sposito; Santana, 2020; Lisboa, 2023).

A vegetação típica inclui a Mata de Araucária e os campos de altitude, embora muito modificados pela ação humana (Novais, 2023b). Para o CA/CP, este domínio também apresenta desafios relacionados às baixas temperaturas e à alta umidade. Os ciclos de congelamento e descongelamento podem causar danos às estruturas de concreto, exigindo técnicas especiais de projeto e construção. Além disso, na primavera-verão, pode aumentar o risco de saturação do concreto e consequente corrosão das armaduras (Barbosa *et al.*, 2022; Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

3.2.7 **Domínio Tropical**

Abrange uma área de 2.676.283 km², sendo o segundo maior do Brasil. Estende-se pelos estados Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Distrito Federal (DF), Espírito Santo (ES), Goiás (GO), Maranhão (MA), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), Rio de Janeiro (RJ), Sergipe (SE), São Paulo (SP) e Tocantins (TO) (Pará (PA) e Rondônia (RO) são abrangidos, porém, em extensão desprezível, não sendo visíveis fora de programas de geoprocessamento, podendo ser classificados como polígonos espúrios).

Esse domínio caracteriza-se por uma marcante sazonalidade pluviométrica, com períodos sazonais [10] secos e úmidos bem definidos (Novais, 2023b). A TMMMF varia entre 18 °C e 27,5 °C, ocorrendo geralmente em julho, com exceções em algumas regiões (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023a). A precipitação média anual apresenta grande variabilidade, de 506 mm no interior do Nordeste a 2.901 mm em Mato Grosso do Sul (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023a).

O relevo é diversificado, incluindo planícies costeiras, planaltos interiores e depressões, influenciando os padrões de precipitações e temperaturas e criando

[10] Períodos sazonais: refere-se às estações do ano (primavera, verão, outono e inverno).

microclimas distintos (Novais, 2023b). A vegetação original varia do Cerrado à Mata Atlântica, embora grandes áreas tenham sido convertidas para agricultura e pecuária. As condições climáticas apresentam desafios específicos à durabilidade do CA/CP, uma vez que a alternância entre períodos secos e úmidos pode acelerar processos de deterioração como a carbonatação durante a estação seca e a corrosão de armaduras na estação chuvosa, exigindo estratégias de projeto e manutenção adaptadas a essas variações sazonais (Barbosa *et al.*, 2022; Pereira, 2023).

3.2.8 **Domínio Tropical Ameno**

Com uma extensão de 343.761 km², o domínio Tropical Ameno se distribui pelos estados Bahia (BA), Espírito Santo (ES), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS), Rio de Janeiro (RJ), Santa Catarina (SC) e São Paulo (SP) (Amazonas (AM), Goiás (GO) e Roraima (RR) são abrangidos, porém, em extensão desprezível, não sendo visíveis fora de programas de geoprocessamento, podendo ser classificados como polígonos espúrios). A TMMMF situa-se entre 15 °C e 17,9 °C, ocorrendo predominantemente em julho. A precipitação varia de menos de 600 mm na Chapada Diamantina a mais de 5.800 mm na Serra do Imeri (Amazonas) (Novais, 2023b; Novais; Machado, 2023a).

O cenário geográfico é marcado por relevos acidentados e altitudes elevadas, fatores determinantes para as temperaturas mais amenas em comparação com as áreas circundantes. A vegetação predominante é a Mata Atlântica, embora grande parte tenha sido substituída por áreas urbanas e agrícolas (Barbosa *et al.*, 2022; Novais, 2023b). Abriga importantes centros urbanos, incluindo São Paulo e sua região metropolitana.

Para o CA/CP, as condições ambientais específicas deste domínio, como a combinação de temperaturas mais baixas e umidade relativa elevada em algumas regiões, podem influenciar de maneira particular os processos de degradação, especialmente em relação à carbonatação e ao ataque por cloretos em áreas costeiras (Barbosa *et al.*, 2022; Novais, 2023b; Pereira; Barbosa; Soranço, 2023).

4 METODOLOGIA

Este capítulo detalha os procedimentos metodológicos adotados para analisar a agressividade ambiental dos DCs do território brasileiro e sua relação com as prescrições normativas para o CA/CP. A abordagem metodológica combina revisão bibliográfica, coleta e processamento de dados geográficos e análise qualiquantitativa, sendo estruturada em quatro fases complementares. A Figura 3 apresenta o fluxograma estrutural que sintetiza essas quatro fases de execução da pesquisa.

Figura 3 – Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 DESENHO DA PESQUISA

A pesquisa é concebida como um estudo exploratório e descritivo, utilizando uma abordagem mista (qualitativa e quantitativa). O *design* é estruturado em quatro fases principais: (i) revisão bibliográfica/documental (Gil, 2022); (ii) coleta de dados climáticos e ambientais (INMET e sensoriamento remoto); (iii) desenvolvimento dos

perfis geográficos, segregados conceitualmente durante o tratamento em dois agrupamentos (variáveis termodinâmicas e variáveis químicas), e espacialização cartográfica individual, e (iv) avaliação da complementaridade entre as prescrições normativas vigentes e a agressividade macroclimática.

A primeira fase foca na revisão da literatura sobre a durabilidade do CA/CP e a influência das condições climáticas, bem como na investigação dos DCs (Novais, 2019, 2023b). A segunda fase engloba a coleta e o processamento de dados climáticos e ambientais de fontes oficiais – Quadro 12. A terceira fase concentra-se no desenvolvimento dos perfis e na espacialização cartográfica dos resultados, servindo como base para a etapa subsequente. Por fim, a quarta fase correlaciona as classes de agressividade da normalização brasileira (NBR 6118 (ABNT, 2023b)) com a agressividade macroclimática real mapeada, utilizando o Método de Equivalência Categórica.

Quadro 12 – Fonte dos dados por variável e subvariável geográfica

Variável/Amostra	**Fonte dos dados**
Temperatura – T	Estações meteorológicas (INMET, 2025)
Amplitude térmica máxima diária – ΔT [a]	Estações meteorológicas (INMET, 2025)
Umidade relativa do ar – UR	Estações meteorológicas (INMET, 2025)
Intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária – i_{prec}	Estações meteorológicas (INMET, 2025)
Concentração de CO_2 atmosférico – $[CO_2]$	Satélite artificial (Barnet, 2021)
Deposição total de íons cloreto – $[Cl^-]$	Satélite artificial (GMAO, 2015)
Deposição total de sulfato particulado atmosférico – $[SO_4^{2-}]$	Satélite artificial (GMAO, 2015)
Concentração de óxidos de nitrogênio – [NOx]	Satélite artificial (Krotkov et al., 2013)
Concentração de óxidos de enxofre – [SOx]	Satélite artificial (Li; Krotkov; Leonard, 2012)
[a] Subvariável, componente de T.	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo adota uma perspectiva interdisciplinar, integrando conhecimentos da engenharia civil, climatologia, estatística e geociências. Esta abordagem permite uma análise abrangente da interação entre as variáveis geográficas e a durabilidade no contexto brasileiro.

4.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E DOCUMENTAL

A pesquisa bibliográfica e documental é conduzida de forma integrativa (Younas; Shahzad; Inayat, 2022; Cronin; George, 2023), abrangendo publicações nacionais e internacionais e normas técnicas, para as quais considera-se, preferencialmente, a versão mais recente em vigor, porém, não se restringindo a elas. As principais fontes de consulta incluem o Portal de Periódicos da CAPES (CAPES, [*s. d.*]), SciELO Brasil (SciELO, 2022), *ScienceDirect* (Elsevier, [*s. d.*]), Google Acadêmico (Google LLC, [*s. d.*]), além de acervos físicos e digitais (UFJF, [*s. d.*]) da Universidade Federal de Juiz de Fora e do autor.

A pesquisa documental foca nas publicações normativas pertinentes à durabilidade do CA/CP (*ACI*, 1993; *ACI*, 2000; *fib*, 2010; *ISO*, 2012; ABNT, 2013; ABNT, 2015; *ACI*, 2016; ABNT, 2017; *ACI*, 2019; ABNT, 2019; ABNT, 2021a; ABNT, 2021b; ABNT, 2021c; ABNT, 2021d; ABNT, 2021e; ABNT, 2021f; ABNT, 2021g; ABNT, 2021h; ABNT, 2022b; ABNT, 2023b; ABNT, 2023a; ABNT, 2024). Esta etapa é necessária para estabelecer o panorama atual das prescrições normativas brasileiras e avaliar a complementaridade entre a abordagem normativa vigente e o perfil macroclimático observado.

A revisão bibliográfica aborda temas como mecanismos de deterioração do CA/CP, influência de variáveis geográficas na durabilidade, classificação climática do Brasil, e métodos de análise de agressividade ambiental. Esta etapa fornece a base teórica para a definição das variáveis geográficas relevantes e para a interpretação dos resultados obtidos nas fases subsequentes da pesquisa, sendo necessária a fundamentação dos perfis geográficos para cada variável.

4.3 COLETA E PREPARAÇÃO DE DADOS GEOGRÁFICOS

A coleta e preparação de dados geográficos é realizada de forma sistemática, abrangendo múltiplas fontes e variáveis relevantes para a durabilidade do CA/CP. Para evitar o mascaramento de dados e respeitar a natureza física dos fenômenos, as variáveis foram segregadas conceitualmente em dois agrupamentos durante o processamento: variáveis termodinâmicas (temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec})) e variáveis químicas (concentração de dióxido de carbono atmosférico ($[CO_2]$), deposição total de

íons cloreto ([Cl^-]), deposição total de sulfato particulado atmosférico ([SO_4^{2-}]) e concentrações de óxidos de nitrogênio e enxofre ([NOx] e [SOx]).

A metodologia de obtenção e processamento dos dados é estruturada em etapas, conforme descrito a seguir:

i) Descrição do conjunto populacional e fonte de dados (vide “APÊNDICE A – Descrição do conjunto populacional e fontes de dados”);
ii) Processamento dos dados obtidos do INMET (vide “APÊNDICE B – Processamento de variáveis do INMET (T, UR, i_{prec})”);
iii) Processamento dos dados de satélite (vide “APÊNDICE C – Obtenção e processamento de variáveis de satélite ([CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}], [Cl^-])”);
iv) Análise estatística para calibração dos perfis (vide “APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil)”);
v) Montagem dos perfis geográficos: desenvolvimento de perfis quantitativos de manifestações de variáveis geográficas que atuam na durabilidade do CA/CP, com intervalos numéricos e representação qualitativa através de cores (Verde, Amarela, Vermelha) para cada variável geográfica, baseadas em revisão de literatura científica, normas técnicas e análise estatística de dados agregados;
vi) Estatísticas descritivas para a realidade brasileira: coleta, processamento e análise de dados geográficos específicos do território brasileiro, organizados por domínio climático, para caracterizar quantitativamente as condições reais de exposição do CA/CP (vide detalhes em “APÊNDICE E – Caracterização climática regionalizada (por DC)”).

4.4 CONSTRUÇÃO DOS PERFIS GEOGRÁFICOS

A construção dos perfis geográficos constitui a etapa de síntese entre os dados empiricamente observados no Brasil e o conhecimento científico consolidado na literatura, resultando em ferramentas quantitativas para a avaliação da agressividade ambiental. Esta seção detalha a metodologia híbrida adotada, a estrutura dos perfis, a integração das variáveis e a leitura transversal dos perfis de agressividade.

4.4.1 **Metodologia híbrida e cenários de calibração**

Os perfis geográficos são desenvolvidos para avaliar o risco geral de deterioração, considerando a sobreposição de múltiplos mecanismos patológicos (carbonatação, corrosão por cloretos, reação álcali-agregado (RAA), fissuração térmica, lixiviação, entre outros), e não para uma manifestação patológica específica, permitindo uma avaliação mais abrangente e realista da agressividade ambiental.

A construção dos perfis para as variáveis segue uma metodologia híbrida, que combina a revisão da literatura científica e normativa com a análise estatística dos dados geográficos coletados. Essa abordagem é adotada para garantir que os perfis sejam simultaneamente embasados em conhecimento consolidado e calibrados para a realidade climática brasileira. Esse processo segue as seguintes etapas:

i) Pesquisa bibliográfica: para cada variável geográfica, realiza-se uma busca na literatura científica (artigos de periódicos revisados por pares, anais de congressos, teses e dissertações) e em normas técnicas para identificar limites quantitativos (*thresholds*) que correlacionam valores da variável com o início ou a aceleração de mecanismos de deterioração do CA/CP. A pesquisa foca em valores específicos citados como críticos para processos como lixiviação, fissuração térmica, carbonatação, corrosão, RAA etc.

ii) Análise estatística dos dados geográficos: paralelamente, os dados agregados (conforme descrito no “APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil)”) são submetidos a análises estatísticas descritivas no *IBM SPSS Statistics* (IBM, 2022). Para cada variável, calculam-se medidas de tendência central (média, mediana), dispersão (desvio padrão, mínimo, máximo) e os percentis (P75, P90, P95, P99). Estes últimos são utilizados para identificar os valores que delimitam os eventos mais severos da distribuição geográfica observada, permitindo a definição de limites estatísticos para o que constitui um evento "incomum", "severo" ou "extremo" no contexto brasileiro.

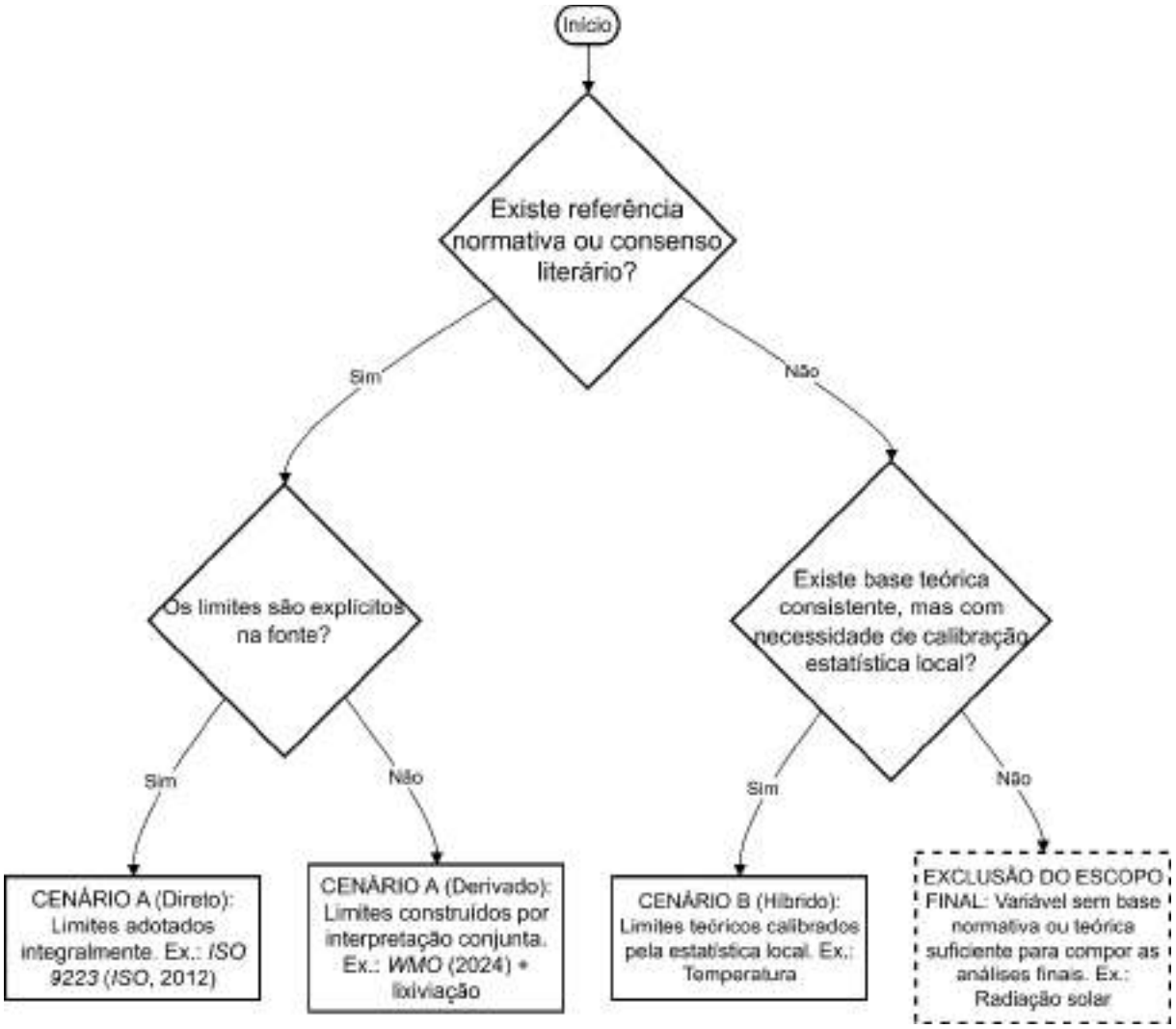
iii) Síntese e calibração (abordagem híbrida): a definição dos limites e a atribuição das classes do perfil (cores) são realizadas através da síntese dos achados da literatura com os resultados estatísticos, seguindo dois cenários possíveis (além da exclusão do escopo), conforme o fluxo decisório ilustrado na Figura 4:

    a. Cenário A (Literatura Prioritária): quando a literatura fornece limites quantitativos, classificações normativas ou consensos fenomenológicos

para a deterioração do concreto. Neste cenário, as classes do perfil são definidas diretamente pelos valores da fonte ou derivadas da interpretação conjunta de referências consolidadas. A prioridade desse tipo de fonte se deve à possibilidade de os dados terem sido validados por ensaios ou estudos de caso reais, minimizando a inferência puramente estatística.

b. Cenário B (Híbrido: Literatura + Estatística): quando a literatura fornece uma "ordem de grandeza" ou valores de estudos de caso, mas não um valor limítrofe exato, os percentis dos dados geográficos são utilizados para calibrar o valor exato do limite de cada categoria do perfil. A justificativa para cada limite integra a referência da literatura (que define a relevância física do fenômeno) com a validação estatística (que define o que é um evento extremo na realidade geográfica observada).

Figura 4 – Fluxograma de classificação dos cenários de calibração dos perfis geográficos



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.2 **Padronização dos perfis e definição das classes interpretativas**

Para garantir consistência e clareza na apresentação dos resultados no capítulo “5. RESULTADOS E DISCUSSÕES”, todos os perfis geográficos desenvolvidos neste trabalho seguem uma estrutura tabular padronizada e um sistema de cores unificado.

Para cada variável geográfica, os perfis geográficos são construídos em um formato tabular, compreendendo três colunas principais: "Faixa proposta", "Classe interpretativa" e "Justificativa e implicações". A coluna "Faixa proposta" define os intervalos de valores da variável. A coluna "Classe interpretativa" associa uma cor,

conforme Quadro 13 (Verde para classe de intensidade de ocorrência da variável baixa/insignificante, Amarela para moderada e Vermelha para alta/crítica) a cada faixa.

A coluna "Justificativa e implicações" descreve sucintamente os impactos esperados no CA/CP quando a variável se encontra na respectiva faixa, bem como a justificativa para definição dela.

Quadro 13 – Significado das cores de classe do perfil geográfico

Cor da Classe interpretativa	Significado
	Classe de intensidade de ocorrência da variável baixa/insignificante.
	Classe de intensidade de ocorrência da variável moderada.
	Classe de intensidade de ocorrência da variável alta/crítica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que os perfis geográficos não são necessariamente lineares ou monotonicamente crescentes. A configuração das classes do perfil (e, consequentemente, das cores) é determinada pela sobreposição dos dados da literatura e da análise estatística, refletindo a física dos fenômenos de deterioração.

4.4.3 **Especificidades metodológicas para variáveis geográficas químicas**

A aplicação da metodologia descrita na seção “4.4.1 Metodologia híbrida e cenários de calibração” é adaptada à natureza física de cada grupo de variáveis. Enquanto as variáveis termodinâmicas transitam entre os cenários de calibração (A ou B), a avaliação das variáveis geográficas químicas baseia-se estritamente no Cenário A (Literatura Prioritária). Contudo, devido à forte dependência espacial de suas fontes geradoras e à multiplicidade de mecanismos de ataque, a espacialização dessas variáveis exige critérios metodológicos complementares.

Para a definição das classes do perfil das variáveis geográficas químicas, adotam-se as seguintes diretrizes normativas:

- [NOx] e [SOx]: as classes do perfil são construídas com base na Diretiva 2008/50/EC (*European Parliament; Council of the European Union*, 2008) e literatura de corrosão (Finlayson-Pitts *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2019; Frederickson *et al.*, 2022; Pastor-Fernández *et al.*, 2025), e na norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012),

respectivamente. Ambas correlacionam os limites de concentração atmosférica com o potencial de carbonatação acelerada e formação de ácidos.

- $[SO_4^{2-}]$: o perfil adota os limites de taxa de deposição da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012). Esta abordagem reconhece que a deposição total (seca + úmida) calculada pelo modelo *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 – MERRA-2* (*GMAO*, 2015) é fisicamente equivalente (*ISO*, 2012; Lemon, 2012; Randles *et al.*, 2017; Wang, Junfeng *et al.*, 2020; Hardacre *et al.*, 2021; Liu; Chan; Abbatt, 2021) ao parâmetro de deposição (P_d) da norma, permitindo a aplicação direta das classes de corrosividade (P_0 a P_3) sem necessidade de conversões empíricas (como a estimativa teórica da taxa de deposição a partir da concentração volumétrica do gás no ar).
- $[Cl^-]$: o perfil adota integralmente os limites de deposição da *ISO* 9223 (categorias S_0 a S_3) (*ISO*, 2012). A Nota 4 da referida norma exclui do seu escopo a poluição extrema por respingos marinhos fortes (*splash zone*). Esta ressalva valida metodologicamente o uso dos dados do *MERRA-2* (*GMAO*, 2015), que mensuram a deposição atmosférica regional (aerossóis transportados) e não o ataque direto por ondas, alinhando o dado coletado ao escopo normativo. Para as análises envolvendo esta variável, a medida de tendência central adotada é a média aritmética, em estrito alinhamento com a *ISO* 9223 (*ISO*, 2012).

4.4.4 **Espacialização individual e leitura combinada dos perfis**

Em alinhamento com as diretrizes de avaliação macroclimática, optou-se por não unificar as variáveis em um índice matemático único ou matriz consolidada. Índices aditivos ou multiplicativos tendem a mascarar a severidade de variáveis específicas por meio de médias compensatórias, diluindo o peso de condições críticas localizadas.

A metodologia estabelece a geração de mapas temáticos individualizados, um para cada variável geográfica (termodinâmicas e químicas). A condição de um domínio climático é avaliada pela leitura combinada desses mapas, sem equação de combinação: a presença de uma única variável em nível crítico, como alta deposição de cloretos, é suficiente para governar o processo de deterioração local,

independentemente dos níveis das demais. As variáveis termodinâmicas (T, UR, i_{prec}) modulam a intensidade dos processos de degradação, com T e UR atuando como aceleradores cinéticos e a i_{prec} condicionando o transporte e a lixiviação de agentes agressivos.

A leitura combinada situa cada perfil no macroclima e reconhece que a condição local (microclima) pode amplificar ou atenuar a agressividade indicada. Os perfis retratam o estado atual dos dados, mutáveis em função das alterações climáticas em curso.

4.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE GEOPROCESSAMENTO

A preparação da base de dados vetorial operou no Sistema de Informação Geográfica *QGIS* (Sherman *et al.*, 2025), adotando o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000 – EPSG:4674, sendo *EPSG* o *European Petroleum Survey Group*) como *datum* oficial para garantir a precisão posicional do território brasileiro. A espacialização e a renderização cartográfica, contudo, foram integralmente automatizadas via rotinas em linguagem *Python* (Python Software Foundation, 2025), utilizando as bibliotecas *GeoPandas* e *Matplotlib*.

A integração de dados ocorreu via união relacional de atributos (*Attribute Join* [11]), vinculando os resultados tabulares dos perfis geográficos à malha vetorial dos Domínios Climáticos (Novais, 2019, 2023b; Novais; Machado, 2023a) [12]. O algoritmo pareou a chave primária de identificação de cada domínio, transferindo as classes interpretativas definidas para a respectiva geometria espacial.

O produto consiste em mapas temáticos coropléticos, categorizados nas três classes de ocorrências das variáveis da pesquisa: baixa/insignificante (Verde), moderada (Amarela) e alta/crítica (Vermelha). Este procedimento foi replicado para gerar mapas temáticos individualizados das variáveis termodinâmicas e químicas,

[11] `Attribute Join` (União de Atributos): operação de geoprocessamento que combina atributos de duas tabelas com base em um campo-chave comum (*attribute key*), vinculando registros de uma tabela de dados externos à tabela de atributos de uma camada vetorial, sem alterar a geometria das feições, permitindo enriquecer a informação espacial com dados tabulares (Esri, 2025a; QGIS Documentation Team, 2025).

[12] Arquivo vetorial digital (*shapefile*) cedido gentilmente pelo Prof. Novais via correio eletrônico em fevereiro de 2025.

permitindo a visualização isolada do comportamento de cada vetor de degradação no território nacional.

4.6 COMPARAÇÃO COM A NORMA E SUBSÍDIOS PARA REVISÃO NORMATIVA

A NBR 6118 (ABNT, 2023b) classifica a agressividade pelas Classes de Agressividade Ambiental (CAA), conforme o tipo de ambiente da estrutura, sem recorrer a valores medidos de variáveis. Os perfis geográficos classificam cada variável por domínio climático. Como as abordagens operam em escalas distintas – microambiente na norma, macroclima nos perfis –, a comparação não converte classes; identifica, em cada domínio, quais condições macroclimáticas severas não são expressas pela tipologia normativa.

O procedimento compreende quatro passos:

i) Tomar o perfil das variáveis de cada domínio climático (classes Verde, Amarela ou Vermelha).
ii) Selecionar as variáveis em classe Amarela ou Vermelha.
iii) Verificar, para cada variável selecionada, se a tipologia normativa a contempla: os ambientes marinho, urbano e industrial sinalizam a presença de cloretos e de poluentes atmosféricos ([Cl^-], [CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}]), sem quantificá-los; nenhuma classe da norma contempla temperatura, umidade relativa ou intensidade de precipitação.
iv) Registrar, para cada DC, as variáveis cuja severidade não é expressa pela tipologia – o ponto em que o perfil macroclimático agrega informação à norma.

A leitura é acompanhada de duas ressalvas: a condição microclimática local pode amplificar ou atenuar a severidade indicada pelo perfil, e os dados são mutáveis em função das alterações climáticas em curso. A comparação tem caráter subsidiário: oferece elementos para revisões normativas futuras, sem emitir juízo sobre a norma vigente.

4.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O estudo apresenta limitações intrínsecas à escala macroclimática e à natureza dos dados de sensoriamento remoto, restringindo a extrapolação direta dos resultados para microclimas específicos.

A restrição espacial dos sensores impõe limites escalares. O sensor *Atmospheric Infrared Sounder* (*AIRS*) (CO_2) (Barnet, 2021) apresenta malha de aproximadamente 111 km × 111 km. A adoção dessa resolução justifica-se pela viabilidade computacional e pela disponibilidade de dados abertos contínuos em escala continental. A utilização de satélites de altíssima resolução para cobrir os 8,5 milhões de km² do território brasileiro geraria custo de processamento e aquisição incompatível com o escopo da pesquisa, além de fugir do objetivo de traçar um perfil macroclimático. Os produtos *MERRA-2* (0,5° × 0,625°) (*GMAO*, 2015) e *OMI* (0,25° × 0,25°) (Li; Krotkov; Leonard, 2012; Krotkov *et al.*, 2013), embora mais refinados, também generalizam a variabilidade em regiões de topografia complexa ou de transição terra-mar, diluindo picos de emissão pontuais, como zonas industriais densas.

Os dados de gases referem-se a colunas atmosféricas. A conversão física adotada mitiga as incertezas na estimativa da concentração ao nível do solo. No tratamento das variáveis químicas, assumiram-se as concentrações de NO_2 e SO_2 como indicadores substitutos das famílias de óxidos correspondentes (NOx e SOx), dada a viabilidade de detecção orbital. Os dados de deposição, por sua vez, derivam de reanálises de transporte de aerossóis, carecendo de validação in situ em estruturas reais.

A comparação com a NBR 6118 (ABNT, 2023b) embute uma diferença de escala. A norma classifica o microambiente imediato da estrutura, enquanto os perfis geográficos avaliam a agressividade macroclimática regional. A análise busca compreender a complementaridade entre as abordagens, evidenciando como o macroclima atua como agravante ou atenuante das condições locais. Os perfis não substituem a inspeção microambiental prevista na norma, mas oferecem subsídios para a revisão normativa.

Por fim, a inexistência de um banco de dados nacional unificado sobre a deterioração real de estruturas de CA/CP impede a validação global da abordagem. A proposta constitui uma aproximação teórica baseada nas melhores variáveis geográficas disponíveis, contribuindo para futuras revisões normativas, ainda que careça de correlação direta com dados de campo de longo prazo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a consolidação e a análise dos resultados obtidos a partir dos domínios climáticos (DCs) do território brasileiro, com foco na definição de perfis geográficos aplicados às estruturas de concreto armado e protendido (CA/CP). A discussão organiza-se de forma progressiva: inicia-se pela caracterização estatística das variáveis geográficas individuais; em seguida, apresenta-se a leitura comparativa desses resultados por DC, evidenciando como cada variável se distribui no território e como essa distribuição se relaciona com a durabilidade das estruturas. A interpretação final preserva a distinção entre a escala macroclimática adotada no estudo e a aplicação local exigida em projeto.

Os perfis geográficos descrevem a condição macroclimática de referência de cada domínio. Essa leitura não constitui condição definitiva de exposição: o microclima do sítio da obra pode agravá-la ou amenizá-la, a depender de fatores locais como densidade urbana, topografia, ventilação e proximidade de fontes de umidade ou calor. A avaliação microclimática permanece necessária para o projeto específico.

5.1 PERFIS GEOGRÁFICOS POR VARIÁVEL

A definição dos intervalos utilizados na construção dos perfis geográficos seguiu critérios distintos, conforme a disponibilidade de referências técnicas e a natureza de cada variável. Em alguns casos, a literatura técnica forneceu base suficiente para a definição dos intervalos (Cenário A); em outros, a calibração exigiu apoio na distribuição estatística da amostra nacional (Cenário B). O objetivo não é construir uma classificação única, mas organizar a leitura dos dados em intervalos interpretativos coerentes com o comportamento de cada variável.

O Quadro 14 apresenta os critérios adotados para a definição dos perfis geográficos por variável. O Quadro 16, por sua vez, apresenta as estatísticas descritivas da amostra global utilizada na calibração, com os parâmetros de tendência central e dispersão que fundamentaram os intervalos adotados para cada variável.

Quadro 14 – Critérios de definição dos perfis geográficos por variável (Cenários de Calibração)

Variável/Subvariável	Cenário de definição	Base de referência principal
Temperatura (T)	B (Híbrido: Lit. + Est.)	Literatura (Arrhenius; *ACI* 305R-20 (*ACI*, 2020)) calibrada pelos percentis da amostra nacional (P25, Mediana) – Quadro 15.
Amplitude térmica máxima diária (ΔT) [a]	A (Literatura Prioritária)	Combinação de fontes: *NRMCA* (2009), *ACI* 224.1R-93 (*ACI*, 1993), *ACI* 301-16 (*ACI*, 2016) e literatura de fadiga térmica – "5.1.1 Perfil geográfico da temperatura"
Umidade relativa do ar (UR)	A (Literatura Prioritária)	Mecanismos físico-químicos consagrados (Tuutti, 1982; Andrade, 2018)
Intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec})	A (Literatura Prioritária)	Combinação de fontes: classificação *WMO* (2024) e literatura de lixiviação/erosão – "5.1.3 Perfil geográfico da precipitação pluviométrica máxima "
Concentração de CO_2 atmosférico ($[CO_2]$)	A (Literatura Prioritária)	Limites climáticos globais (*NOAA* (Lan *et al.*, 2023)) e literatura de poluição – "5.1.4 Perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico"
Deposição total de íons cloreto ($[Cl^-]$)	A (Literatura Prioritária)	*ISO* 9223 (Classes de Salinidade S_0-S_3) (*ISO*, 2012)
Concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx])	A (Literatura Prioritária)	Diretiva 2008/50/EC (*European Parliament; Council of the European Union*, 2008) e literatura de corrosão e poluição – "5.1.5 "
Concentração de óxidos de enxofre ([SOx])	A (Literatura Prioritária)	*ISO* 9223 (Classes de Poluição P_0-P_3) (*ISO*, 2012)
Deposição total de sulfato particulado atmosférico ($[SO_4^{2-}]$)	A (Literatura Prioritária)	Adaptação da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)
[a] Subvariável, componente de T.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 – Estatísticas descritivas das variáveis amostrais do Brasil para calibração dos perfis geográficos

Variável (Amostra)	Unidade	Nº de Válidos	Tipo(s) de agregação(ões) de dados aplicada para transformação amostral	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Amplitude [(IX) - (VIII)]	P25	P75	P90	P95	P99	CV (%)
(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)	(IX)	(X)	(XI)	(XII)	(XIII)	(XIV)	(XV)	(XVI)
T	°C	752.340	-	23,51	23,6	5,58	-5,2	44,2	49,4	20,3	27,2	30,7	32,4	35,3	23,73
ΔT^{a}	°C	32.313	Máximo diário; mínimo diário; diferença entre máximo e mínimo diário	9,83	9,70	3,75	0,0	37,5	37,5	7,30	12,20	14,70	16,30	19,50	38,12
UR	%	735.553	-	71,73	76	20,28	7	100	93,0	58	89	95	96	100	28,27
i_{prec}	mm/h	30.613	Máximo diário	1,90	0,00	5,17	0,0	79,8	79,8	0,00	0,80	6,00	11,60	25,80	272,15
$[CO_2]$	ppm	710	-	395,00	394,97	0,31	394,03	396,00	1,97	394,80	395,19	395,37	395,58	395,82	0,08
$[Cl^-]$	mg/m²/dia	2.268	Soma de componentes (partículas)	4,42	1,92	7,16	0,32	69,51	69,19	1,08	4,31	10,63	18,54	38,22	162,15
$[SO_4^{2-}]$	mg/m²/dia	2.268	Soma das componentes (seca e úmida)	0,811	0,628	0,689	0,141	8,504	8,364	0,510	0,772	1,473	1,986	3,715	84,92
[NOx]	µg/m³	28.800	-	0,272	0,222	0,143	0,109	2,874	2,766	0,163	0,372	0,440	0,497	0,657	52,72
[SOx]	µg/m³	21.643	-	2,858	2,571	1,558	0,992	21,740	20,7	1,790	3,380	4,459	5,745	8,632	54,50

Notas:

1. Os dados das colunas de (V) a (XV) possuem a unidade da coluna (II). A unidade dos dados de (XVI) está indicada na própria coluna. Os dados das demais colunas são adimensionais ou não se aplicam qualquer unidade de medida.
2. Os dados da coluna (IV) descrevem a transformação aplicada aos dados originais para derivar as variáveis de análise. A agregação é uma manipulação deliberada da amostra, realizada conforme “APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil)”, com a finalidade de converter leituras brutas em indicadores que refletem adequadamente os mecanismos físicos de deterioração do concreto, ou seja, transforma a amostra original em uma nova amostra representativa. Normalmente, a agregação tem por objetivo transformar registros horários em diários ou compor variáveis parciais em totais.
3. Os dados das colunas (XI) a (XV) são os percentis, onde P25 indica o 25º percentil, P75 indica o 75º percentil e assim por diante.

[a] Subvariável, componente de T.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.1 **Perfil geográfico da temperatura**

A construção do perfil geográfico da temperatura (Quadro 16) baseia-se na identificação de limites quantitativos associados a mudanças na cinética dos processos de degradação do CA/CP. O limite inferior de 0 °C marca a transição para o regime de congelamento (Cai; Liu, 1998; Müller; Ludwig; Hasholt, 2021; Rosky *et al.*, 2023), no qual a expansão volumétrica da água congelada nos poros do concreto gera pressões internas superiores à resistência à tração do material (Valenza; Scherer, 2006; Xu *et al.*, 2025). Esse mecanismo é particularmente severo em concretos saturados, nos quais graus de saturação entre 86 % e 91 % amplificam o dano (Clifton, 1990; Li *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2024).

Quadro 16 – Perfil geográfico da temperatura (T)

Faixa proposta (T em °C)	**Classe interpretativa**	**Justificativa e implicações**
T ≤ 0		Temperaturas iguais ou inferiores a 0 °C indicam transição para o regime de gelo-degelo, com expansão volumétrica da água nos poros, aumento de pressão interna e possibilidade de fissuração e desplacamento.
0 < T ≤ 20		Faixa de condição térmica mais favorável ao desempenho do CA/CP, com cinética mais lenta dos processos de degradação e menor potencial de aceleração de carbonatação e corrosão.
20 < T ≤ 30		Faixa de transição térmica em que a temperatura já acelera a evaporação, a secagem superficial e reações deletérias. A antiga faixa intermediária é absorvida aqui para eliminar a classe laranja.
T > 30		Condição térmica desfavorável, associada à concretagem em tempo quente, com evaporação elevada, maior risco de retração plástica e aceleração de mecanismos de deterioração.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos limites positivos fundamenta-se na termodinâmica das reações químicas (Lee; Hover, 2016; Cantor, 2020b). A literatura adota 20 °C como temperatura de referência para ensaios de durabilidade e estimativa de vida útil (Vinaykumar; Tirthakar, 2008; Wang, Jiaming *et al.*, 2022; Ryu *et al.*, 2024), porque, abaixo desse patamar, a energia térmica disponível tende a reduzir a velocidade de processos difusivos e reações de degradação (Baccay *et al.*, 2006; Li; Deng; Liu, 2019; Kiernożycki; Błyszko, 2021; Niu *et al.*, 2025a).

A velocidade dos mecanismos de deterioração, incluindo carbonatação e corrosão eletroquímica, aumenta continuamente com a temperatura (Hu *et al.*, 2015; Zha *et al.*, 2022). Pela regra prática de Arrhenius, processos de transporte de massa e reações químicas no concreto aceleram entre aproximadamente 1,5 e 2 vezes a cada incremento de 10 °C, a depender da energia de ativação específica do

mecanismo (Yang *et al.*, 2015; Peng *et al.*, 2018; Atasever; Tokyay, 2024; Du *et al.*, 2024; Zhang; Kwon; Wang, 2025). Assim, estruturas expostas a temperaturas acima de 25–30 °C tendem a apresentar deterioração mais acelerada do que aquelas mantidas próximas à temperatura de referência normativa de 20 °C (Kaleta-Jurowska; Jurowski, 2020; Das *et al.*, 2025).

O valor limite de aproximadamente 30 °C também encontra respaldo nas recomendações normativas para concreto fresco (Bui; Nguyen, 2020; Kaleta-Jurowska; Jurowski, 2020; Saidi; Jadidi; Karakouzian, 2022). Conforme o *ACI* 305R-20 (*ACI*, 2020), temperaturas acima desse referencial elevam a taxa de evaporação superficial (Schindler; Frank McCullough, 2002; Meyer; Zyl; Combrinck, 2022) a valores que podem superar a exsudação, incrementando o risco de fissuração por retração plástica (García, 1989) nas primeiras horas após o lançamento, como observado em ensaios sob diferentes temperaturas (Ghourchian; Wyrzykowski; Lura, 2017).

A distribuição estatística da temperatura nos DCs valida empiricamente os limites adotados (Quadro 15). O Quadro 17 apresenta as estatísticas descritivas da variável T, incluindo média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), valores mínimo e máximo, e percentis, além da AIQ [13] para cada domínio.

Quadro 17 – Estatísticas descritivas de T por DC

Domínio climático	Casos Válidos	Média (°C)	Mediana (°C)	Desvio padrão (°C)	CV (%)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Amplitude (°C)	P25 (°C)	P75 (°C)	AIQ (°C)
Árido	12.229	26,51	26,0	4,09	15,42	15,4	38,7	23,3	23,3	29,6	6,3
Equatorial	163.588	26,63	26,0	3,82	14,33	9,8	41,8	32,0	23,9	29,3	5,4
Equatorial Ameno	4.680	22,16	21,6	3,42	15,44	10,2	34,4	24,2	20,0	24,1	4,1
Semiárido	44.400	26,02	25,5	4,54	17,44	6,6	41,9	35,3	22,7	29,4	6,7
Subtropical	100.409	18,17	18,2	5,92	32,57	-4,8	44,2	49,0	14,3	22,0	7,7
Temperado	4.910	12,79	12,9	5,01	39,17	-4,5	28,5	33,0	9,5	26,1	16,6
Tropical	347.049	23,98	23,6	4,89	20,37	-5,2	43,9	49,1	20,8	27,2	6,4
Tropical Ameno	75.075	20,54	20,3	4,88	23,78	-1,3	37,5	38,8	17,3	23,7	6,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados indicam uma divisão entre domínios de regime quente e estável e aqueles de regime ameno e variável, com os domínios Árido, Equatorial e Semiárido compondo o grupo de maior carga térmica, com medianas entre 25,5 °C e 26,0 °C. O

[13] AIQ: amplitude interquartil.

Árido registra o maior P75 (29,6 °C), seguido pelo Semiárido (29,4 °C) e Equatorial (29,3 °C). O Semiárido, contudo, apresenta um máximo absoluto elevado (41,9 °C), indicando picos de calor que podem acelerar a evaporação superficial e induzir fissuração térmica (Liu, Jiaping *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2025).

Os domínios Temperado e Subtropical apresentam as menores medianas (12,9 °C e 18,2 °C, respectivamente) e a maior instabilidade térmica. Os Coeficientes de Variação (CV) destes domínios (39,17 % e 32,57 %) superam os demais. A Amplitude Interquartil (AIQ) de 16,6 °C no Temperado e 7,7 °C no Subtropical aponta para oscilações térmicas mais acentuadas na faixa central dos dados.

Quanto aos extremos absolutos, o registro de temperaturas mínimas negativas nos domínios Tropical (-5,2 °C), Subtropical (-4,8 °C) e Temperado (-4,5 °C) confirma a possibilidade de ocorrência de gelo-degelo (Luo *et al.*, 2022; Niu *et al.*, 2025b). Simultaneamente, máximos absolutos superiores a 40 °C ocorrem nos domínios Subtropical (44,2 °C), Tropical (43,9 °C), Semiárido (41,9 °C) e Equatorial (41,8 °C).

O domínio Equatorial Ameno destaca-se pela elevada estabilidade térmica, evidenciada pela menor amplitude interquartil de toda a série (AIQ = 4,1 °C). Essa concentração das temperaturas em torno da mediana (21,6 °C), aliada a um baixo CV (15,44 %), sugere menor susceptibilidade à fadiga térmica e favorece uma cinética de degradação química mais uniforme ao longo do tempo (Khan; Almutairi; Abbas, 2022; Li *et al.*, 2023; Peng *et al.*, 2025).

A espacialização do perfil geográfico da temperatura sobre o território nacional, resultante da aplicação das faixas definidas no Quadro 15 aos resultados dos DCs do Quadro 17, é apresentada na Figura 5. Essa leitura expressa a condição macroclimática; no entorno da obra, ilhas de calor urbanas podem elevá-la, ao passo que altitude, sombreamento e corpos d'água tendem a reduzi-la.

Figura 5 – Mapa do perfil geográfico da temperatura (T)



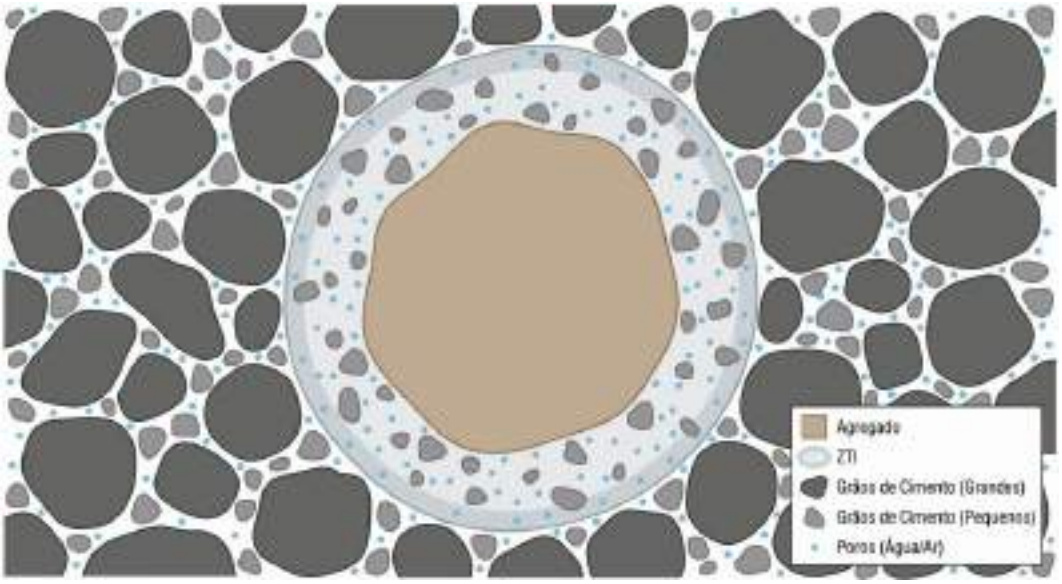
Fonte: Elaborada pelo autor.

Por sua vez, a construção do perfil geográfico da amplitude térmica baseia-se na identificação de faixas de variação em que a ciclagem térmica diária induz tensões internas capazes de iniciar e propagar microfissuras no concreto. Quando essas deformações térmicas cíclicas são restringidas interna ou externamente, resultam em fadiga térmica do material (Kwan; Ng, 2004; Wang, Guoqing *et al.*, 2022; Pichler, 2023). Esse perfil é complementar ao da temperatura e específico para capturar os mecanismos de fissuração térmica.

Amplitudes térmicas inferiores a 10 °C resultam em deformações térmicas dentro do domínio elástico linear do concreto (*NRMCA*, 2009; Obinna, 2020; Klemczak; Żmij, 2021). A literatura indica que variações térmicas abaixo desse

patamar geram tensões de tração insuficientes para superar a resistência característica à tração do concreto (f_{ctk}) (Izumi; Arai; Mizobuchi, 2018; Klemczak; Żmij, 2021; Pessoa *et al.*, 2024) ou iniciar a nucleação de microfissuras na zona de transição interfacial (ZTI) (Ollivier; Maso; Bourdette, 1995; Erarslan, 2026) – Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática da zona de transição de interface (ZTI)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A ZTI, zona de transição de espessura 15–20 μm com porosidade aumentada em relação à pasta cimentícia, atua como ponto crítico para o início da degradação mecânica (Ollivier; Maso; Bourdette, 1995; Trigo; Liborio, 2014; San Nicolas; Provis, 2015; Lei et al., 2022). Em amplitudes baixas, a integridade dessa interface é preservada (Korolev *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021; Herbers *et al.*, 2023).

A faixa $10 \leq \Delta T < 15$ °C marca a transição para o regime de fadiga térmica incipiente (Wang, Guoqing et al., 2022; Tao et al., 2023; Nguyen et al., 2025). A repetição de ciclos térmicos nessa magnitude pode iniciar a microfissuração na ZTI (Balagam; Killamsetti, 2019; Cucinotta *et al.*, 2020), especialmente em concretos de menor desempenho ($f_{ck} < 25$ MPa) ou quando a deformação térmica é restringida interna ou externamente (Wu *et al.*, 2016; Klemczak; Żmij, 2021; Felix; Carrazedo; Possan, 2022). Embora a fadiga não induza ruptura imediata, a acumulação de dano nessa faixa reduz progressivamente a VU da estrutura (Wu *et al.*, 2019; Felix; Carrazedo; Possan, 2022; Zou; Ye; Tang, 2025).

A faixa $\Delta T \geq 15$ °C representa o intervalo em que a solicitação térmica se intensifica de forma suficiente para elevar o potencial de fadiga térmica e a

propagação de fissuras na matriz cimentícia. Estudos sobre variações térmicas diárias demonstram que amplitudes em torno de 15 °C podem gerar deformações térmicas que se aproximam dos limites de fissuração, considerando a deformação específica de $200 \pm 30 \cdot 10^{-6}$, conforme Neville (1995) (Carino; Clifton, 1995; Al-rawi; Salih, 2003; Castro *et al.*, 2017; Alhamad *et al.*, 2022; Wang, Guoqing *et al.*, 2022). Em elementos protendidos sob restrição parcial, tal deterioração pode induzir perda de aderência entre aço e concreto (Dai *et al.*, 2025; Pokorný *et al.*, 2020; Tahsiri; Belarbi; Gencturk, 2024).

Quadro 18 – Perfil geográfico da amplitude térmica (ΔT)

Faixa proposta (ΔT em °C)	**Classe interpretativa**	**Justificativa e implicações**
ΔT < 10		Variação térmica inferior aos limites capazes de gerar tensões relevantes em estruturas correntes. O concreto atua predominantemente em regime elástico linear, com baixa probabilidade de nucleação de microfissuras.
10 ≤ ΔT < 15		Faixa de transição em que os ciclos térmicos passam a impor solicitações relevantes, ainda abaixo do patamar de fadiga térmica acelerada. Requer atenção ao detalhamento e à restrição de deformações.
ΔT ≥ 15		Amplitudes térmicas iguais ou superiores a 15 °C situam a variável em faixa de solicitação térmica elevada, associada ao início de fadiga térmica acelerada e à propagação de fissuras na matriz cimentícia, com repetição de ciclos de expansão e contração, aumento da abertura de microfissuras, elevação da permeabilidade e maior ingresso de agentes agressivos, reduzindo progressivamente a integridade do concreto.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização da amplitude térmica máxima diária (ΔT) nos DCs, por sua vez, revela padrões distintos de ciclagem térmica, fundamentais para a compreensão dos mecanismos de fadiga no concreto. O Quadro 19 apresenta as estatísticas descritivas calculadas a partir da agregação dos extremos diários (`Tmax – Tmin`) para cada domínio. A análise baseada na mediana revela que o Domínio Semiárido impõe a maior solicitação cíclica cotidiana às estruturas, com valor central de 10,6 °C, seguido pelos domínios Tropical e Árido, ambos com mediana de 10,2 °C. Amplitudes diárias nessa faixa geram tensões térmicas cíclicas que, acumuladas ao longo do tempo, contribuem para a degradação progressiva do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (Chen, Depeng *et al.*, 2020; Khan; Almutairi; Abbas, 2022).

Quadro 19 – Estatísticas descritivas de ΔT por DC

Domínio climático	Casos Válidos	Média (°C)	Mediana (°C)	Desvio padrão (°C)	CV (%)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Amplitude (°C)	P25 (°C)	P75 (°C)	AIQ (°C)
Árido	530	10,00	10,2	2,52	25,19	1,4	16,6	15,2	8,2	11,7	3,5
Equatorial	6.787	9,04	8,8	3,36	37,16	0,0	29,7	29,7	6,9	11,1	4,2
Equatorial Ameno	202	7,88	7,4	3,63	46,08	0,0	22,5	22,5	5,6	9,0	3,5
Semiárido	1.967	10,37	10,6	3,21	30,97	0,0	25,4	25,4	8,4	12,4	4,0
Subtropical	4.294	9,36	9,2	3,95	42,19	0,0	28,4	28,4	6,4	12,2	5,8
Temperado	210	7,52	7,2	3,14	41,69	0,6	19,9	19,3	5,3	9,3	4,0
Tropical	15.079	10,40	10,2	3,87	37,19	0,0	37,5	37,5	7,8	12,8	5,0
Tropical Ameno	3.244	9,32	9,4	3,62	38,84	0,0	23,3	23,3	6,9	11,6	4,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Domínio Tropical destaca-se pela mediana elevada e pela severidade dos seus extremos, apresentando o maior terceiro quartil (P75 = 12,8 °C) e o maior máximo absoluto da série (37,5 °C). Isso sugere que, embora a mediana seja comparável à do Semiárido, a frequência de dias com amplitudes severas é superior no Tropical, potencializando o risco de fadiga térmica acumulada e a ocorrência de choques térmicos pontuais.

Em contrapartida, os domínios Temperado e Equatorial Ameno registram as menores medianas de amplitude (7,2 °C e 7,4 °C, respectivamente). No caso do primeiro, apesar das baixas temperaturas absolutas (analisadas no Quadro 17 para T), a variação diária tende a ser contida, possivelmente devido à nebulosidade e à inércia térmica da umidade. O Domínio Equatorial, com mediana de 8,8 °C, confirma a tendência de estabilidade térmica diária típica de regiões de alta pluviosidade, embora registre eventos extremos isolados (Máximo de 29,7 °C).

O Domínio Subtropical apresenta um comportamento peculiar: sua mediana (9,2 °C) é intermediária, mas possui o maior desvio padrão entre todos os grupos (3,95 °C, virtualmente empatado com o Tropical). Essa alta dispersão indica uma imprevisibilidade climática, alternando períodos de estabilidade com dias de grandes variações térmicas (P75 = 12,2 °C e Máximo = 28,4 °C), característicos da passagem de frentes frias que alteram bruscamente a temperatura local.

Em síntese, enquanto o Semiárido e o Tropical impõem uma carga térmica cíclica constantemente elevada (maiores medianas), o Subtropical e o Tropical submetem as estruturas a uma maior variabilidade de solicitações (maiores desvios padrão), configurando diferentes cenários de agressividade para a durabilidade do CA/CP.

A espacialização do perfil geográfico da amplitude térmica máxima diária é apresentada na Figura 7, permitindo visualizar a distribuição territorial das classes interpretativas definidas no Quadro 19. O perfil reflete a amplitude térmica do macroclima; localmente, vales e áreas urbanas densas podem ampliá-la, enquanto vegetação e corpos d'água a atenuam.

Figura 7 – Mapa do perfil geográfico da amplitude térmica (ΔT)



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 **Perfil geográfico da umidade relativa do ar**

A construção do perfil geográfico para umidade relativa (UR) reconhece que a UR controla a disponibilidade de água nos poros do concreto, determinando a formação do eletrólito necessário para a corrosão das armaduras (Stefanoni; Angst; Elsener, 2018). A interação antagônica entre a difusão de gases e a condutividade iônica fundamenta a definição dos pontos de corte adotados.

A descontinuidade da película de água nos poros ocorre abaixo de aproximadamente 60 % UR, interrompendo o transporte iônico e inviabilizando a corrosão eletroquímica (Stefanoni; Angst; Elsener, 2018; Angst *et al.*, 2020). Embora a retração plástica nas primeiras idades e a subsequente retração por secagem demandem atenção em ambientes muito secos (Mehta; Monteiro, 1994; Neville, 1995), o risco eletroquímico é reduzido nesta faixa. A carbonatação também é afetada, com declínio acentuado abaixo de 50 % (Rahmon, 2023).

No intervalo entre 60 % e 80 %, a carbonatação atinge sua velocidade máxima, com pico entre aproximadamente 60 % e 70 % (Leemann; Moro, 2016; von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020; Tu; Wang, 2021): a umidade é suficiente para solubilizar o hidróxido de cálcio, enquanto o volume de poros preenchidos por ar ainda permite a difusão rápida do CO_2. A resistividade elétrica do concreto inicia declínio, mas a corrosão mantém-se em taxas moderadas.

UR acima de 80 %, a saturação parcial dos poros reduz a resistividade elétrica do concreto, criando condição favorável à corrosão acelerada quando há despassivação (Azarsa; Gupta, 2017). A Reação Álcali-Agregado (RAA) requer UR ≥ 85 % para expansão do gel (Bažant; Steffens, 2000), porém a redução da resistividade e o aumento do transporte iônico já se intensificam a partir de 80 %. A carbonatação é reduzida pelo bloqueio dos poros, mas o risco eletroquímico e expansivo é máximo. O Quadro 20 resume as faixas adotadas.

Quadro 20 – Perfil geográfico da umidade relativa do ar (UR)

Faixa proposta (UR em %)	Classe interpretativa	Justificativa e implicações
UR < 60		Abaixo deste patamar, a película de água nos poros torna-se descontínua, interrompendo o transporte iônico necessário para sustentar a corrosão eletroquímica (Stefanoni; Angst; Elsener, 2018). A carbonatação é reduzida de forma progressiva, com declínio acentuado abaixo de 50 % (Rahmon, 2023). O risco dominante é a retração por secagem em idades iniciais.
60 ≤ UR < 80		Zona de carbonatação máxima. A taxa de carbonatação atinge o pico entre 60 % e 70 %, estendendo-se até próximo de 80 % (Leemann; Moro, 2016; von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020; Tu; Wang, 2021). Umidade suficiente para dissolver $Ca(OH)_2$, poros parcialmente preenchidos por ar permitindo difusão eficiente de CO_2. Resistividade elétrica começa a declinar, mas corrosão ainda é moderada.
UR ≥ 80 %		A saturação parcial dos poros reduz a resistividade elétrica do concreto, criando condição favorável à corrosão acelerada quando há despassivação (Azarsa; Gupta, 2017). A Reação Álcali-Agregado requer UR ≥ 85 % para expansão do gel (Bažant; Steffens, 2000), porém a redução da resistividade e o aumento do transporte iônico já se intensificam a partir de 80 % UR. A carbonatação é reduzida pelo bloqueio dos poros, mas o risco eletroquímico e expansivo é máximo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma compreensão da distribuição da umidade relativa do ar nos domínios brasileiros, o Quadro 21 apresenta as estatísticas descritivas da variável UR, incluindo média, mediana, desvio padrão, CV, valores mínimo e máximo, amplitude, e percentis, além da AIQ para cada DC.

Quadro 21 – Estatísticas descritivas de UR por DC

Domínio climático	Casos Válidos	Média horária (%)	Mediana horária (%)	Desvio padrão (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)	P25 (%)	P75 (%)	AIQ (%)
Árido	12.160	60,86	62	19,75	32,46	12	100	88	45	77	32
Equatorial	159.552	73,73	78	18,99	25,76	7	100	93	62	90	28
Equatorial Ameno	4.632	83,33	90	15,01	18,02	24	100	76	75	94	19
Semiárido	43.009	62,09	64	21,21	34,16	8	100	92	45	80	35
Subtropical	97.713	77,66	82	17,86	22,99	7	100	93	66	93	27
Temperado	4.647	82,45	91	20,13	24,41	7	100	93	74	98	24
Tropical	340.243	69,80	74	20,93	29,99	7	100	93	55	88	33
Tropical Ameno	73.597	74,52	78	18,52	24,86	9	100	91	62	90	28

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o Quadro 21, a distribuição da umidade relativa do ar nos domínios Temperado e Equatorial Ameno revela um ambiente de saturação predominante, evidenciado pelas medianas elevadas (91 % e 90 %) e pelo estreitamento da faixa de variação central. Com o primeiro quartil (P25) já partindo de 74 %, essas regiões

raramente impõem condições de secagem severa ao concreto, mantendo-o em equilíbrio higroscópico elevado. A proximidade entre média e mediana nesses grupos reforça a simetria da distribuição em patamares altos, minimizando a ocorrência de choques de secagem.

Diferente desse padrão, os domínios Semiárido e Árido caracterizam-se pela amplitude e pela assimetria. Embora as medianas girem em torno de 60 %, os valores mínimos absolutos descem a 8 % e 12 %, respectivamente, expondo as estruturas a eventos extremos de dessecação (Song *et al.*, 2021). A dispersão, medida pelo desvio padrão superior a 19 % e CV acima de 30 %, confirma que a agressividade desses ambientes reside na alternância cíclica: o concreto transita rotineiramente entre a UR baixa (P25 de 45 %) e a UR elevada (máximo de 100 %), retração e expansão cíclica com acúmulo de dano por microfissuração e retração (Bažant; Wang, 1985; Rangel *et al.*, 2020; Liu, Jinliang *et al.*, 2022; Rath; Sakai, 2025).

O DC Subtropical apresenta uma particularidade: sua mediana de 82 % supera a média (77,66 %), indicando uma concentração de frequências nas faixas superiores de umidade. O terceiro quartil (P75) de 93 % demonstra que, em um quarto do tempo, as condições são de umidade relativa próxima à saturação, comparáveis às do Temperado, mas intercaladas com períodos de menor umidade (P25 de 66 %) que favorecem a disponibilidade de oxigênio nos poros do concreto (Andrade, 2023), o que potencializa a corrosão eletroquímica ao combinar eletrólito disponível nos períodos úmidos com oxigênio disponível nos períodos de secagem (Jaśniok; Jaśniok, 2015; Rodrigues *et al.*, 2021).

No Tropical, a variabilidade é a regra: com desvio padrão de 20,93 % e AIQ de 33 %, é a região que varre com maior intensidade as diferentes faixas interpretativas. Seus extremos vão de 7 % a 100 %, e os quartis (55 % a 88 %) abrangem tanto a faixa ótima de carbonatação quanto a de corrosão, sem que nenhuma predomine de forma absoluta como nos outros domínios.

Por fim, o Domínio Equatorial, apesar de reconhecido como úmido, apresenta mediana (78 %) e P25 (62 %) inferiores aos do Subtropical e Temperado. Isso sugere que, embora a pluviosidade seja alta, a atmosfera permite janelas de evaporação mais frequentes, mantendo o CA/CP em uma faixa de umidade intermediária por mais tempo do que nas regiões frias e úmidas do sul.

A Figura 8 apresenta a espacialização do perfil geográfico da umidade relativa do ar sobre o território nacional, com base nas faixas definidas no

Quadro 20 e nas estatísticas do Quadro 21. A leitura refere-se ao macroclima de referência; condições locais de maior umidade, como vales e várzeas, podem agravá-la, enquanto ambientes ventilados tendem a amenizá-la.

Figura 8 – Mapa do perfil geográfico da umidade relativa do ar (UR)



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3 **Perfil geográfico da precipitação pluviométrica máxima diária**

O perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}) adota a precipitação como veículo de transporte de agentes agressivos. Além

disso, controla tanto a disponibilidade de água nos poros do concreto quanto a frequência e amplitude dos ciclos de molhagem e secagem que induzem tensões higro-mecânicas devidas a variações de umidade (Qin *et al.*, 2017; Liu; Pang; Yao, 2021; Huang, Changhao *et al.*, 2025).

A energia cinética da precipitação governa a profundidade de penetração de água nos poros do concreto e a velocidade de transporte de agentes agressivos (cloretos, sulfatos, dióxido de carbono) (Jin *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Van *et al.*, 2022). O valor de 5,0 mm/h adota-se como limite inferior do perfil, abaixo do qual a quantidade de água percolada é insuficiente para iniciar o transporte convectivo de agentes agressivos através da matriz porosa (Castro; Bentz; Weiss, 2011; Li *et al.*, 2022).

O Quadro 22 apresenta a classificação de intensidade de chuvas estabelecida pela *WMO* (2024), utilizada como uma referência para a definição das faixas do perfil.

Quadro 22 – Classificação das chuvas quanto a intensidade, segundo *World Meteorological Organization* (*WMO*)

Faixa	**Intensidade da chuva (baseada num período de 3 minutos de mensuração)**
$i_{prec} < 2{,}5$ mm/h	Fraca
$2{,}5$ mm/h $\leq i_{prec} < 10$ mm/h	Moderada
10 mm/h $\leq i_{prec} < 50$ mm/h	Forte
$i_{prec} \geq 50$ mm/h	Intensa/Extrema

Fonte: Adaptado de *WMO* (2024).

A literatura sobre transporte de massa em concreto indica que a taxa de penetração de cloretos aumenta progressivamente com a disponibilidade de água nos poros, sendo acelerada em eventos de precipitação intensa (Ting *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2024).

A faixa $5{,}0 < i_{prec} \leq 15{,}0$ mm/h representa chuvas intensas com energia cinética moderada a forte (Quadro 22), promovendo carreamento moderado de agentes agressivos para o interior da matriz porosa (Xu *et al.*, 2012; Meshesha; Tsunekawa; Haregeweyn, 2019; Bezak; Petan; Mikoš, 2021; Xu *et al.*, 2023). Nesta faixa, a lixiviação de compostos cimentícios solúveis ($Ca(OH)_2$, C-S-H) é acelerada pela percolação de água através dos poros do concreto (Cheng *et al.*, 2012; Cheng; Chao; Lin, 2013; Jiang *et al.*, 2025). A penetração acelerada de cloretos em superfícies expostas torna-se possível nesta faixa, especialmente em estruturas localizadas em

ambientes marinhos ou com exposição a sais de degelo (Hong; Ann, 2018; Luo; Niu; Su, 2021).

Intensidades de precipitação acima de 15,0 mm/h representam chuvas extremas (Quadro 22) com energia cinética muito elevada, promovendo transporte intenso e abrasão superficial de agentes agressivos (Meshesha; Tsunekawa; Haregeweyn, 2019; Xie *et al.*, 2020). Estudos experimentais demonstram que intensidades muito elevadas de precipitação causam erosão superficial do concreto (Ismaeil *et al.*, 2021; Liu, Jialiang *et al.*, 2021), removendo parcialmente a camada de cobrimento dependendo da duração e intensidade do evento (Sitek; Hlaváček; Bodnárová, 2018). Nesta faixa, a lixiviação severa e acelerada de compostos cimentícios ocorre em velocidade crítica, reduzindo a resistência mecânica da camada superficial do concreto (Cheng; Chao; Lin, 2013; Zhang; Li; Li, 2019).

A permeabilidade relativa aumenta, facilitando o transporte acelerado de cloretos e dióxido de carbono (Zhou, Yong *et al.*, 2022). Ciclos de molhagem e secagem induzem fissuras por retração e processos higrotérmicos (Nguyen, 2024; Kipkemboi; Miyazawa, 2025). A desagregação superficial do cobrimento expõe as armaduras a um ambiente altamente agressivo (Guo *et al.*, 2026). Estes eventos, definidos como precipitação ≥ P99, representam aproximadamente 1 % dos dias em que ocorrem eventos extremos (Bhatti *et al.*, 2020; Zhao, 2022), onde a deterioração acelerada é iminente. O Quadro 23 sintetiza as faixas adotadas e suas justificativas.

Quadro 23 – Perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec})

Faixa proposta (i_{prec} em mm/h)	Classe interpretativa	Justificativa e implicações
$i_{prec} \leq 5,0$		Chuvas de intensidade fraca a moderada, com energia cinética insuficiente para promover carreamento significativo de agentes agressivos. Representa aproximadamente 90 % dos dias em regiões áridas e semiáridas. A deterioração é lenta por lixiviação moderada, com penetração gradual de CO_2 e cloretos. Risco mínimo de fissuras higrotérmicas induzidas por precipitação intensa.
$5,0 < i_{prec} \leq 15,0$		Chuvas intensas com energia cinética moderada a forte, promovendo carreamento moderado de agentes agressivos para o interior da matriz porosa. Representa eventos raros (5–25 % dos dias, conforme P95 em regiões equatoriais). Ocorre aceleração moderada da lixiviação de compostos cimentícios ($Ca(OH)_2$, C-S-H) e aumento da permeabilidade relativa. Penetração acelerada de cloretos em superfícies expostas. Possibilidade de fissuras higrotérmicas em concretos com baixa resistência à tração.
$i_{prec} > 15,0$		Chuvas muito intensas com energia cinética muito elevada, promovendo carreamento intenso e erosão significativa de agentes agressivos. Representa eventos raros (aproximadamente 2–4 % dos dias no Equatorial e ≤ 1 % nos demais domínios, conforme P95 e P99). A lixiviação de compostos cimentícios é severa e acelerada, com permeabilidade muito elevada. Penetração rápida de cloretos e CO_2. Risco crítico de fissuras higrotérmicas, desagregação superficial e corrosão acelerada de armaduras. Possibilidade de erosão superficial em concretos com baixa resistência à abrasão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 24 apresenta as estatísticas descritivas da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}) para os domínios brasileiros.

Quadro 24 – Estatísticas descritivas de i_{prec} por DC

Domínio climático	Casos Válidos	Média diária (mm/h)	Mediana diária (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	CV (%)	Mínimo diário (mm/h)	Extremo diário (mm/h)	Amplitude (mm/h)	P25 (mm/h)	P75 (mm/h)	P95 (mm/h)	AIQ (mm/h)
Árido	490	0,616	0,000	2,44	396,59	0,0	23,6	23,6	0,00	0,00	3,00	0,0
Equatorial	6.298	2,474	0,000	5,93	239,68	0,0	68,8	68,8	0,00	1,60	14,60	1,6
Equatorial Ameno	201	2,140	0,200	4,78	223,35	0,0	31,0	31,0	0,00	1,60	12,98	1,6
Semiárido	1.832	0,850	0,000	3,40	399,75	0,0	43,0	43,0	0,00	0,00	4,40	0,0
Subtropical	4.165	1,855	0,000	4,63	249,52	0,0	71,0	71,0	0,00	1,00	10,80	1,0
Temperado	203	2,258	0,200	4,77	211,21	0,0	36,4	36,4	0,00	2,20	11,36	2,2
Tropical	14.284	1,781	0,000	5,19	291,19	0,0	79,8	79,8	0,00	0,60	10,80	0,6
Tropical Ameno	3.140	2,120	0,000	5,20	245,23	0,0	52,2	52,2	0,00	1,20	13,19	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dados de precipitação máxima diária apresentam distribuições altamente assimétricas, com concentração de valores nulos e cauda longa de eventos extremos (Wilson *et al.*, 2022). A mediana é inadequada para descrever i_{prec}, pois assume valor zero em seis dos oito domínios, refletindo a sazonalidade pronunciada (Sparacino;

Argibay; Espindola, 2021). Consequentemente, o percentil P95 é adotado como indicador de referência para eventos intensos, capturando os dias de maior intensidade pluviométrica (5 % dos dias mais intensos) (Schär *et al.*, 2016; Seneviratne *et al.*, 2023) que governam a lixiviação e o carreamento de agentes agressivos (Jacques *et al.*, 2010; Huang, Daguan *et al.*, 2025).

O P95 varia de 3,00 mm/h no Árido a 14,60 mm/h no Equatorial. Domínios equatoriais e temperados (Equatorial 14,60 mm/h, Tropical Ameno 13,19 mm/h, Equatorial Ameno 12,98 mm/h, Temperado 11,36 mm/h) exibem maior intensidade de eventos extremos, enquanto Árido e Semiárido apresentam P95 moderados (3,00 e 4,40 mm/h). Subtropical e Tropical registram P95 intermediários (10,80 mm/h). As médias acompanham essa hierarquia (0,616 mm/h no Árido a 2,474 mm/h no Equatorial), confirmando que regiões equatoriais concentram maior energia de precipitação.

A distribuição é altamente assimétrica: P25 = 0 em todos os domínios (25 % dos dias sem chuva), enquanto P75 varia de zero (Árido e Semiárido) a 2,20 mm/h (Temperado). Essa concentração de zeros reflete a sazonalidade: a maioria dos dias não contribui para lixiviação, mas eventos extremos (P95, P99, máximos) causam dano acelerado. A AIQ é zero em Árido e Semiárido (75 % dos dados em zero) e varia até 2,20 mm/h no Temperado.

O coeficiente de variação é elevado (211,21 % no Temperado a 399,75 % no Semiárido), refletindo a natureza episódica da precipitação. O desvio padrão varia de 2,44 mm/h no Árido a 5,93 mm/h no Equatorial. Em Árido e Semiárido, o desvio é muito maior que a AIQ, indicando que a variabilidade se concentra na cauda da distribuição (eventos extremos), não no intervalo central.

Os máximos absolutos variam de 23,6 mm/h no Árido a 79,8 mm/h no Tropical. Tropical (79,8 mm/h), Subtropical (71 mm/h) e Equatorial (68,8 mm/h) registram os maiores máximos dos máximos, refletindo intensidade de eventos convectivos em regiões tropicais. Todos os domínios apresentam máximos que ultrapassam 15 mm/h, indicando que eventos extremos muito raros ocorrem em todas as regiões com potencial para deterioração acelerada.

O mapa do perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária encontra-se na Figura 9, resultante da combinação das informações dos Quadros 23 e 24. O perfil descreve o macroclima; a orografia local, ao redistribuir a precipitação entre barlavento e sotavento, pode alterar a condição no sítio da obra.

Figura 9 – Mapa do perfil geográfico da intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec})



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.4 **Perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico**

O perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico ([CO_2]) baseia-se na identificação de marcos quantitativos onde esse gás na atmosfera altera a cinética de difusão e reação com os compostos hidratados do cimento (von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020; Hernández-Rodríguez *et al.*, 2021; Su *et al.*, 2024).

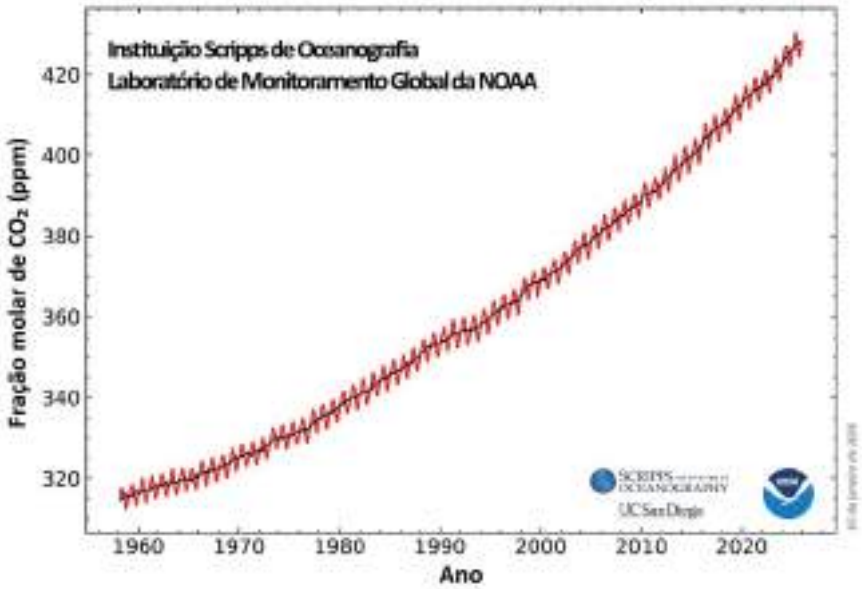
A carbonatação é um processo difusivo que, de modo simplificado (considerando apenas a contribuição do dióxido de carbono, isolado das variáveis do material, o tempo e outras variáveis geográficas), é regido pela 1ª Lei de Fick, na qual o fluxo de CO_2 para o interior do concreto é diretamente proporcional ao gradiente de concentração do gás através da camada carbonatada (Tuutti, 1982; Cantor, 2020a; Hussain *et al.*, 2022; Mahmood; Dehn; Thissen, 2025).

O limite de 350 ppm de CO_2 atmosférico é estabelecido pela comunidade científica como referência de segurança climática, representando o valor máximo abaixo do qual a humanidade pode esperar condições climáticas suficientemente estáveis para estruturas de engenharia (Hansen *et al.*, 2008; Rockström *et al.*, 2009; Wilbanks *et al.*, 2020). Quando mantida abaixo deste patamar, a variabilidade de temperatura e umidade relativa permanece dentro de margens previsíveis, afetando a cinética de carbonatação do concreto (Kwon; Lee; Kim, 2014; Kang *et al.*, 2023).

Embora o concreto armado tenha se consolidado após a 1ª Revolução Industrial (1760–1840) (Borsay; Brown; Jowitt, 1993), suas estruturas pioneiras – do sistema Hennebique (1897–1910) (Cusack, 1987; Bostenaru Dan, 2020) ao concreto protendido de Freyssinet (1914–1928) (Shushkewich, 2012) – operaram sob concentrações de CO_2 ainda próximas aos níveis pré-industriais (~280 ppm) (Ptáček *et al.*, 2012; Lan *et al.*, 2023; The Global Carbon Atlas, [*s. d.*]), resultando em ambientes climáticos estáveis em que estruturas de qualidade corrente experienciaram carbonatação em taxas previsíveis (Ghanooni-Bagha; YekeFallah; Shayanfar, 2020).

A faixa $350 \leq [CO_2] < 450$ ppm compreende as concentrações atmosféricas até 2015 sendo que, desde 2016, as concentrações ultrapassaram permanentemente 400 ppm (Figura 10), estabelecendo um novo cenário de exposição para as estruturas (Betts *et al.*, 2018; Lan *et al.*, 2023). O limite de 450 ppm é identificado como o ponto crítico para mudança climática perigosa (Hansen *et al.*, 2008), associado a aumentos de 40–80 % na profundidade de carbonatação em cenários de mudança climática para o fim do século (2100), variando conforme cenário de emissão, qualidade do concreto e condições locais (Mizzi; Wang; Borg, 2018; Vivek *et al.*, 2023; Hassan; Amleh, 2024).

Figura 10 – Concentração de CO_2 atmosférico no Observatório de Mauna Loa (1958–2025)



Fonte: Adaptado de Lan *et al*. (2023).

Concentrações a partir de 450 ppm representam desde cenários de exposição urbana densa, com valores locais 5–20 ppm superiores aos rurais e picos em cânions urbanos (Pugh *et al.*, 2012; Verhulst *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2025), até ambientes de carbonatação severa e rápida. O aumento da pressão parcial de CO_2 acelera a difusão através dos poros do concreto, reduzindo o tempo para despassivação (Mizzi; Wang; Borg, 2018). Acima de 600 ppm, a carbonatação torna-se severa e rápida, com mecanismos de reação distintos dos observados em concentrações convencionais (Yu; Guo; Li, 2022; Hassan, 2025).

Nestas condições, a despassivação ocorre muito antes do fim da VUP mesmo em estruturas com cobrimento adequado (Lee, Hyung-Min *et al.*, 2018; Hassan, 2025), exigindo proteção complementar: concretos de alta compacidade (a/c ≤ 0,45; f_{ck} > 35 MPa), revestimentos de proteção superficial (Xia *et al.*, 2021; Purwondho; Maulana, 2025) e inibidores de corrosão (Yi *et al.*, 2021; Min; Lee; Singh, 2024; Zhang, Hao *et al.*, 2024). O Quadro 25 sintetiza as faixas adotadas e suas justificativas.

Quadro 25 – Perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico ($[CO_2]$)

Faixa proposta ($[CO_2]$ em ppm)	Classe interpretativa	Justificativa e implicações
$[CO_2] < 350$		Níveis históricos de referência (pré-1988, ≤ 350 ppm), nos quais fatores climáticos permanecem dentro de margens previsíveis. A carbonatação ocorre em taxas controladas em concretos de qualidade corrente (a/c ≤ 0,55; f_{ck} ≥ 25 MPa), com avanço lento da frente de carbonatação e risco insignificante de despassivação durante a VUP, exceto em concretos de baixíssima qualidade (alta porosidade, relação a/c > 0,65 e f_{ck} < 20 MPa).
$350 \leq [CO_2] < 450$		Faixa que compreende a concentração atual de fundo [a] global (Global Background) medida por satélites e estações de referência (Mauna Loa (Lan *et al.*, 2023)). Representa a carga padrão a que todas as estruturas abertas estão expostas. A carbonatação ocorre em taxas previsíveis e moderadas; a despassivação pode ocorrer dentro da VUP se o cobrimento for insuficiente ou a qualidade do concreto for baixa (relação a/c entre 0,55 e 0,65; f_{ck} entre 20 e 25 MPa), exigindo cumprimento estrito das normas de durabilidade.
$[CO_2] \geq 450$		Níveis que abrangem desde cenários urbanos densos até ambientes industriais e túneis sem ventilação. O aumento da pressão parcial de CO_2 acelera a difusão, resultando em carbonatação acelerada a severa. Concretos de média qualidade podem sofrer carbonatação profunda se não protegidos. Em concentrações ≥ 600 ppm, a carbonatação é severa e rápida mesmo em concretos de média qualidade, com probabilidade crítica de corrosão generalizada muito antes do fim da VUP.
[a] Nível atmosférico de fundo (*background*): concentração de CO_2 em áreas remotas, sem influência direta de fontes de emissão antrópicas (atividades humanas). Representa a concentração "natural" da atmosfera global.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 26, por sua vez, apresenta as estatísticas descritivas da concentração média de CO_2 (2002-2024) estratificadas por DC, permitindo identificar padrões de distribuição espacial e variabilidade dessa variável no território nacional.

Quadro 26 – Estatísticas descritivas de [CO_2] por DC

Domínio climático	*Pixels* Válidos	Média (ppm)	Mediana (ppm)	Desvio padrão (ppm)	CV (%)	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Amplitude (ppm)	P25 (ppm)	P75 (ppm)	AIQ (ppm)
Árido	6	394,78	394,74	0,29	0,07	394,5	395,2	0,7	394,53	394,97	0,4
Equatorial	379	395,04	394,98	0,29	0,07	394,4	395,9	1,6	394,84	395,21	0,4
Equatorial Ameno	7	395,12	395,27	0,36	0,09	394,6	395,5	0,9	394,81	395,37	0,6
Semiárido	22	394,77	394,85	0,28	0,07	394,3	395,3	1,0	394,58	394,95	0,4
Subtropical	40	395,42	395,37	0,25	0,06	395,0	396,0	1,0	395,23	395,66	0,4
Temperado	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tropical	225	394,87	394,85	0,27	0,07	394,0	395,5	1,4	394,72	395,06	0,3
Tropical Ameno	31	395,11	395,12	0,14	0,04	394,8	395,4	0,6	395,05	395,20	0,2

Notas:

1. Os valores representam a concentração de CO_2 na troposfera superior (aproximadamente 300-500 hPa) no período 2002-2024, obtidos a partir do produto *NASA AIRS* com resolução espacial de 1° × 1° (Barnet, 2021). O número de *pixels* válidos refere-se às células da grade espacial com dados disponíveis em cada domínio.

2. O domínio Temperado não apresentou *pixels* válidos devido à sua reduzida extensão territorial e à resolução espacial do produto *NASA AIRS* (aproximadamente 111 km × 111 km no equador) (Barnet, 2021). Para fins de análise subsequente, as concentrações do domínio Subtropical serão utilizadas para o Temperado, dada a contiguidade geográfica, similaridade climática (invernos rigorosos, influência de massas de ar polar) e padrões de circulação atmosférica compartilhados entre esses domínios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise das medidas de tendência central revela que o DC Subtropical apresentou a maior concentração média de CO_2 (395,42 ppm), seguido pelo Equatorial Ameno (395,12 ppm) e Tropical Ameno (395,11 ppm). Em contraste, o domínio Semiárido registrou a menor média (394,77 ppm), seguido pelo Árido (394,78 ppm) e Tropical (394,87 ppm), indicando uma possível influência da menor densidade populacional e atividade industrial nessas regiões, bem como da maior capacidade de sumidouro de carbono em áreas com vegetação mais densa.

A mediana, em todos os domínios, apresentou valores muito próximos à média, sugerindo distribuições aproximadamente simétricas e ausência de valores extremos significativos. Quanto à dispersão absoluta, o desvio padrão variou entre 0,14 ppm (Tropical Ameno) e 0,36 ppm (Equatorial Ameno), refletindo a relativa homogeneidade espacial das concentrações de CO_2 na coluna troposférica (Diallo *et al.*, 2017). O CV é consistentemente baixo em todos os domínios, oscilando entre 0,04 % (Tropical Ameno) e 0,09 % (Equatorial Ameno), evidenciando a estabilidade espacial dessa variável atmosférica em escala regional, característica esperada para um gás de longa permanência atmosférica e distribuição global relativamente uniforme (Archer *et al.*, 2009).

Os valores extremos de concentração de CO_2 atmosférico revelam a amplitude da variabilidade espacial em cada domínio climático. O maior valor registrado (396,0

ppm) ocorreu no domínio Subtropical, enquanto o menor (394,0 ppm) é observado no Tropical, resultando em uma amplitude máxima aproximada de 2,0 ppm entre os extremos absolutos do conjunto de dados. A amplitude interna aos domínios é mais pronunciada no Equatorial (1,6 ppm), seguido pelo Tropical (1,4 ppm) e Semiárido e Subtropical (ambos com 1,00 ppm), enquanto o Tropical Ameno apresentou a menor amplitude (0,6 ppm), sugerindo maior homogeneidade espacial neste domínio.

A AIQ, que representa a dispersão dos 50% centrais dos dados e é menos sensível a valores extremos, é mais elevada no Equatorial Ameno (0,6 ppm) e Árido, Equatorial, Semiárido e Subtropical (todos com 0,4 ppm), em contraste com o Tropical Ameno (0,2 ppm), que apresentou a menor variabilidade interquartílica. Esses padrões indicam que, embora as concentrações médias de CO_2 sejam relativamente uniformes entre os domínios, existem variações espaciais locais que podem estar associadas a diferenças na altitude, cobertura vegetal, fontes de emissão pontuais e padrões de circulação atmosférica regional (Lan *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2026).

A representatividade espacial dos dados varia consideravelmente entre os domínios climáticos, refletindo tanto a extensão territorial de cada domínio quanto a cobertura espacial do produto *NASA AIRS* (Barnet, 2021). O domínio Equatorial apresentou o maior número de *pixels* válidos (379), correspondendo a 53,4% do total analisado, seguido pelo Tropical (225 *pixels*, 31,7%) e Subtropical (40 *pixels*, 5,6%). Em contraste, o Equatorial Ameno (7 *pixels*), Árido (6 *pixels*) e Semiárido (22 *pixels*) apresentaram cobertura espacial reduzida, o que pode limitar a robustez estatística das inferências para esses domínios.

O domínio Temperado não apresentou *pixels* válidos devido à incompatibilidade entre sua reduzida extensão territorial – restrita a áreas serranas de altitude no extremo sul do Brasil, principalmente – e a resolução espacial do produto *NASA AIRS* (aproximadamente 111 km × 111 km no equador) (Barnet, 2021). Considerando a necessidade de atribuir valores de CO_2 para esse domínio nas análises subsequentes, opta-se pela utilização das concentrações do DC Subtropical como *proxy*, fundamentada em três critérios:

i) contiguidade geográfica, uma vez que o Temperado está espacialmente inserido ou imediatamente adjacente ao Subtropical nas regiões serranas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina;
ii) similaridade climática, caracterizada por invernos rigorosos, elevada amplitude térmica sazonal e influência recorrente de massas de ar polar e

iii) padrões de circulação atmosférica compartilhados, incluindo frentes frias, ciclones extratropicais e bloqueios atmosféricos que determinam a distribuição espacial de gases traço na troposfera superior.

Essa escolha representa uma abordagem metodologicamente conservadora, evitando potencial subestimação de exposição nas análises do perfil subsequentes. Adicionalmente, cabe ressaltar que os dados representam concentrações na troposfera superior (aproximadamente 300-500 hPa), não refletindo necessariamente as concentrações em superfície, que podem apresentar maior variabilidade devido à influência direta de fontes e sumidouros locais.

A espacialização do perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico, conforme as faixas definidas no Quadro 25 e os dados contidos no Quadro 26, é apresentada na Figura 11. A espacialização expressa a concentração de fundo do macroclima; no entorno, a densidade urbana e fontes locais de combustão podem elevá-la.

Figura 11 – Mapa do perfil geográfico da concentração de CO_2 atmosférico ($[CO_2]$)



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.5 **Perfil geográfico da deposição de cloretos**

O perfil geográfico da deposição de cloretos ($[Cl^-]$) baseia-se no princípio de que a penetração de íons cloreto no concreto é governada pelo gradiente de concentração imposto pelo ambiente (Torres, 2011; Rong *et al.*, 2023; Macioski *et al.*, 2025). A taxa de deposição superficial de cloretos (S_d) atua como a condição de contorno externa que alimenta o fluxo difusivo em direção à armadura (Arpino; Guimarães, 2014; Meira; Ferreira; Andrade, 2022; Vacek *et al.*, 2022). Para balizar as faixas do perfil, utiliza-se a classificação de salinidade atmosférica estabelecida pela

norma internacional *ISO* 9223 (*ISO*, 2012), na sua *Tabela B.4 — Grouping of pollution by sulfur-containing substances represented by* SO_2 (adaptada aqui no Quadro 27).

Quadro 27 – Classificação da poluição por salinidade atmosférica por deposição de cloretos

Taxa de deposição de cloretos (S_d) (mg/m²/dia)	**Categoria**
$S_d \leq 3$	S_0
$3 < S_d \leq 60$	S_1
$60 < S_d \leq 300$	S_2
$300 < S_d \leq 1500$	S_3
NOTA Valores referentes à média anual.	

Fonte: Adaptado de *ISO* 9223 (*ISO*, 2012).

O Quadro 28 apresenta a classificação proposta. A definição da faixa Verde (baixa/insignificante) para taxas de deposição de cloretos inferiores a 3 mg/m²/dia (categoria S_0) segue a ISO 9223 (*ISO*, 2012) e está associada a ambientes com baixa taxa de aporte atmosférico de cloretos na superfície das estruturas (Angst *et al*., 2009; Alonso *et al*., 2000). Nestas condições, típicas de ambientes continentais distantes de fontes diretas de aerossóis marinhos (Mustafa; Yusof, 1994; Costa; Appleton, 1999), a concentração total de cloretos permanece inferior à capacidade de fixação química da pasta de cimento por formação de cloroaluminatos, resultando em baixa disponibilidade de íons livres para despassivação (Lee, Yunsu *et al.*, 2018; Babaahmadi *et al.*, 2022; Marvila; Mounzer, 2026).

Consequentemente, a frente de penetração de cloretos livres avança lentamente (Costa; Appleton, 1999; Meira *et al.*, 2010), e a probabilidade de que a frente de cloretos atinja cobrimentos usuais de projeto em CA (da ordem de 25–50 mm) dentro de 50 anos em ambientes de baixa deposição é reduzida (Costa; Appleton, 1999; Özkan, 2011; Wegen; Polder; Breugel, 2012; Marvila; Mounzer, 2026), o que permite que o dimensionamento da durabilidade seja governado por mecanismos mais lentos, como a carbonatação (Castañeda *et al.*, 2013; Boschmann Käthler; Elsener; Angst, 2021).

Quadro 28 – Perfil geográfico da deposição de cloretos ([Cl^-])

Faixa proposta ([Cl^-] em mg/m²/dia [a])	Classe interpretativa	Justificativa e implicações
[Cl^-] ≤ 3		Ambientes com baixa deposição de cloretos (categoria S_0 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)), típicos de regiões continentais distantes de fontes diretas de aerossóis marinhos. A concentração de cloretos na superfície do concreto permanece abaixo do limite de despassivação (tipicamente entre 0,4 % e 1,0 % em relação à massa de cimento). A frente de penetração avança lentamente, e a probabilidade de atingir cobrimentos usuais (25–50 mm) em 50 anos é reduzida. A durabilidade é governada por mecanismos mais lentos, como a carbonatação.
3 < [Cl^-] ≤ 60		Ambientes com influência marinha moderada (categoria S_1 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)). O acúmulo de cloretos é progressivo ao longo de décadas, podendo elevar a contaminação superficial a níveis críticos. Exige cumprimento rigoroso dos requisitos de cobrimento e relação a/c para garantir a VUP. A despassivação pode ocorrer dentro da VUP se o cobrimento for insuficiente ou a qualidade do concreto for baixa.
[Cl^-] > 60		Ambientes com deposição elevada de cloretos, abrangendo desde zonas costeiras com ventos fortes e transporte eólico de aerossóis salinos (categoria S_2) até ambientes de agressividade extrema próximos à zona de arrebentação (categoria S_3), conforme *ISO* 9223 (*ISO*, 2012). A pressão de difusão é intensa, com saturação acelerada da camada de cobrimento e tempo reduzido para iniciação da corrosão. A deposição massiva de sais higroscópicos (principalmente NaCl) mantém o concreto úmido por deliquescência mesmo em períodos sem chuva. A despassivação é provável em curto a médio prazo, com corrosão localizada por pites e perda de seção transversal da armadura, exigindo estratégias robustas de proteção (concretos de alta compacidade, inibidores, aço inoxidável, proteção catódica).
[a] Taxa de deposição atmosférica (mg/m²/dia): quantidade de cloretos (provenientes de aerossóis marinhos) que se deposita sobre uma superfície horizontal exposta, por unidade de área e tempo. Representa a intensidade da exposição ambiental a cloretos de origem marinha.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A faixa Amarela (moderada), compreendendo o intervalo de deposição de íons cloreto de 3 a 60 mg/m²/dia (S_1) (*ISO*, 2012), representa ambientes de exposição moderada a aerossóis marinhos ou contaminantes salinos em zonas costeiras ou interiores com fontes pontuais de cloretos (Alcántara *et al.*, 2015; Chico *et al.*, 2017; Marvila; Mounzer, 2026). O risco nesta zona é associado ao caráter cumulativo da exposição: embora a deposição diária seja moderada, o acúmulo ao longo de décadas pode elevar a contaminação superficial a níveis que facilitam o ingresso para o interior do CA/CP e reduzem a VU da estrutura (Meira *et al.*, 2007a; Arpino; Guimarães, 2014; Rincón *et al.*, 2016; Meira; Ferreira; Andrade, 2022).

A faixa Vermelha ([Cl^-] > 60 mg/m²/dia) abrange desde ambientes costeiros com ventos fortes e transporte eólico de aerossóis salinos (categoria S_2 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)) até ambientes de agressividade extrema próximos à zona de arrebentação (categoria S_3). Estudos em atmosferas marinhas demonstram que taxas

de deposição nessa magnitude estão associadas ao transporte eólico de aerossóis salinos, com concentrações decrescentes conforme a distância da costa (Meira *et al.*, 2007a; Kost; Stoll, 2023; Marvila; Mounzer, 2026).

Para o CA/CP, essa magnitude de deposição acelera a saturação da camada de cobrimento (Meira *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2024), e a penetração de cloretos por difusão e absorção capilar reduz o tempo de iniciação da corrosão (Alonso *et al.*, 2000; Ann; Song, 2007; Transportation Research Board, 2018; Ali *et al.*, 2024). A deposição massiva de sais higroscópicos (principalmente NaCl) mantém o concreto em estado úmido por deliquescência [14] mesmo em períodos sem chuva (Wang, Yu *et al.*, 2020; Yoon; Chang, 2020a; Shen *et al.*, 2021; Pungercar; Musso, 2022; He *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2026), resultando em corrosão localizada por pites e perda progressiva de seção transversal da armadura (Angst, Ueli *et al.*, 2011; Angst, Ueli M. *et al.*, 2011; Dang; François, 2014; Li *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2024; Khuptong; Kumar; Sharma, 2025). A despassivação é provável em curto a médio prazo, exigindo estratégias robustas de proteção.

A análise da deposição de cloretos no Brasil (Quadro 29) evidencia que o Árido apresenta a maior taxa média de deposição (7,66 mg/m²/dia), seguido pelo Semiárido (6,61 mg/m²/dia). A predominância destes domínios no topo da distribuição corrobora a hipótese da existência de fontes continentais de cloretos (Wood; Sanford, 1995; Zhu, 2016; Xing *et al.*, 2026), como a ressuspensão eólica de material particulado proveniente de solos halomórficos (solos com alta concentração de sais solúveis acumulados por *déficit* hídrico crônico, em que a evapotranspiração supera a precipitação) (Cordeiro; Mansefu, 2001; Sousa *et al.*, 2024) e de crostas salinas em depressões sujeitas a ciclos de alagamento e secagem (Zhu, 2016; Teixeira *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2023), sugerindo que essas fontes podem impor agressividade por cloretos independentemente da influência marinha direta.

[14] Deliquescência: processo físico-químico no qual um sólido (tipicamente um sal) absorve umidade do ar atmosférico e se dissolve nela, formando uma solução líquida (Britannica Editors, 2014; deliquescence, 2018; Cambridge University Press & Assessment, 2026).

Quadro 29 – Estatísticas descritivas de [Cl^-] por DC

Domínio climático	*Pixels* Válidos	Média (mg/m²/dia)	Mediana (mg/m²/dia)	Desvio padrão (mg/m²/dia)	CV (%)	Mínimo (mg/m²/dia)	Máximo (mg/m²/dia)	Amplitude (mg/m²/dia)	P25 (mg/m²/dia)	P75 (mg/m²/dia)	AIQ (mg/m²/dia)
Árido	22	7,66	6,56	3,98	51,98	4,0	22,7	18,7	5,33	8,17	2,8
Equatorial	1212	4,62	1,74	8,28	179,24	0,3	69,5	69,2	0,65	4,34	3,7
Equatorial Ameno	17	2,10	1,94	1,86	88,94	0,4	6,8	6,4	0,43	2,27	1,8
Semiárido	74	6,61	5,57	3,82	57,86	0,5	17,8	17,3	3,79	8,38	4,6
Subtropical	130	4,50	2,62	4,43	98,56	1,1	23,4	22,3	1,67	5,37	3,7
Temperado	1	6,45	6,45	-	-	6,4	6,4	0,0	6,45	6,45	0,0
Tropical	706	3,83	1,74	6,14	160,31	0,4	44,0	43,6	1,36	2,84	1,5
Tropical Ameno	106	4,07	2,23	4,06	99,85	0,8	17,7	16,9	1,42	4,96	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O domínio Temperado figura na terceira posição (6,45 mg/m²/dia), alinhando-se aos patamares elevados observados nos DCs secos. Contudo, sua representatividade estatística restringe-se a uma amostragem unitária (N = 1) no extremo sul do território nacional. Embora a escassez de dados impeça generalizações regionais, o valor registrado serve como indicativo de que, nas áreas de ocorrência deste DC, as condições de deposição podem atingir níveis como os da classe S_1 da *ISO* (2012).

Em um patamar intermediário, situam-se os domínios Equatorial (4,62 mg/m²/dia), Subtropical (4,50 mg/m²/dia) e Tropical Ameno (4,07 mg/m²/dia). Observa-se uma alteração relevante em relação à mediana: o DC Tropical, caracterizado por vastas áreas interiores (conforme observa-se na Figura 2), apresenta uma média comparativamente inferior (3,83 mg/m²/dia), sendo superado pelos demais. Este comportamento sugere que a diluição provocada pela sua significativa área continental reduz a média global, mascarando os riscos pontuais da zona costeira.

A análise da variabilidade (CV) e dos valores extremos indicam que os domínios Equatorial (CV = 179,24%) e Tropical (CV = 160,31%) exibem a maior heterogeneidade espacial, sugerindo a coexistência de interiores com baixa deposição e litorais agressivos. Seus picos máximos de 69,5 mg/m²/dia (Equatorial) e 44,0 mg/m²/dia (Tropical) representam as condições mais severas do território. Em contraste, o domínio Árido (CV = 51,98%) apresenta um padrão de deposição mais homogêneo e constante.

A avaliação da média anual de deposição de cloretos ([Cl^-]) evidencia dois perfis de exposição. Nos domínios Árido e Semiárido, a agressividade é continental e

distribuída, com médias de 7,66 mg/m²/dia e 6,61 mg/m²/dia, respectivamente, impulsionada pela ressuspensão eólica em solos halomórficos. Em contrapartida, nos domínios Equatorial e Tropical, a agressividade concentra-se na interface costeira, atingindo a faixa Vermelha. A Figura 12 espacializa o perfil geográfico da deposição de cloretos (Quadro 28), calibrada a partir da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012) e das estatísticas descritivas nacionais (Quadro 29). A leitura refere-se ao macroclima; no sítio da obra, a proximidade da costa intensifica a deposição de aerossóis salinos, enquanto o afastamento do litoral e barreiras topográficas tendem a reduzi-la.

Figura 12 – Mapa do perfil geográfico da deposição de cloretos ([Cl^-])



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.6 **Perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio**

O perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx]) fundamenta-se na atuação destes compostos como precursores de deposição ácida e de corrosão atmosférica (Kanakidou *et al.*, 2016; Geddes; Martin, 2017). O mecanismo físico-químico principal envolve a oxidação do NO_2 na atmosfera e sua reação com a umidade para formar ácido nítrico (HNO_3), que ataca a pasta de cimento por dissolução ácida e neutralização da reserva alcalina (Samie; Tidblad, 2008; Živica; Krizma, 2013; Muthu; Sadowski, 2024).

Concentrações de óxidos de nitrogênio até 5 µg/m³ representam um regime de poluição próximo ao nível de fundo natural, aproximadamente 3 vezes superior à concentração média de NO_2 registrada em estações de monitoramento atmosférico regional (1,7 ± 1,3 µg/m³) (Cheng *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2022). Estudos sobre a durabilidade de materiais cimentícios em ambientes com poluição elevada indicam que a degradação por ataque ácido causado por óxidos de nitrogênio ocorre em concentrações superiores a este patamar (Moriyoshi *et al.*, 2021; Lv *et al.*, 2022). Além disso, concentrações baixas de óxidos de nitrogênio, particularmente na forma de nitrito, demonstram efeito benéfico na proteção de estruturas cimentícias contra degradação por carbonatação (Zhang, Hao *et al.*, 2024).

A faixa 5 ≤ [NOx] < 20 µg/m³ representa um regime de concentração onde inicia-se a atividade química relevante à durabilidade (Wang, Zehua *et al.*, 2019; Frederickson *et al.*, 2022). Embora isoladamente o NOx seja menos agressivo que o SO_2, nesta faixa o NO_2 participa da oxidação do SO_2 em sulfatos na superfície úmida do concreto, intensificando a acidificação local (Zhou *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2012; Wang, Zehua *et al.*, 2019). Este intervalo corresponde a ambientes urbanos de baixa densidade, onde a deposição úmida contendo ácido nítrico começa a contribuir para o aumento da rugosidade superficial da pasta de cimento em exposição prolongada (Liu; Wei; Chen, 2022; Tahwia *et al.*, 2022).

A faixa Vermelha ([NOx] ≥ 20 µg/m³) agrupa os ambientes urbanos densos e industrializados, compreendendo dois regimes de severidade. No primeiro (20 a 40 µg/m³), a concentração de nitratos acelera a lixiviação de compostos de cálcio (Cheng; Chao; Lin, 2013; Babutzka; Lehmann; Burkert, 2023) e, em estruturas de concreto protendido, pode favorecer a corrosão sob tensão em aços de alta resistência (Ramadan *et al.*, 2008; Pierott *et al.*, 2024). No segundo regime (≥ 40 µg/m³),

referência da Diretiva 2008/50/EC (*European Parliament; Council of the European Union*, 2008), a formação de HNO_3 é intensa, resultando em ataque ácido direto que dissolve a pasta de cimento e expõe os agregados (Berger *et al.*, 2022; Khattak *et al.*, 2025). Em qualquer dos regimes, a presença elevada de nitratos combinada com umidade cria um eletrólito de alta condutividade e baixo pH, rompendo a passividade das armaduras e acelerando a corrosão generalizada (Cheng; Chao; Lin, 2013; Nenes *et al.*, 2021; Lv *et al.*, 2022). O Quadro 30 sintetiza os limites adotados e suas justificativas.

Quadro 30 – Perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx])

Faixa proposta ([NOx] em µg/m³)	**Classe interpretativa**	**Justificativa e implicações**
[NOx] < 5		Níveis de fundo natural ou rural, insuficientes para gerar deposição ácida significativa ou atuar como catalisadores de corrosão. O concreto não sofre ataque ácido por NOx. A corrosão das armaduras segue a cinética natural de carbonatação, sem aceleração por poluentes nitrogenados. Concentrações baixas de nitrito podem inclusive conferir efeito benéfico à proteção contra carbonatação.
5 ≤ [NOx] < 20		Níveis típicos de áreas urbanas de baixa densidade ou sob influência de queimadas sazonais. Início da atuação sinérgica com SO_2, potencializando a corrosividade atmosférica. A deposição úmida contendo ácido nítrico contribui para o aumento da rugosidade superficial da pasta de cimento em exposição prolongada, com leve perda de massa ao longo de décadas.
[NOx] ≥ 20		Ambiente urbano denso e agressivo, com concentrações que favorecem a aceleração da corrosão metálica e lixiviação da pasta de cimento. A deposição de nitratos acelera a lixiviação de compostos de cálcio e, em estruturas de concreto protendido, pode favorecer a corrosão sob tensão em aços de alta resistência. Em concentrações ≥ 40 µg/m³, a formação de HNO_3 é intensa, resultando em ataque ácido direto com dissolução da pasta de cimento, exposição dos agregados e corrosão generalizada das armaduras.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 31 detalha as estatísticas descritivas da concentração média de dióxido de nitrogênio (NO_2) na superfície, calculadas a partir da coluna troposférica medida pelo sensor OMI (2004-2025) (Krotkov *et al.*, 2013).

Quadro 31 – Estatísticas descritivas de [NOx] por DC

Domínio climático	*Pixels* Válidos	Média (µg/m³)	Mediana (µg/m³)	Desvio padrão (µg/m³)	CV (%)	Mínimo (µg/m³)	Máximo (µg/m³)	Amplitude (µg/m³)	P25 (µg/m³)	P75 (µg/m³)	AIQ (µg/m³)
Árido	136	0,260	0,250	0,035	13,30	0,217	0,360	0,144	0,231	0,280	0,049
Equatorial	6.048	0,257	0,204	0,116	45,13	0,117	0,689	0,572	0,166	0,334	0,168
Equatorial Ameno	84	0,265	0,204	0,122	46,06	0,128	0,486	0,358	0,152	0,386	0,234
Semiárido	335	0,285	0,278	0,049	17,05	0,215	0,495	0,280	0,252	0,313	0,061
Subtropical	663	0,421	0,390	0,089	21,05	0,266	0,942	0,676	0,372	0,432	0,060
Temperado	9	0,473	0,424	0,132	28,00	0,412	0,824	0,412	0,420	0,443	0,022
Tropical	3.606	0,401	0,388	0,108	26,85	0,198	2,117	1,919	0,351	0,436	0,085
Tropical Ameno	474	0,538	0,466	0,290	53,84	0,241	2,874	2,634	0,383	0,567	0,183

Notas:

1. Os valores representam a concentração média de NO_2 na superfície para o período 2004-2025, derivados do produto *NASA OMI* (*Ozone Monitoring Instrument*) com resolução espacial de 0,25° × 0,25° (Krotkov *et al.*, 2013). A densidade da coluna troposférica (moléculas/cm²) é convertida para concentração em massa (µg/m³) assumindo uma distribuição uniforme na Camada Limite Planetária (*PBL – Planetary Boundary Laye*r) com altura de mistura de 2000 m. O número de *pixels* válidos refere-se às células da grade espacial com dados disponíveis em cada domínio climático após aplicação dos critérios de qualidade (remoção de valores negativos, preenchimento e cobertura de nuvens).
2. A concentração de óxidos de nitrogênio (NOx) é representada pelo NO_2 porque este é o óxido predominante na troposfera em condições atmosféricas normais, uma vez que o NO (monóxido de nitrogênio) é rapidamente oxidado a NO_2 na presença de ozônio.
3. A *PBL* é selecionada por representar a porção da atmosfera mais próxima à superfície terrestre, onde ocorre a interação direta com materiais de construção e a deposição ácida sobre edificações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise preliminar dos dados revela que as concentrações de NOx apresentam magnitudes reduzidas em todo o território nacional, com medianas consistentemente inferiores a 0,500 µg/m³.

Os domínios Equatorial e Equatorial Ameno exibem as menores tendências centrais do estudo, com medianas idênticas de 0,204 µg/m³. No entanto, a análise da dispersão revela nuances importantes: o DC Equatorial apresenta AIQ de 0,168 µg/m³, menor que a do Equatorial Ameno (0,234 µg/m³). Isso indica que, embora as medianas sejam iguais, os dados do Equatorial Ameno possuem uma dispersão central maior, sugerindo uma variabilidade espacial mais acentuada nas concentrações típicas dessa região. Além disso, a média no Equatorial (0,257 µg/m³) é superior à mediana, evidenciando uma assimetria positiva na distribuição, puxada por valores máximos pontuais (0,689 µg/m³).

O domínio Tropical Ameno destaca-se como a região de maior carga de NOx neste recorte, apresentando a maior mediana (0,466 µg/m³), maior média (0,538 µg/m³) e a maior dispersão absoluta e relativa. Seu desvio padrão (0,290 µg/m³) é mais que o dobro do observado na maioria dos outros DCs, e sua amplitude total atinge 2,634 µg/m³. A diferença entre o percentil 75 (0,567 µg/m³) e o máximo (2,874

µg/m³) sugere a presença de *outliers* significativos, indicando que a poluição por NOx nesta região não é uniforme, mas concentrada em focos específicos de alta intensidade.

Os DCs Tropical e Subtropical apresentam comportamentos distintos: o Tropical exibe uma mediana moderada (0,388 µg/m³), mas uma amplitude elevada (1,919 µg/m³) e um máximo de 2,117 µg/m³, configurando uma distribuição com cauda longa à direita, típica de regiões com grandes disparidades entre áreas rurais e centros urbanos densos (Squizzato *et al.*, 2021; He; Schäfer; Beck, 2022). Já o Subtropical, apesar de ter uma mediana ligeiramente superior (0,390 µg/m³), mostra-se mais homogêneo, com amplitude total de apenas 0,676 µg/m³ e um AIQ muito reduzido (0,060 µg/m³), indicando que a maioria dos dados está concentrada em torno da mediana, sem os picos extremos observados no domínio Tropical.

Os domínios Árido e Semiárido caracterizam-se pela maior estabilidade estatística. O Árido registrou o menor desvio padrão (0,035 µg/m³) e a menor amplitude (0,144 µg/m³) de todo o conjunto, com média (0,260 µg/m³) e mediana (0,250 µg/m³) praticamente coincidentes, o que denota uma distribuição simétrica e espacialmente uniforme. O Semiárido segue padrão semelhante, com baixo AIQ (0,061 µg/m³), reforçando a ausência de fontes emissoras pontuais relevantes nessas regiões.

Por fim, o Temperado apresentou indicadores de tendência central elevados (Média: 0,473 µg/m³; Mediana: 0,424 µg/m³), comparáveis aos do domínio Tropical Ameno. Contudo, a interpretação desses dados exige cautela devido à amostragem extremamente reduzida (apenas 9 *pixels* válidos). A baixa amplitude (0,412 µg/m³) e o menor AIQ de todo o estudo (0,022 µg/m³) sugerem uma alta consistência interna nos dados coletados, mas a representatividade espacial é limitada, impedindo generalizações robustas sobre a variabilidade regional neste domínio específico.

Em suma, embora todos os valores situem-se em patamares baixos de concentração absoluta, a estatística descritiva evidencia que a "poluição de fundo" por NOx no Brasil não é homogênea. Ela varia de regimes extremamente estáveis e uniformes (Árido/Semiárido) a regimes assimétricos e influenciados por picos locais (Tropical/Tropical Ameno), refletindo diretamente os diferentes padrões de ocupação e atividade antrópica sobre o território.

O mapeamento do perfil geográfico de [NOx] é apresentado na Figura 13. A leitura refere-se ao macroclima; no sítio da obra, o tráfego e polos industriais concentram o agente em escala local.

Figura 13 – Mapa do perfil geográfico da concentração de óxidos de nitrogênio ([NOx])



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.7 **Perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre**

O perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre ([SOx]) parte da premissa de que o dióxido de enxofre (SO_2) atua como um dos principais agentes de

agressividade química em ambientes não marinhos (Mainier *et al.*, 2015). A interação deste gás com materiais cimentícios ocorre primariamente através de dois mecanismos deletérios simultâneos (Niu *et al.*, 2020): o ataque ácido direto pela formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e a sulfatação externa, que resulta na geração de produtos expansivos e solúveis (Feng *et al.*, 2015; Yang; Zhou, 2021; Yin *et al.*, 2023).

Para definir os intervalos, utiliza-se como referência primária a classificação de corrosividade atmosférica da norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012). Embora desenvolvida para metais, a norma estabelece parâmetros ambientais (incluindo concentração de SO_2) que definem classes de corrosividade em ambientes caracterizados por umidade relativa, temperatura, deposição de poluentes e concentração de SO_2, constituindo um indicador validado para a agressividade ao CA/CP (DURACON Collaboration (O Trocónis de Rincón and Coauthors), 2006; de Rincón; DURACON Collaboration (O Troconis de Rincón and Coauthors), 2013; Ozkan *et al.*, 2023). O Quadro 32 apresenta a classificação normativa adaptada utilizada como base para este estudo, sendo que, para as faixas do perfil geográfico de [SOx] são utilizadas as informações da coluna "Concentração de SO_2 (P_c) (µg/m³)".

Quadro 32 – Classificação de poluição por dióxido de enxofre (SO_2)

Categoria	**Tipo de atmosfera**	**Taxa de deposição de SO_2 (P_d) (mg/m²/dia)**	**Concentração de SO_2 (P_c) (µg/m³)**
P_0	Atmosfera Rural	$P_d \leq 4$	$P_c \leq 5$
P_1	Atmosfera Urbana	$4 < P_d \leq 24$	$5 < P_c \leq 30$
P_2	Atmosfera Industrial	$24 < P_d \leq 80$	$30 < P_c \leq 90$
P_3	Atmosfera Industrial Altamente Poluída	$80 < P_d \leq 200$	$90 < P_c \leq 250$
NOTA Valores referentes à média anual.			

Fonte: Adaptado de *ISO* 9223 (*ISO*, 2012).

Concentrações inferiores a 5 µg/m³ ([SOx] ≤ 5 µg/m³) representam o nível de fundo natural, típico de ambientes rurais (Categoria P_0 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012) – Quadro 32). Sob estas condições, a deposição de SO_2 é insuficiente para superar a capacidade de tamponamento químico da pasta de cimento (Niu *et al.*, 2020; Zhang, Chuanchuan *et al.*, 2024).

A reserva alcalina do concreto (portlandita) neutraliza as baixas deposições ácidas sem que haja formação cristalina de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) em volume capaz de gerar tensões internas ou aumento de porosidade (Tang *et al.*, 2019; Niu *et al.*, 2020; Zhang, Chuanchuan *et al.*, 2024). Estudos de exposição de longo prazo indicam que a taxa de carbonatação nestes ambientes é governada predominantemente pela difusão de CO_2, com contribuição minoritária dos compostos de enxofre (Chen; Liu; Yu, 2018; Mahmood; Khan; Ayub, 2022).

O intervalo entre 5 e 30 µg/m³ ($5 < [SOx] \leq 30$ µg/m³) marca a transição para atmosferas urbanas com influência antrópica (Categoria P_1) (*ISO*, 2012). Nesta faixa, embora o ataque ácido severo não seja iminente, o SO_2 contribui na degradação (Mainier *et al.*, 2015; Niu *et al.*, 2020; Zhang, Chuanchuan *et al.*, 2024). A dissolução do SO_2 na película de água superficial reduz o pH local, potencialmente acelerando a lixiviação de compostos de cálcio da pasta de cimento (Min; Song, 2018; Chen *et al.*, 2021).

Além disso, a presença de sulfatos na superfície pode interagir com o aluminato tricálcico (C3A) hidratado, iniciando a formação localizada de etringita secundária, sendo menos agressiva em concretos de baixa permeabilidade (coeficiente de permeabilidade < 10^{-16} m²/s) (Kim *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022). O risco principal reside na redução da durabilidade da camada de cobrimento em concretos de relação a/c > 0,60, onde a sulfatação superficial pode potencialmente acelerar o avanço da frente de carbonatação (Kewalramani; Khartabil, 2021; Lopes; Oliveira; Cascudo, 2021; Yu; Guo; Li, 2022).

A faixa Vermelha ([SOx] > 30 µg/m³) compreende dois regimes de severidade industrial. No primeiro (30 a 90 µg/m³, categoria P_2 (*ISO*, 2012)), a formação de gipsita torna-se o mecanismo dominante de degradação superficial (Pozo-Antonio *et al.*, 2022), com substituição da pasta de cimento coesa por gipsita de baixa resistência (Shen *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2021). Em áreas protegidas da chuva, acumulam-se crostas escuras de gipsita e carbono elementar (Perez-Monserrat *et al.*, 2016; Pozo-Antonio *et al.*, 2022) que mantêm a superfície úmida e potencializam ciclos de dissolução e recristalização (Popovicheva *et al.*, 2008; Tian; Han, 2017; Guo *et al.*, 2021).

No segundo regime (> 90 µg/m³, categoria P_3), o ataque ácido consome rapidamente os compostos cimentícios, dissolvendo a Portlandita e atacando o C-S-H, com perda severa de massa e coesão (Anwar; Liu; Zhang, 2023; Hilbig; Gutberlet;

Beddoe, 2024; Kumar Poloju *et al.*, 2025). A redução do pH abaixo de 11 despassiva as armaduras, iniciando corrosão acelerada e generalizada (Wang, Lingbo *et al.*, 2019; Ji *et al.*, 2020; Sampaio; Bastos; Ferreira, 2022). Estruturas expostas demandam proteção superficial adicional (Asaad *et al.*, 2020; Nasir *et al.*, 2021; Kumar Poloju *et al.*, 2025).

O Quadro 33 sintetiza o perfil geográfico proposto, consolidando os intervalos normativos com as consequências físico-químicas discutidas.

Quadro 33 – Perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre ([SOx])

Faixa proposta ([SOx] em µg/m³)	**Classe interpretativa**	**Justificativa e implicações**
[SOx] ≤ 5		Nível de fundo natural (categoria P_0 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)), típico de atmosferas rurais. A deposição de SO_2 é insuficiente para superar a capacidade de tamponamento químico da pasta de cimento. A Portlandita neutraliza as baixas deposições ácidas sem formação de gipsita em volume crítico. A carbonatação segue a cinética natural por difusão de CO_2, sem aceleração por compostos de enxofre.
5 < [SOx] ≤ 30		Atmosferas urbanas com influência antrópica (categoria P_1 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)). Início da contribuição do SO_2 na degradação superficial: a dissolução do gás na película de água reduz o pH local, podendo acelerar a lixiviação de cálcio e, em concretos de relação a/c > 0,60, antecipar o avanço da frente de carbonatação. A formação de etringita secundária é localizada e menos relevante em concretos de baixa permeabilidade.
[SOx] > 30		Ambientes industriais com carga de poluentes capaz de gerar ataque ácido mensurável (categoria P_2) a severo (categoria P_3), conforme *ISO* 9223 (*ISO*, 2012). Em concentrações entre 30 e 90 µg/m³, a formação de gipsita torna-se o mecanismo dominante, com substituição da pasta coesa por gipsita de baixa resistência e formação de crostas escuras (gipsita + fuligem) em zonas não lavadas pela chuva, que potencializam ciclos de dissolução e recristalização. Acima de 90 µg/m³, o ataque ácido consome rapidamente os compostos cimentícios, dissolvendo a Portlandita e atacando o C-S-H, com perda severa de massa e coesão. A redução do pH abaixo de 11 despassiva as armaduras, iniciando corrosão acelerada. Exige proteção superficial adicional.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise espacializada da concentração de dióxido de enxofre revela uma dicotomia entre os domínios associados à ocupação industrial densa e aqueles predominantemente naturais ou agrários. O Quadro 34 apresenta as estatísticas descritivas segregadas por DC, evidenciando como a antropização do território se sobrepõe às características puramente climáticas na definição da agressividade por SO_2.

Quadro 34 – Estatísticas descritivas de [SOx] por DC

Domínio climático	*Pixels* Válidos	Média (µg/m³)	Mediana (µg/m³)	Desvio padrão (µg/m³)	CV (%)	Mínimo (µg/m³)	Máximo (µg/m³)	Amplitude (µg/m³)	P25 (µg/m³)	P75 (µg/m³)	AIQ (µg/m³)
Árido	136	3,478	2,953	1,252	36,01	2,008	7,179	5,171	2,551	4,212	1,662
Equatorial	6.048	2,281	2,221	0,777	34,04	1,029	5,432	4,403	1,608	2,883	1,275
Equatorial Ameno	84	2,239	1,333	1,205	53,82	1,033	4,109	3,076	1,133	3,650	2,516
Semiárido	333	3,284	3,013	0,932	28,38	2,104	6,759	4,655	2,625	3,690	1,065
Subtropical	3	3,836	2,984	1,520	39,62	2,934	5,592	2,657	2,959	4,288	1,329
Temperado	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tropical	2.685	3,787	3,695	0,744	19,65	2,132	7,902	5,770	3,252	4,253	1,001
Tropical Ameno	56	4,332	4,309	1,123	25,93	2,726	6,731	4,005	3,155	4,878	1,723

Notas:

1. Os valores representam a concentração de SO_2 na Camada Limite Planetária (*PBL – Planetary Boundary Layer*) (0-2 km de altitude) no período 2004-2025, obtidos a partir do produto *NASA OMI* (*Ozone Monitoring Instrument*) com resolução espacial de 0,25° × 0,25° (Li; Krotkov; Leonard, 2012). O número de pixels válidos refere-se às células da grade espacial com dados disponíveis em cada domínio climático após aplicação dos critérios de qualidade (remoção de valores negativos, preenchimento e cobertura de nuvens).
2. O domínio Temperado não apresentou *pixels* válidos devido à sua reduzida extensão territorial e à resolução espacial do produto *NASA OMI* (aproximadamente 28 km × 28 km no equador) (Li; Krotkov; Leonard, 2012). Para fins de análise subsequente, as concentrações do domínio Subtropical serão utilizadas para o Temperado, dada a contiguidade geográfica, similaridade climática (invernos rigorosos, influência de massas de ar polar) e padrões de circulação atmosférica compartilhados entre esses domínios.
3. A concentração de óxidos de enxofre (SOx) é representada pelo SO_2 porque este é o óxido predominante emitido por fontes antrópicas (combustão de combustíveis fósseis, processos industriais) e naturais (vulcões, oxidação de compostos sulfurados biogênicos). O SO_3 (trióxido de enxofre) é rapidamente convertido em H_2SO_4 (ácido sulfúrico) na presença de umidade atmosférica, não permanecendo em concentrações significativas na troposfera.
4. A *PBL* é selecionada por representar a porção da atmosfera mais próxima à superfície terrestre, onde ocorre a interação direta com materiais de construção e a deposição ácida sobre edificações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os DCs Tropical Ameno e Subtropical apresentaram as maiores médias de concentração, com 4,332 µg/m³ e 3,84 µg/m³, respectivamente. Este comportamento é esperado, visto que estes domínios abrigam as maiores manchas urbanas e parques industriais das regiões Sudeste e Sul do Brasil (CNI, 2017; Guimarães, 2022; Hoinaski; Will; Ribeiro, 2024). A queima de combustíveis fósseis no transporte e na indústria, aliada à topografia de "mares de morros" do Tropical Ameno que dificulta a dispersão de poluentes em períodos de estabilidade atmosférica, contribui para estes patamares. Ainda assim, observa-se que mesmo as médias destas regiões mais impactadas permanecem na faixa Verde ([SOx] ≤ 5,0 µg/m³) (Quadro 33) da classificação proposta, indicando que a agressividade média regional não atinge níveis críticos de corrosão atmosférica generalizada.

Em contraste, os domínios Equatorial e Equatorial Ameno exibem as menores médias (2,281 µg/m³ e 2,239 µg/m³, respectivamente), refletindo a condição de fundo natural da região Amazônica. Nestas áreas, as fontes de enxofre são majoritariamente biogênicas ou episódicas, associadas a queimadas sazonais, resultando em

concentrações basais reduzidas na maior parte do tempo. Contudo, o elevado CV do Equatorial Ameno (53,82%) sugere a existência de *hotspots* locais — prováveis zonas de atividade extrativista ou desmatamento — que destoam significativamente da linha de base da floresta preservada.

O domínio Tropical, embora apresente uma média intermediária (3,787 µg/m³), registrou o maior valor máximo absoluto de toda a série (7,902 µg/m³). Este dado alerta para a existência de microrregiões com concentrações pontuais superiores, onde a interação entre a umidade elevada típica do clima tropical e os picos de poluentes pode acelerar mecanismos de degradação superficial, independentemente da média regional ser moderada.

O domínio Temperado não apresentou *pixels* válidos na resolução do sensor OMI (Li; Krotkov; Leonard, 2012) para o recorte temporal analisado. Esta lacuna deve-se à combinação entre a reduzida extensão territorial deste domínio e a resolução espacial da grade do satélite (0,25° × 0,25°), que dificulta a amostragem em áreas fragmentadas ou com frequente cobertura de nuvens. Diante desta limitação técnica, opta-se por adotar os parâmetros estatísticos do domínio Subtropical como representativos para o Temperado nas análises subsequentes. Esta extrapolação fundamenta-se na contiguidade geográfica entre as regiões e na similaridade dos padrões de circulação atmosférica e influência de massas de ar polar que ambos compartilham.

Em síntese, a estatística descritiva confirma que, em escala regional, o Brasil apresenta predominantemente baixas concentrações de sulfatação atmosférica. A agressividade por ataque de SO_2 não se manifesta como uma constante climática distribuída uniformemente, mas sim como um fenômeno localizado, fortemente correlacionado à densidade industrial e urbana dos domínios Tropical Ameno, Subtropical e Tropical.

A Figura 14 ilustra a distribuição territorial do perfil geográfico de [SOx]. A leitura refere-se ao macroclima; no sítio da obra, polos industriais e termelétricas podem concentrar o agente no entorno.

Figura 14 – Mapa do perfil geográfico da concentração de óxidos de enxofre ([SOx])



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.8 **Perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico**

Para a construção do perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico ([SO_4^{2-}]), adota-se a mesma base normativa utilizada para a concentração de óxidos de enxofre ([SOx]), fundamentada na norma internacional ISO 9223 (*ISO*, 2012) (*Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation*).

Diferentemente da abordagem adotada para a [SOx], onde se utilizou as informações da coluna “Concentração de SO_2 (P_c) (µg/m³)” do Quadro 32, para o

sulfato particulado a classificação baseia-se na coluna de “Taxa de deposição de SO_2 (P_d) (mg/m²/dia)”. Essa escolha justifica-se pelo fato de o *MERRA-2* fornecer o fluxo de massa total de sulfato depositado (soma das deposições seca e úmida) (*GMAO*, 2015; Randles *et al.*, 2017), grandeza que, embora represente uma espécie química distinta do SO_2 gasoso, é fisicamente análoga à taxa de deposição monitorada pela *ISO* 9223 (*ISO*, 2012; Lemon, 2012; Randles *et al.*, 2017; Wang, Junfeng *et al.*, 2020; Hardacre *et al.*, 2021). Assim, os dados do *MERRA-2* (*GMAO*, 2015) são adotados como um *proxy* para a estimativa do parâmetro P_d (Gelaro *et al.*, 2017; Randles *et al.*, 2017), permitindo o enquadramento nas categorias de corrosividade da norma a partir do aporte total de enxofre particulado à superfície (*ISO*, 2012; Santucci; Davis; Sanders, 2022).

O perfil geográfico (Quadro 35) mantém a correspondência direta com as categorias de agressividade da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012) (P_0 a P_3 – Quadro 32), detalhando as consequências para a durabilidade do CA/CP com base na intensidade do fluxo de deposição:

i) Faixa Verde ($[SO_4^{2-}] \leq 4$ mg/m²/dia): corresponde à categoria P_0 (Atmosfera Rural). Neste nível de fundo, a taxa de deposição é inferior à capacidade de lavagem natural pela chuva (Ge *et al.*, 2021; Wang; Xia; Zhang, 2021; Zhou, Xin *et al.*, 2022). O sulfato depositado não atinge concentrações suficientes na superfície do concreto para iniciar reações com os aluminatos da pasta de cimento (Clifton; Pommersheim, 1994; Chen, Weifeng *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Dobrovolski, 2021).

ii) Faixa Amarela ($4 < [SO_4^{2-}] \leq 24$ mg/m²/dia): corresponde à categoria P_1 (Atmosfera Urbana). A deposição permite o acúmulo de partículas sulfatadas em zonas protegidas da chuva ou em superfícies rugosas (Guo *et al.*, 2023). Na presença de umidade, esse acúmulo pode solubilizar-se, reagindo superficialmente com o hidróxido de cálcio (portlandita) para formar gipsita, manifestando-se como eflorescências sem penetração na matriz (Tian; Cohen, 2000; Liu, Fang *et al.*, 2021; Maranhão; Júnior; Oliveira, 2022).

iii) Faixa Vermelha ($[SO_4^{2-}] > 24$ mg/m²/dia): corresponde à categoria P_2 (Atmosfera Industrial) e à P_3 (Atmosfera Industrial Severa). Entre 24 e 80 mg/m²/dia, o fluxo de deposição estabelece um aporte químico contínuo (*ISO*, 2012; Tian; Han, 2017). Ciclos de umedecimento e secagem concentram a solução nos poros capilares, permitindo a migração de íons sulfato para o

interior do cobrimento (Zhao *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2023), favorecendo a formação expansiva de etringita secundária capaz de microfissurar o concreto (Clifton; Pommersheim, 1994; Chen, Weifeng *et al.*, 2020). Acima de 80 mg/m²/dia, o ataque ácido acelera a dissolução do C-S-H, com expansão volumétrica significativa, fissuração generalizada e exposição das armaduras à corrosão direta (Hill *et al.*, 2003; Tian; Han, 2017; Ndahirwa; Qiao; Mahame, 2018; Zhang, Chuanchuan *et al.*, 2024).

Quadro 35 – Perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico ($[SO_4^{2-}]$)

Faixa proposta ($[SO_4^{2-}]$ em mg/m²/dia [a])	**Classe interpretativa**	**Justificativa e implicações**
$[SO_4^{2-}] \leq 4$		Nível de fundo natural (categoria P_0 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)), típico de atmosferas rurais. A taxa de deposição é inferior à capacidade de lavagem natural pela chuva, não atingindo concentrações suficientes na superfície do concreto para iniciar reações com os aluminatos da pasta de cimento. Risco insignificante de ataque químico.
$4 < [SO_4^{2-}] \leq 24$		Atmosferas urbanas (categoria P_1 da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012)). A deposição permite o acúmulo de partículas sulfatadas em zonas protegidas da chuva. Na presença de umidade, esse acúmulo pode solubilizar-se e reagir superficialmente com a Portlandita, formando gipsita que se manifesta como eflorescências sem penetração na matriz. Risco moderado, sem comprometimento estrutural imediato.
$[SO_4^{2-}] > 24$		Ambientes industriais com carga química contínua sobre a estrutura (categoria P_2) a severa (categoria P_3), conforme *ISO* 9223 (*ISO*, 2012). Entre 24 e 80 mg/m²/dia, a deposição contínua e os ciclos de umedecimento e secagem concentram a solução nos poros, favorecendo a formação expansiva de etringita secundária e gipsita, com microfissuração e perda de massa da pasta. Acima de 80 mg/m²/dia, o ataque ácido acelera a dissolução do C-S-H, com expansão volumétrica significativa, fissuração generalizada, desplacamento do cobrimento e exposição das armaduras à corrosão direta. Exige proteção superficial adicional.
[a] Taxa de deposição atmosférica (mg/m²/dia): quantidade total de sulfatos (provenientes de emissões antropogênicas, vulcânicas e aerossóis naturais) que se deposita sobre uma superfície horizontal exposta, por unidade de área e tempo (soma das deposições seca e úmida). Representa a intensidade da carga química de enxofre particulado que a estrutura recebe do ambiente.		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 36 contém as estatísticas descritivas para a taxa de deposição total de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), expressa em mg/m²/dia, resultante da integração das componentes seca e úmida do modelo *MERRA-2* (2000–2024) (*GMAO*, 2015) (procedimento análogo ao utilizado para a montagem do perfil geográfico de $[SO_4^{2-}]$ – Quadro 35).

Quadro 36 – Estatísticas descritivas de [SO_4^{2-}] por DC

Domínio climático	*Pixels* Válidos	Média (mg/m²/dia)	Mediana (mg/m²/dia)	Desvio padrão (mg/m²/dia)	CV (%)	Mínimo (mg/m²/dia)	Máximo (mg/m²/dia)	Amplitude (mg/m²/dia)	P25 (mg/m²/dia)	P75 (mg/m²/dia)	AIQ (mg/m²/dia)
Árido	22	0,753	0,685	0,283	37,60	0,424	1,560	1,136	0,527	0,916	0,389
Equatorial	1.212	0,573	0,565	0,166	29,02	0,141	2,038	1,897	0,472	0,679	0,206
Equatorial Ameno	17	0,579	0,512	0,217	37,54	0,348	1,144	0,797	0,401	0,719	0,317
Semiárido	74	0,783	0,647	0,395	50,53	0,358	2,346	1,988	0,532	0,806	0,274
Subtropical	130	2,265	1,917	1,012	44,68	1,336	6,927	5,591	1,662	2,454	0,792
Temperado	1	2,805	2,805	-	-	2,805	2,805	0,000	2,805	2,805	0
Tropical	706	0,780	0,651	0,483	61,98	0,353	6,076	5,723	0,550	0,806	0,255
Tropical Ameno	106	2,004	1,459	1,483	74,01	0,425	8,504	8,079	1,150	2,424	1,274

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se uma heterogeneidade espacial na carga de sulfato, com os domínios Temperado, Subtropical e Tropical Ameno formando um grupo distinto de maior exposição. As taxas de deposição nessas regiões variam entre 2,000 e 2,800 mg/m²/dia, valores que representam um patamar de agressividade aproximadamente três a quatro vezes superior ao observado no restante do país, onde domínios como o Equatorial e o Árido mantêm médias inferiores a 0,80 mg/m²/dia, caracterizando um ambiente de deposição de fundo reduzida.

O domínio Tropical Ameno destaca-se pela média elevada e pela maior irregularidade da série (CV = 74,01 %), indicando que a estrutura de CA/CP nesta região não está sujeita necessariamente a uma carga constante, mas sim a flutuações intensas que resultam em picos de até 8,504 mg/m²/dia. Esse comportamento contrasta com a dinâmica do Subtropical, que, embora também apresente média elevada, possui uma variabilidade menor (CV = 44,68 %), sugerindo uma exposição mais contínua e menos sujeita a eventos extremos esporádicos.

Enquanto no DC Equatorial a dispersão dos dados centrais é mínima (AIQ = 0,206 mg/m²/dia) e os máximos ultrapassam pouco os 2,000 mg/m²/dia, nos domínios do Sul e Sudeste a dispersão é ampla, com o Tropical Ameno apresentando uma AIQ seis vezes maior. Isso implica que, para fins de projeto e durabilidade, a consideração apenas da média pode subestimar o risco real nessas regiões de maior variabilidade, onde os períodos de pico (representados pelos máximos de 6,927 mg/m²/dia no Subtropical a 8,504 mg/m²/dia no Tropical Ameno) impõem condições de agressividade temporária muito superiores ao padrão médio nacional.

Em síntese, os dados permitem segmentar o território em dois macroambientes de deposição de sulfato: um cenário de baixa agressividade e alta estabilidade, predominante nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste (domínios Equatorial, Árido, Semiárido e Tropical), e um cenário de maior agressividade e variabilidade, concentrado nos domínios Subtropical e Tropical Ameno, onde a combinação de médias mais altas e picos intensos demanda maior atenção quanto aos mecanismos de degradação química.

A espacialização do perfil geográfico de [SO_4^{2-}] sobre os domínios climáticos é demonstrada na Figura 15. A leitura refere-se ao macroclima; no sítio da obra, polos industriais e termelétricas podem concentrar a deposição de sulfato no entorno.

Figura 15 – Mapa do perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico ([SO_4^{2-}])



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 LEITURA COMBINADA DOS PERFIS GEOGRÁFICOS POR DC

O Quadro 37 reúne a classificação individual de cada variável geográfica por domínio climático. Diferentemente das seções 5.1.1 Perfil geográfico da temperatura a 5.1.8 Perfil geográfico da deposição total de sulfato particulado atmosférico, que discutem cada variável isoladamente, a leitura transversal aqui apresentada identifica padrões de composição que emergem da sobreposição dos perfis — e o que cada padrão implica em termos de mecanismos de degradação predominantes.

Os perfis refletem a série histórica 2000–2025. Dados macroclimáticos são mutáveis em cenários de mudanças climáticas, e esta leitura não constitui condição definitiva de exposição.

Quadro 37 – Perfil das variáveis geográficas por DC

	Classe interpretativa do perfil							
Domínio climático / **Variável geográfica**	**Árido**	**Equatorial**	**Equatorial Ameno**	**Semiárido**	**Subtropical**	**Temperado**	**Tropical**	**Tropical Ameno**
T								
ΔT [a]								
UR								
i_{prec}								
$[CO_2]$								
$[Cl^-]$								
[NOx]								
[SOx]								
$[SO_4^{2-}]$								

[a] Subvariável, componente de T.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da leitura transversal, dois padrões de composição se distinguem:

i) Grupo 1 — Domínios com saturação dos poros (Subtropical, Temperado, Equatorial Ameno): estes três domínios compartilham UR = Vermelha, condição que mantém os poros do concreto saturados de forma permanente. A diferença interna está na carga química. No Subtropical e no Temperado, a saturação dos poros fornece o eletrólito para a corrosão, e a disponibilidade de cloretos em classe Amarela elimina a etapa de iniciação por carbonatação como pré-requisito — o ataque por pites pode instalar-se diretamente na armadura sempre que o cobrimento for transposto (Alonso; Castellote; Andrade, 2002). No Equatorial Ameno, à exceção do $[CO_2]$ (Amarela, condição comum a todos os domínios), as demais variáveis químicas situam-se em Verde, redirecionando o mecanismo dominante para a carbonatação em ambiente de baixa resistividade. A qualidade do concreto (relação a/c, cura,

cobrimento) é, neste domínio, o fator determinante de durabilidade (Saetta; Scotta; Vitaliani, 1993).

ii) Grupo 2 — Domínios de estresse termofísico com restrição eletrolítica (Equatorial, Semiárido, Árido, Tropical, Tropical Ameno): a característica comum é T = Amarela e perfil químico baixo ([Cl^-] e demais agentes em Amarela ou Verde). A temperatura elevada acelera a difusão iônica, relação amplamente estabelecida na literatura de durabilidade. A diferenciação interna do grupo está na amplitude térmica e na disponibilidade de água. No Semiárido, no Árido e no Tropical, ΔT = Amarela introduz fadiga cíclica na matriz cimentícia, com ciclos de expansão e contração que podem gerar microfissuração na zona de cobrimento (Peng *et al.*, 2025). No Equatorial e no Tropical Ameno, ΔT = Verde – a menor amplitude reduz o potencial de fadiga térmica. Quanto à umidade, Equatorial, Tropical e Tropical Ameno compartilham UR = Amarela e i_{prec} = Amarela, mantendo água disponível para carbonatação e transporte de agentes. No Semiárido e no Árido, i_{prec} = Verde e UR = Amarela com T = Amarela criam o paradoxo da carbonatação acelerada: a cinética da reação CO_2–$Ca(OH)_2$ é mais rápida em UR entre 50 % e 70 %, mas a escassez de água líquida limita a propagação da corrosão mesmo após a frente de carbonatação atingir a armadura. A manifestação patológica dominante nestes dois domínios é a fissuração por fadiga térmica e a perda de seção por carbonatação, não a corrosão ativa.

O Quadro 37 revela, portanto, que os perfis macroclimáticos se organizam em dois padrões fundamentalmente distintos de exigência de durabilidade. O reconhecimento destes padrões não substitui a avaliação microclimática prevista na NBR 6118 (ABNT, 2023b), mas oferece subsídio para que futuras revisões normativas considerem que a agressividade ambiental no território brasileiro não é uniforme nem hierarquizável por um único indicador – é regionalmente composta por combinações específicas de variáveis que exigem estratégias igualmente específicas de projeto.

5.3 COMPARAÇÃO COM A NORMA E SUBSÍDIOS PARA REVISÃO NORMATIVA

A comparação entre os perfis geográficos e as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2023b) seguiu o método da seção 4.6, em quatro etapas. Primeiro, tomou-se o perfil das variáveis geográficas de cada DC, consolidado no Quadro 37. Em seguida,

selecionaram-se as variáveis em classe Amarela ou Vermelha, por representarem as condições de maior atenção à durabilidade. Na terceira etapa, verificou-se, para cada variável selecionada, se a tipologia normativa de enquadramento (rural, urbana, marinha, industrial) a contempla. Por fim, registrou-se o ponto de agregação – a condição cuja severidade a tipologia não expressa.

O Quadro 38 apresenta o resultado dessa aplicação. As variáveis [NOx], [SOx] e [SO_4^{2-}], integralmente em classe Verde no Quadro 37, não entraram na seleção. O [CO_2], embora Amarela em todos os DCs, tampouco é contemplado: a tipologia sinaliza poluentes locais (urbana, industrial), não a concentração de fundo do gás (von Greve-Dierfeld *et al.*, 2020).

Quadro 38 – Comparação entre as variáveis selecionadas dos perfis geográficos e a tipologia normativa da NBR 6118 (ABNT, 2023b)

Domínio Climático	**Variáveis em classe Amarela/Vermelha (Quadro 37)**	**Tipologia normativa que as contempla**	**Ponto de agregação**
Árido	T, ΔT, UR, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	T, ΔT e UR não contempladas
Equatorial	T, UR, i_{prec}, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	T, UR e i_{prec} não contempladas
Equatorial Ameno	T, UR, i_{prec}, [CO_2]	-	UR (Vermelha), T e i_{prec} não contempladas
Semiárido	T, ΔT, UR, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	T, ΔT e UR não contempladas
Subtropical	UR, i_{prec}, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	UR (Vermelha) e i_{prec} não contempladas
Temperado	UR, i_{prec}, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	UR (Vermelha) e i_{prec} não contempladas
Tropical	T, ΔT, UR, i_{prec}, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	T, ΔT, UR e i_{prec} não contempladas
Tropical Ameno	T, UR, i_{prec}, [CO_2], [Cl^-]	[Cl^-] (Marinha, CAA III)	T, UR e i_{prec} não contempladas

Fonte: Elaborado pelo autor.

A leitura do Quadro 38 evidencia que as variáveis termodinâmicas – T, ΔT, UR e i_{prec} –, quando em classe Amarela ou Vermelha, não são expressas pela tipologia normativa em nenhum dos oito DCs. A NBR 6118 (ABNT, 2023b) enquadra a agressividade pela natureza da região de alocação, critério que sinaliza a presença de agentes como cloretos e poluentes atmosféricos, mas que não quantifica a carga térmica nem o regime de umidade do macroambiente. Essa distinção não indica inadequação da norma, mas uma diferença de escala de análise: a tipologia opera no nível microambiental, enquanto os perfis geográficos agregam a leitura macroclimática.

Nos DCs do Grupo 1 (Subtropical, Temperado e Equatorial Ameno), a UR em classe Vermelha indica saturação de poros, condição que mantém o eletrólito e favorece a progressão da corrosão (Stefanoni; Angst; Elsener, 2018). A tipologia, ao não adotar a umidade relativa como critério, deixa de expressar essa condição. No Equatorial Ameno, soma-se a temperatura em classe Amarela, que acelera a cinética das reações de degradação (*ACI*, 2020; Cantor, 2020b).

Nos DCs do Grupo 2 (Equatorial, Semiárido, Árido, Tropical e Tropical Ameno), a temperatura em classe Amarela impõe carga térmica moderada, igualmente fora do escopo da tipologia. O [Cl^-] em classe Amarela, presente na maioria desses domínios, indica deposição de cloretos mesmo em áreas não costeiras – condição que a literatura associa à ressuspensão eólica de sais de solos salinos (Khatei *et al.*, 2024) e ao transporte continental de sais por poeira (Pagot *et al.*, 2026) –, distinta da zona costeira que a classe marinha da norma contempla.

A própria NBR 6118 (ABNT, 2023b) reconhece a influência do clima sobre a agressividade. A nota b do Quadro 1 admite o abrandamento de uma classe em obras situadas em regiões de clima seco, com umidade relativa média do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva ou regiões onde raramente chove. De modo análogo, a nota a admite o abrandamento para ambientes internos, em que o microclima é mais brando. Essas disposições mostram que a norma já dialoga com o clima, ainda que de forma qualitativa e pontual, sem quantificar a carga térmica nem o regime de umidade do macroambiente. Os perfis geográficos podem subsidiar esse diálogo com dados quantitativos, ao indicarem, para cada DC, as variáveis termodinâmicas em classe Amarela ou Vermelha.

Duas ressalvas qualificam essa leitura. A primeira refere-se à escala: o microclima local pode amplificar ou atenuar a condição macroclimática. Uma ilha de calor urbana pode elevar a temperatura em relação à média do DC (Sismanidis *et al.*, 2026), assim como condições locais de maior umidade podem intensificar a saturação de poros. Os perfis geográficos descrevem a condição macroclimática de referência; a avaliação do microclima permanece necessária para o projeto específico. A segunda diz respeito à mutabilidade dos dados: os perfis refletem o período analisado e são passíveis de alteração em função das mudanças climáticas em curso (Feng *et al.*, 2024), não constituindo valores definitivos.

Nesse sentido, os perfis geográficos oferecem subsídios técnicos para futuras revisões normativas, ao apresentarem o perfil macroclimático atual do território

brasileiro. Não se propõe a substituição da NBR 6118 (ABNT, 2023b), mas o aporte de dados que possam apoiar o aperfeiçoamento contínuo das prescrições de durabilidade, em consonância com as alterações ambientais vivenciadas.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A investigação da agressividade macroclimática do território brasileiro, conduzida por meio de perfis geográficos independentes para cada indicador e articulada aos oito domínios climáticos definidos por Novais (2019), permitiu confrontar a leitura normativa vigente com o comportamento real das variáveis que governam a durabilidade do concreto armado e protendido. Dessa confrontação resultam conclusões que não se limitam a descrever os perfis, mas os interpretam à luz da norma e de suas lacunas.

6.1 CONCLUSÃO DO TRABALHO

Menos pelo cumprimento do roteiro metodológico e mais pelo que a espacialização individual dos indicadores revelou, os objetivos propostos foram alcançados: a agressividade não se distribui de forma homogênea pelo território nem acompanha, de modo direto, as tipologias de microambiente (rural, urbano, marinho e industrial) que a NBR 6118 (ABNT, 2023b) adota como critério de classificação. A opção por perfis independentes, sem a consolidação dos resultados em um único mapa, preservou a especificidade de cada indicador e evitou que a leitura macroclimática fosse mascarada por uma síntese única. Essa constatação responde ao problema que motivou o estudo – a lacuna entre a classificação qualitativa da norma e a agressividade observada em escala macroclimática – e indica que a norma, embora suficiente para os cenários que historicamente atendeu, carece de aperfeiçoamento diante das alterações climáticas em curso.

A leitura combinada dos perfis (seção 5.2 LEITURA COMBINADA DOS PERFIS GEOGRÁFICOS POR DC) permite afirmar que os domínios se organizam em dois comportamentos distintos. No primeiro, formado pelos domínios Subtropical, Temperado e Equatorial Ameno, a umidade relativa em classe alta/crítica mantém os poros saturados e fornece o eletrólito necessário à corrosão; nos domínios Subtropical e Temperado, a disponibilidade de cloretos em classe moderada habilita o ataque localizado, enquanto no Equatorial Ameno, com as variáveis químicas em classe baixa/insignificante, o mecanismo dominante recai sobre a carbonatação. No segundo, formado pelos domínios Equatorial, Semiárido, Árido, Tropical e Tropical

Ameno, a temperatura em classe moderada acelera a difusão iônica, e a amplitude térmica em classe moderada, presente nos domínios Semiárido, Árido e Tropical, introduz fadiga cíclica na matriz cimentícia. A influência antrópica, por sua vez, eleva as concentrações de [NOx] e [SOx] em centros urbanos, mas não desloca a linha de base macroclimática, que permanece definida pela agressividade natural do território.

Esses resultados sustentam a conclusão de que o macroclima brasileiro é, em ampla medida, mais agressivo do que as tipologias de microambiente da norma pressupõem. Não se trata, contudo, de invalidar a norma: trata-se de reconhecer que a classificação qualitativa vigente não captura a intensidade dos indicadores termodinâmicos e químicos que os perfis geográficos quantificam. O microclima do sítio pode minimizar ou maximizar essa agressividade, conforme a condição local da obra, de modo que a leitura macroclimática deve ser associada à avaliação do microclima na definição da agressividade de cada empreendimento.

No plano empírico, o estudo oferece uma base quantitativa de perfis geográficos por variável para todo o território, articulada aos domínios climáticos, que complementa a classificação qualitativa da norma; no plano metodológico, consolida um procedimento qualiquantitativo replicável, apoiado em dados de estações meteorológicas e de sensoriamento remoto; e, no plano normativo, sistematiza subsídios técnicos para a revisão normativa futura, organizados no Quadro 39.

Quadro 39 – Diretrizes propositivas para revisão da NBR 6118 (ABNT, 2023b) baseadas no macroclima brasileiro

Parâmetro normativo atual (NBR 6118 (ABNT, 2023b))	**Diagnóstico da pesquisa (perfis geográficos)**	**Proposta de revisão normativa**
Tipologias de microambiente (Rural, Urbano, Marinho, Industrial) como critério principal	Os perfis geográficos revelam agressividade macroclimática distinta da prevista pelas tipologias de microambiente da norma	Incorporar o macroclima (DCs) como fator complementar de classificação, utilizando os perfis geográficos como referência para a linha de base da agressividade
A norma não estabelece limites quantitativos para temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR)	A combinação entre alta T e alta UR acelera a termodinâmica e a cinética das reações (ex.: domínios Equatorial e Tropical)	Adotar coeficientes de agravação climática para T e UR, ajustando a relação a/c e o cobrimento nominal (c_{nom}) conforme os percentis climáticos da região
A variável intensidade pluviométrica (i_{prec}) não é parametrizada para a durabilidade	A i_{prec} atua nos ciclos de molhagem e secagem e nos processos de lixiviação, afetando a integridade superficial do concreto	Incluir a i_{prec} como parâmetro para especificação de revestimentos protetores ou ajuste da compacidade do concreto em superfícies expostas
A amplitude térmica (ΔT) não é correlacionada à durabilidade do cobrimento	Variações de ΔT influenciam a microfissuração superficial (fadiga térmica), criando vias preferenciais para a penetração de agentes agressivos	Estabelecer critérios de controle de fissuração e protocolos de cura específicos para regiões com classe interpretativa alta/crítica para ΔT
A agressividade química é definida por tipologias qualitativas (Urbano, Industrial)	As concentrações ([NOx], [SOx], [CO_2]) e as taxas de deposição ([SO_4^{2-}]) variam independentemente da tipologia da zona	Adotar limites quantitativos de concentração e deposição de agentes agressivos para o enquadramento nas classes de agressividade
A agressividade marinha (CAA IV) utiliza o critério qualitativo de 'respingos de maré'	A deposição de íons cloreto ([Cl^-]) apresenta classes quantitativas de intensidade (*ISO* 9223 (*ISO*, 2012)), com níveis críticos além da zona de respingos	Adotar limites quantitativos de deposição de cloretos para delimitação das zonas de classe alta/crítica

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 39 não se limita a listar diretrizes: traduz o diagnóstico de cada indicador em uma proposta concreta de revisão. Para as variáveis termodinâmicas, que a norma não parametriza, propõe coeficientes de agravação climática para T e UR, a inclusão da i_{prec} na especificação de revestimentos protetores e critérios de controle de fissuração para regiões de classe alta/crítica em ΔT. Para as variáveis químicas, propõe a adoção de limites quantitativos de concentração e deposição de agentes agressivos, no lugar das tipologias qualitativas, e a delimitação das zonas de classe alta/crítica por limites de deposição de cloretos. Em conjunto, essas diretrizes indicam o caminho para que a norma incorpore o macroclima como fator complementar de classificação, sem renunciar à avaliação do microclima.

As limitações do estudo – a resolução da malha orbital dos produtos de sensoriamento remoto, o uso de *proxies* químicos para as variáveis geográficas químicas e a subjetividade inerente à definição das classes interpretativas – não comprometem as conclusões, apenas delimitam seu alcance e apontam para a

necessidade de validação em campo e de refinamento metodológico em trabalhos futuros.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas descobertas e limitações identificadas nesta pesquisa, sugerem-se as seguintes diretrizes para investigações futuras:

i) Validação patológica em campo: o mapeamento *in loco* de manifestações patológicas em estruturas de CA/CP distribuídas pelos oito domínios climáticos, correlacionando a frente de carbonatação e a penetração de cloretos com as classes previstas pelos perfis geográficos, permitiria confrontar a leitura macroclimática com a degradação real observada;

ii) Simulação e envelhecimento acelerado em laboratório: a reprodução dos ciclos termodinâmicos e químicos em câmaras climáticas, submetendo corpos de prova de CA/CP a ensaios acelerados que reproduzam as combinações de temperatura, umidade relativa e agentes agressivos mapeadas em cada domínio, permitiria validar a cinética de degradação prevista pelos perfis em condições controladas e em tempo reduzido;

iii) *Downscaling* climático: o refinamento da resolução espacial por meio de técnicas de redução de escala (*downscaling*) estatístico ou dinâmico aplicadas aos dados de satélite possibilitaria estender a análise a níveis intraurbanos, inferiores a 1 km, permitindo avaliar o efeito de ilhas de calor e de microclimas locais sobre a durabilidade;

iv) Análise de Ciclo de Vida e Custos (ACV/LCCA): comparação entre estruturas dimensionadas pelos parâmetros atuais da NBR 6118 (ABNT, 2023b) e estruturas dimensionadas com base nas exigências macroclimáticas, ao longo da vida útil de projeto (VUP), permitiria quantificar a economia potencial decorrente da redução de manutenções corretivas;

v) Expansão metodológica para outros materiais: a adaptação da metodologia dos perfis geográficos para estruturas metálicas, alvenaria estrutural e pavimentos asfálticos permitiria a construção de um atlas nacional de durabilidade multimatérias, estendendo a leitura macroclimática para além do concreto armado e protendido.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 224. *ACI*. **Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures**. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 1993. Technical Guide.

ACI COMMITTEE 228. *ACI*. **Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2013. Technical Guide.

ACI COMMITTEE 301. *ACI*. **Specifications for Structural Concrete**. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2016. Technical Guide.

ACI COMMITTEE 305. *ACI*. **Guide to hot weather concreting**. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2020. Technical Guide.

ACI COMMITTEE 365. *ACI*. **Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report**. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2000. Technical Guide.

ADESINA, Adeyemi; ZHANG, Jieying. Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. **Next Sustainability**, [*s. l.*], v. 3, p. 100025, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. ANA. **Catálogo de Metadados da ANA**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home. Acesso em: 3 dez. 2024.

AGUIRRE-GUERRERO, Ana María; ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andrés; DE GUTIÉRREZ, Ruby Mejía. A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. **Applied Clay Science**, [*s. l.*], v. 135, p. 437–446, 2017.

ALCÁNTARA, J. *et al.* Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel. **Corrosion Science**, [*s. l.*], v. 97, p. 74–88, 2015.

ALHAMAD, Amjad *et al.* Performance of Different Concrete Types Exposed to Elevated Temperatures: A Review. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 14, p. 5032, 2022.

ALI, Mohsin *et al.* A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. **RSC Advances**, [*s. l.*], v. 14, n. 50, p. 37252–37271, 2024.

ALONSO, C *et al.* Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 30, n. 7, p. 1047–1055, 2000.

ALONSO, C.; CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. **Electrochimica Acta**, [*s. l.*], v. 47, n. 21, p. 3469–3481, 2002.

AL-RAWI, R.S.; SALIH, Salah Mahdi. CONTROL OF THERMAL AND SHRINKAGE CRACKING OF MASS CONCRETE IN HOT CLIMATE. **Journal of Engineering**, Jadiriyah -Baghdad- Iraq, v. 9, n. 2, p. 195–205, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI*. **ACI 318-19**: Building Code Requirements for Structural Concrete - Commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19). Farmington Hills, USA, 2019.

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade; DUBREUIL, Vincent; AMORIM, Amanda Trindade. Day and night surface and atmospheric heat islands in a continental and temperate tropical environment. **Urban Climate**, [*s. l.*], v. 38, p. 100918, 2021.

ANACONDA, INC. **Miniconda**. versão 3 (Python 3.13.5). [*S. l.*]: Anaconda, Inc., 2024. Windows, macOS, Linux. Disponível em: https://docs.conda.io/en/latest/miniconda.html. Acesso em: 4 maio 2025.

ANDRADE, Carmen. Diseño y evaluación de la vida útil a través de resistividad eléctrica concreta. **Revista ALCONPAT**, [*s. l.*], v. 8, n. 3, p. 264–279, 2018.

ANDRADE, Carmen. Role of Oxygen and Humidity in the Reinforcement Corrosion. *In*: , 2023, Cham. (J. Ivan Escalante-Garcia, Pedro Castro Borges, & Alejandro Duran-Herrera, Org.)**Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 316–325.

ANDRADE, C; ALONSO, C; SARRÍA, J. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 24, n. 1, CORROSION AND CORROSION MONITORING, p. 55–64, 2002.

ANGST, Ueli M. *et al.* Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**, [*s. l.*], v. 53, n. 4, p. 1451–1464, 2011.

ANGST, Ueli *et al.* Chloride induced reinforcement corrosion: Rate limiting step of early pitting corrosion. **Electrochimica Acta**, [*s. l.*], v. 56, n. 17, p. 5877–5889, 2011.

ANGST, Ueli *et al.* Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities – a critical review by RILEM TC 281-CCC. **RILEM Technical Letters**, [*s. l.*], v. 5, p. 85–100, 2020.

ANGST, Ueli *et al.* Critical chloride content in reinforced concrete — A review. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 39, n. 12, p. 1122–1138, 2009.

ANN, Ki Yong; SONG, Ha-Won. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, [*s. l.*], v. 49, n. 11, p. 4113–4133, 2007.

ANWAR, Abdullah; LIU, Xuemei Liu; ZHANG, Lihai Zhang. Degradation Behavior of GO-ternary Blended Nano-concrete Compositesunder Accelerated Sulfuric Acid Attack. **Durability of Building Materials and Components for Sustainability**, [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Anwar_et_al_2023a. Acesso em: 27 jan. 2026.

ARARUNA, Júlio César Messias. Prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de corrosão da armadura: revisão de literatura. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [*s. l.*], v. 60, n. 4, p. 1339, 2023.

ARAÚJO, Alana Ramos; BELCHIOR, Germana Parente Neiva; VIEGAS, Thais Emilia de Sousa (org.). **Os impactos das mudanças climáticas no Nordeste Brasileiro**. 1. ed. Fortaleza, CE; São Paulo, SP: Fundação SINTAF; Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2016.

ARAÚJO, Elânia Daniele Silva; MACHADO, Célia Cristina Clemente; SOUZA, Jonas Otaviano Praça de. Considerações sobre as paisagens semiáridas e os enclaves subúmidos do Nordeste seco – uma abordagem sistêmica. **Revista de Geografia**, [*s. l.*], v. 36, n. 3, p. 128–146, 2019.

ARCHER, David *et al.* Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, [*s. l.*], v. 37, n. Volume 37, 2009, p. 117–134, 2009.

ARPINO, Cristiane Rodrigues; GUIMARÃES, André Cunha Tavares. Avaliação de modelo de difusão considerando a variação no tempo do teor de cloretos na superfície do concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [*s. l.*], v. 19, p. 81–93, 2014.

ASAAD, Mohammad *et al.* Performance of Green Concrete Comprising Waste Ceramic as a Fine Aggregate Replacement: Effect of Sulfuric Acid on Degradation Process. **International Journal of Engineering Research and Advanced Technology**, [*s. l.*], v. 06, p. 31–37, 2020.

ASMARA, Yuli Panca. Reinforced Concrete Protection. *In*: ASMARA, Yuli Panca (org.). **Concrete Reinforcement Degradation and Rehabilitation: Damages, Corrosion and Prevention**. Singapore: Springer Nature, 2024. (Engineering Materials ((ENG.MAT.))). p. 95–112. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-99-5933-4_7. Acesso em: 31 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-2**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 2: Determinação de amônio solúvel em água. Rio de Janeiro, RJ, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-3**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 3: Determinação de magnésio solúvel em água. Rio de Janeiro, RJ, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-4**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 4: Determinação do resíduo sólido. Rio de Janeiro, RJ, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-5**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 5: Determinação de dióxido de carbono (CO_2) agressivo. Rio de Janeiro, RJ, 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-6**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 6: Determinação de sulfato solúvel em água. Rio de Janeiro, RJ, 2021e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16937-7**: Águas agressivas - Durabilidade do concreto Parte 7: Determinação do pH pelo método potenciométrico. Rio de Janeiro, RJ, 2021f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 17170**: Edificações — Garantias — Prazos recomendados e diretrizes. Rio de Janeiro, RJ, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, RJ, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 15575-2**: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras — Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2023a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 6118 (Versão Corrigida 2:2024)**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, RJ, 2023b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2021g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 7187 (Versão Corrigida:2022)**: Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2021h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

ATASEVER, Muhammet; TOKYAY, Mustafa. Determining datum temperature and apparent activation energy: an approach for mineral admixtures incorporated cementitious systems. **Challenge Journal of Concrete Research Letters**, [*s. l.*], v. 15, n. 4, p. 142, 2024.

AZARSA, Pejman; GUPTA, Rishi. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2017, n. 1, p. 8453095, 2017.

BABAAHMADI, Arezou *et al.* Chloride binding in Portland composite cements containing metakaolin and silica fume. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 161, p. 106924, 2022.

BABUTZKA, Martin; LEHMANN, Jens; BURKERT, Andreas. Field exposure study under sheltered and open exposure conditions at different test sites in Germany: First-year corrosion rate and atmospheric corrosivity. **Materials and Corrosion**, [*s. l.*], v. 74, n. 5, p. 694–708, 2023.

BACCAY, M.A. *et al.* Influence of Cement Type and Temperature on the Rate of Corrosion of Steel in Concrete Exposed to Carbonation. **Corrosion**, [*s. l.*], v. 62, n. 9, p. 811–821, 2006.

BAIARDI, Amilcar; RIBEIRO, Maria Clotilde Meirelles. Eficiência da gestão da agricultura irrigada no Vale do São Francisco: uma análise comparativa no polo regional Petrolina-Juazeiro. **COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional**, [*s. l.*], v. 20, n. 3, jul./set., p. 28–51, 2023.

BALAGAM, Vidya; KILLAMSETTI, Srinivasa. Effect of Thermal Cycles On Concrete: An Overview. **International Journal for Research in Engineering Application & Management**, [*s. l.*], v. 5, n. 3, p. 6–14, 2019.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes *et al.* Correlação entre os macroclimas brasileiros e as recomendações da normalização brasileira em prol da durabilidade e vida útil das Obras de Arte Especiais. *In*: 63º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2022, Brasília. **Anais**. Brasília: IBRACON, 2022.

BARBOSA, Alda Monteiro *et al.* Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para mapas temáticos de ecoturismo: subsídios para planejamento. **Geografia**, [*s. l.*], v. 32, n. 2, p. 423–441, 2007.

BARNET, Chris. Sounder SIPS: AQUA AIRS IR-only Level 3 CLIMCAPS : Comprehensive Quality Control Gridded Monthly V2. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, , 2021. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/SNDRAQIL3CMCCP_2.html. Acesso em: 23 out. 2025.netCDF

BARRY, Roger; CHORLEY, Richard. **Atmosphere, Weather and Climate**. London ; New York: Routledge, 2003.

BASTIDAS-ARTEAGA, Emilio; STEWART, Mark G. Damage risks and economic assessment of climate adaptation strategies for design of new concrete structures subject to chloride-induced corrosion. **Structural Safety**, [*s. l.*], v. 52, p. 40–53, 2015.

BAŽANT, Zdeněk P; STEFFENS, Alexander. Mathematical model for kinetics of alkali–silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 30, n. 3, p. 419–428, 2000.

BAŽANT, Zdeněk P.; WANG, Tong-Sheng. Practical prediction of cyclic humidity effect in creep and shrinkage of concrete. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 18, n. 4, p. 247–252, 1985.

BENÍTEZ, Pablo *et al.* Degradation of Concrete Structures from the Climate Change Perspective. **XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)**, [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Benitez_et_al_2020a. Acesso em: 26 set. 2024.

BERG, Ruben Geert van den. SPSS Missing Values Functions. *In*: [*s. d.*]. Disponível em: https://www.spss-tutorials.com/spss-missing-values-functions/. Acesso em: 6 out. 2025.

BERGER, Felix *et al.* Thermodynamic Modeling and Experimental Validation of Acetic Acid Attack on Hardened Cement Paste: Effect of Silica Fume. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 23, p. 8355, 2022.

BERNARDES, Júlio. **Caminhão e ônibus são responsáveis por metade da poluição do ar em SP**. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-ambientais/caminhoes-e-onibus-sao-responsaveis-por-metade-da-poluicao-em-sao-paulo/. Acesso em: 7 maio 2025.

BERTOLINI, Luca (org.). **Corrosion of steel in concrete**: prevention, diagnosis, repair. 2nd, completely rev. and enl. ed. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

BETTS, Richard A. *et al.* A successful prediction of the record CO_2 rise associated with the 2015/2016 El Niño. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [*s. l.*], v. 373, n. 1760, p. 20170301, 2018.

BEZAK, Nejc; PETAN, Sašo; MIKOŠ, Matjaž. Spatial and Temporal Variability in Rainfall Erosivity Under Alpine Climate: A Slovenian Case Study Using Optical Disdrometer Data. **Frontiers in Environmental Science**, [*s. l.*], v. 9, 2021. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2021.735492/full. Acesso em: 12 jan. 2026.

BHATTI, Asher Samuel *et al.* Trend in Extreme Precipitation Indices Based on Long Term In Situ Precipitation Records over Pakistan. **Water**, [*s. l.*], v. 12, n. 3, p. 797, 2020.

BINFARE, Paula Wabner; GALVÃO, Patrícia Lins de Arroxelas; CASTRO, Cleber Augusto Trindade. Enoturismo: possibilidades e desafios para o desenvolvimento regional do turismo na região vinícola do Vale do São Francisco-Nordeste brasileiro. **PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural**, [*s. l.*], v. 14, n. 5, p. 1217–1227, 2016.

BOLFARINE, Heleno; BUSSAB, Wilton O. **Elementos de amostragem**. 1. ed. [*S. l.*]: Editora Edgard Blucher, 2019.

BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. [*S. l.*]: Oficina de Textos, 2019.

BOLZONI, Fabio *et al.* Evaluation of Preventative Methods against Rebar Corrosion in Concrete. **Key Engineering Materials**, [*s. l.*], v. 919, p. 132–142, 2022.

BORGES, Pablo de Amorim *et al.* Differences between two climatological periods (2001–2010 vs. 1971–2000) and trend analysis of temperature and precipitation in Central Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [*s. l.*], v. 116, n. 1, p. 191–202, 2014.

BORGES, Ezequiel. História da NBR 6118. *In*: TUDOENGCIVIL.COM.BR. 16 abr. 2019. Disponível em: https://www.tudoengcivil.com.br/2019/04/historia-da-nbr-6118.html. Acesso em: 10 set. 2024.

BORSAY, Peter; BROWN, Callum; JOWITT, J. A. G. Firth, Bradford and the Industrial Revolution: An Economic History 1760–1840. Halifax: Ryburn Publishing, 1990. 221pp. Illustrations. £17.50. - D. James, Bradford (Town and City History Series). Halifax: Ryburn Publishing, 1990. 192pp. Illustrations. £9.95. **Urban History**, [*s. l.*], v. 20, n. 1, p. 152–153, 1993.

BOSCHETTI, Luigi; STEHMAN, Stephen V.; ROY, David P. A stratified random sampling design in space and time for regional to global scale burned area product validation. **Remote sensing of environment**, [*s. l.*], v. 186, p. 465–478, 2016.

BOSCHMANN KÄTHLER, Carolina; ELSENER, Bernhard; ANGST, Ueli. **Critical chloride content in concrete: realistic determination and influence of air voids**. [*S. l.*]: ETH Zurich, 2021. Disponível em: http://hdl.handle.net/20.500.11850/527815. Acesso em: 5 fev. 2026.

BOSTENARU DAN, Maria. Building the Future on Lessons of Historic Reinforced Concrete. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 12, n. 15, p. 5925, 2020.

BOX BRAZIL. **Enoturismo**: Uma Imersão Cultural que Celebra a Tradição Vinícola Brasileira. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://www.boxbrazil.tv.br/noticias.php?noticia=enoturismo-uma-imersao-cultural-que-celebra-a-tradicao-vinicola-brasileira. Acesso em: 7 maio 2025.

BRITANNICA EDITORS. **Deliquescence**. *In*: ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. [*S. l.: s. n.*], 2014. Disponível em: https://www.britannica.com/science/deliquescence. Acesso em: 6 fev. 2026.

BROOKER, Marc. **Exponential Backoff And Jitter | AWS Architecture Blog**. [*S. l.*], 2015. Disponível em: https://aws.amazon.com/blogs/architecture/exponential-backoff-and-jitter/. Acesso em: 15 fev. 2026.

BUCHARD, V. *et al.* The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part II: Evaluation and Case Studies. **Journal of Climate**, [*s. l.*], v. 30, n. 17, p. 6851–6872, 2017.

BUI, Anh Kiet; NGUYEN, Trong Chuc. The Temperature Field in Mass Concrete with Different Placing Temperatures. **Civil Engineering and Architecture**, [*s. l.*], v. 8, n. 2, p. 94–100, 2020.

BUSSE, Daniela Fernandes Massari. Diretrizes para gestão de projetos de arquitetura residencial sustentável e de baixo impacto visual no ambiente. **Revista Científica Semana Acadêmica**, [*s. l.*], v. 11, n. 230, p. 1–13, 2023.

CAI, H.; LIU, X. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 28, n. 9, p. 1281–1287, 1998.

CALVERT, Jack G.; STOCKWELL, William R. Deviations from the O3–NO–NO2 photostationary state in tropospheric chemistry. **Canadian Journal of Chemistry**, [*s. l.*], v. 61, n. 5, p. 983–992, 1983.

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS & ASSESSMENT. **Deliquescence**. *In*: CAMBRIDGE DICTIONARY. [*S. l.: s. n.*], 2026. Disponível em: https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/deliquescence. Acesso em: 6 fev. 2026.

CANTOR, Brian. Fick's Laws: Diffusion. *In*: CANTOR, Brian (org.). **The Equations of Materials**. [*S. l.*]: Oxford University Press, 2020a. p. 0. Disponível em: https://doi.org/10.1093/oso/9780198851875.003.0007. Acesso em: 22 jan. 2026.

CANTOR, Brian. The Arrhenius Equation: Reactions. *In*: CANTOR, Brian (org.). **The Equations of Materials**. [*S. l.*]: Oxford University Press, 2020b. p. 0. Disponível em: https://doi.org/10.1093/oso/9780198851875.003.0005. Acesso em: 18 jan. 2026.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton *et al.* Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 1, n. 1, p. 9, 2016.

CARINO, Nicholas J.; CLIFTON, James R. **Prediction of Cracking in Reinforced Concrete Structures**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 1995. NISTIR (National Institute of Standards and Technology Interagency/Internal Report).

CARPIO, Manuel *et al.* A proposed method based on approximation and interpolation for determining climatic zones and its effect on energy demand and CO2 emissions from buildings. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 87, p. 253–264, 2015.

CARVALHO, C. M. Delgado de. **Météorologie du Brésil**. Londres: John Bale, Sons & Danielson, 1917.

CARVALHO, Miguel Mundstock Xavier De. Os fatores do desmatamento da Floresta com Araucária: agropecuária, lenha e indústria madeireira. **Esboços - Revista do Programa de Pós-Graduação em História da UFSC**, [*s. l.*], v. 18, n. 25, p. 32–52, 2012.

CARVALHO, J. W. Landolfi Teixeira de; OLIVEIRA, F. de. IMPERMEABILIZAÇÃO E USO DO SOLO URBANO: ESTUDO DE CASO NA MICRO-BACIA CÓRREGO DO

AVIÁRIO – CURITIBA/PR. **REVISTA GEONORTE**, [*s. l.*], v. 5, n. 23, p. 504–509, 2014.

CASTAÑEDA, Abel *et al.* Corrosion of steel reinforced concrete in the tropical coastal atmosphere of Havana City, Cuba. **Química Nova**, [*s. l.*], v. 36, p. 220–229, 2013.

CASTRO, Alfredo J. *et al.* Further Evaluation of Limiting Strain Criteria for Perpetual Asphalt Pavement Design. **Transportation Research Record**, [*s. l.*], v. 2640, n. 1, p. 41–48, 2017.

CASTRO, Javier; BENTZ, Dale; WEISS, Jason. Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 33, n. 8, p. 805–813, 2011.

CECCONELLO, V.; TUTIKIAN, B. A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 5, p. 68–83, 2012.

CHANG, Lim-Seok *et al.* Evaluation of correlated Pandora column NO_2 and in situ surface NO_2 measurements during GMAP campaign. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 22, n. 16, p. 10703–10720, 2022.

CHEN, Xuandong *et al.* A Chemical-Transport-Mechanics Numerical Model for Concrete under Sulfate Attack. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 24, p. 7710, 2021.

CHEN, Depeng *et al.* Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 3, p. 611, 2020.

CHEN, Weifeng *et al.* Deterioration Process of Concrete Exposed to Internal Sulfate Attack. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 6, p. 1336, 2020.

CHEN, Ying; LIU, Peng; YU, Zhiwu. Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength. **Materials**, [*s. l.*], v. 11, n. 11, p. 2167, 2018.

CHENG, Linjun *et al.* Characteristics of Air Pollutants and Greenhouse Gases at a Regional Background Station in Southwestern China. **Aerosol and Air Quality Research**, [*s. l.*], v. 19, n. 5, p. 1007–1023, 2019.

CHENG, An *et al.* Prediction of the Deterioration Depth of Concrete by Accelerating Calcium Leaching Test. **Advanced Materials Research**, [*s. l.*], v. 365, p. 3–7, 2012.

CHENG, An; CHAO, Sao-Jeng; LIN, Wei-Ting. Effects of Leaching Behavior of Calcium Ions on Compression and Durability of Cement-Based Materials with Mineral Admixtures. **Materials**, [*s. l.*], v. 6, n. 5, p. 1851–1872, 2013.

CHESS, Paul M.; GREEN, Warren. **Durability of reinforced concrete structures**. 1. ed. Boca Raton, London, New York: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2020. (CRC focus).

CHICO, Belén *et al.* Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases. **Materials**, [*s. l.*], v.

10, n. 6, 2017. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/601. Acesso em: 5 fev. 2026.

CHO, Hye-Kyung; BOWMAN, Kenneth P.; NORTH, Gerald R. A Comparison of Gamma and Lognormal Distributions for Characterizing Satellite Rain Rates from the Tropical Rainfall Measuring Mission. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [*s. l.*], v. 43, n. 11, p. 1586–1597, 2004.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto protendido: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2018.

CLEVELAND, Cutler. Global anthropogenic sulfur dioxide emissions, 1750-2022. *In*: VISUALIZING ENERGY. 31 mar. 2025. Disponível em: https://visualizingenergy.org/global-anthropogenic-sulfur-dioxide-emissions-1750-2022/. Acesso em: 15 fev. 2026.

CLIFTON, James R. **The Frost-Resistance of Concrete**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1990. NIST Internal Report.

CLIFTON, James R; POMMERSHEIM, James M. **Sulfate attack of cementitious materials: volumetric relations and expansions**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1994. NISTIR (NIST Interagency Report). Disponível em: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir5390.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026.

COCHRAN, William G. **Sampling Techniques**. 3. ed. New York, NY: JOHN WILEY & SONS, 1977.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. *CEN*. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. CNI. **Perfil da Indústria nos Estados**. [*S. l.*], 2017. Disponível em: https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/ranking. Acesso em: 24 fev. 2026.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. CAPES. **Portal. Periódicos. CAPES**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php? Acesso em: 4 mar. 2024.

CORDEIRO, Gilberto Gomes; MANSEFU, Abraham Rodas. **Degradação de terras por salinidade no Nordeste do Brasil e medição instrumental da salinidade**. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido), 2001. Documentos. Disponível em: Acesso em: 23 fev. 2026.

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment-Part II: Prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 32, n. 5, p. 354–359, 1999.

CREVOISIER, C. *et al.* Midtropospheric CO2 concentration retrieval from AIRS observations in the tropics. **Geophysical Research Letters**, [*s. l.*], v. 31, n. 17, 2004.

Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GL020141. Acesso em: 15 fev. 2026.

CRONIN, Matthew A.; GEORGE, Elizabeth. The Why and How of the Integrative Review. **Organizational Research Methods**, [*s. l.*], v. 26, n. 1, p. 168–192, 2023.

CUCINOTTA, Filippo *et al.* Thermal Emission analysis to predict damage in specimens of High Strength Concrete. **Frattura ed Integrità Strutturale**, [*s. l.*], v. 15, n. 55, p. 258–270, 2020.

CUSACK, P. Agents of Change: Hennebique, Mouchel and ferro- concrete in Britain, 1897-1908*. *In*: AGENTS OF CHANGE, 1987. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 1987. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Agents-of-Change%3A-Hennebique%2C-Mouchel-and-ferro-in-Cusack/e8c16ff9ed5c7e49798c2bc32ef8f2ac779a9720. Acesso em: 22 jan. 2026.

DAI, Lizhao *et al.* Experimental study on interfacial behavior and flexural performance of prestressed concrete beams under local corrosion and fatigue. **Structural Concrete**, [*s. l.*], v. 6, 2025. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/suco.70181. Acesso em: 19 jan. 2026.

DALLEY, Mark. Applying COLLATION Clause to string expressions – SQLServerCentral Forums. *In*: SQLSERVERCENTRAL. 15 set. 2022. Disponível em: https://www.sqlservercentral.com/forums/topic/applying-collation-clause-to-string-expressions. Acesso em: 6 out. 2025.

DANG, Vu Hiep; FRANÇOIS, Raoul. Prediction of ductility factor of corroded reinforced concrete beams exposed to long term aging in chloride environment. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 53, p. 136–147, 2014.

DANIYAL, Md; AKHTAR, Sabih. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 5, n. 1, p. 1, 2019.

DAS, C.S. *et al.* Corrosion Risk of RC Structures Against Combined Chloride Ingress and Carbonation Under Future Climate Projections. **International Conference on Durability of Concrete Structures**, [*s. l.*], 2025. Disponível em: https://docs.lib.purdue.edu/icdcs/2025/tmc/8.

DE RINCÓN, O. Troconis; DURACON COLLABORATION (O TROCONIS DE RINCÓN AND COAUTHORS). Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Environments DURACON Project: Ten-year Evaluation. *In*: CORROSION 2013, 2013. **Anais [...]**. [*S. l.*]: Association for Materials Protection and Performance, 2013. p. 1–18. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5006/C2013-02404. Acesso em: 26 jan. 2026.

DELAFONTAINE, M. *et al.* Assessment of sliver polygons in geographical vector data. **International Journal of Geographical Information Science**, [*s. l.*], v. 23, n. 6, p. 719–735, 2009.

DELIQUESCENCE. *In*: THE OXFORD POCKET DICTIONARY OF CURRENT ENGLISH. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/chemistry/chemistry-general/deliquescence. Acesso em: 6 fev. 2026.

DEMIRBAŞ, Ayhan; ÖZTÜRK, Temel; KARATAŞ, Faik Özgür. Long-term wear on outside walls of buildings by sulfur dioxide corrosion. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 31, n. 1, p. 3–6, 2001.

DIALLO, Mohamadou *et al.* Global distribution of CO_2 in the upper troposphere and stratosphere. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 17, n. 6, p. 3861–3878, 2017.

DO NASCIMENTO, Wanderson Soares; SANCHES, Antônio Estanislau; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. Fissuras patológicas por movimento térmico em uma residência na cidade de Manaus - estudo de caso: Pathological cracks by thermal motion in a residence in the city of Manaus - case study. **Brazilian Journal of Development**, [*s. l.*], v. 8, n. 11, p. 71016–71027, 2022.

DOBROVOLSKI, Mateus Edilson Gomes. **Ataque interno por sulfatos em argamassas de cimento portland : efeito de adição cristalizante e microfibra de polipropileno**. 2021. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Curitiba, 2021. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/73279. Acesso em: 29 jan. 2026.

DU, Zhantao *et al.* Experimental and Numerical Study on Chloride Transport in Unsaturated Concrete: Highlighting Temperature, Humidity, and Mineral Admixtures. **Materials**, [*s. l.*], v. 17, n. 4, p. 930, 2024.

DURACON COLLABORATION (O TROCÓNIS DE RINCÓN AND COAUTHORS). Environmental Impact on Reinforced Concrete Structures in the Iberoamerican Region. *In*: CORROSION 2006, 2006. **Anais [...]**. [*S. l.*]: Association for Materials Protection and Performance, 2006. p. 1–16. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5006/C2006-06359. Acesso em: 26 jan. 2026.

DUTRA, Italo Gustavo Martins Ribeiro. **Proteção de estruturas de concreto armado em reservatórios enterrados para detenção de cheias em sistemas de macrodrenagem: avaliação de tecnologias aplicáveis ao reservatório Vilarinho 2 em Belo Horizonte**. 2023. 35 f. Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/58331. Acesso em: 7 ago. 2024.

ELSEVIER. **ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.** [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/. Acesso em: 4 mar. 2024.

ENTING, I. G. **Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport**. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2002.

ERARSLAN, Nazife. Thermal-induced damage and cohesive fracturing characteristics of concrete using a new generation environmentally sustainable cement. **Materials Testing**, [*s. l.*], 2026. Disponível em:

https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/mt-2025-0162/html. Acesso em: 18 jan. 2026.

ESRI. **Add Join (Data Management)—ArcGIS Pro | Documentation**. [*S. l.*], 2025a. Documentation. Disponível em: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/add-join.htm. Acesso em: 16 fev. 2026.

ESRI. **How zonal statistics tools work—ArcGIS Pro | Documentation**. [*S. l.*], 2025b. Documentation. Disponível em: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-zonal-statistics-works.htm. Acesso em: 15 fev. 2026.

ESRI. ***Sliver polygon***. *In*: GIS DICTIONARY. [*S. l.: s. n.*], 2026. Disponível em: https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/sliver-polygon. Acesso em: 3 fev. 2026.

ESRI. **Spatial Join (Analysis)—ArcGIS Pro | Documentation**. [*S. l.*], 2025c. Documentation. Disponível em: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/spatial-join.htm. Acesso em: 16 fev. 2026.

EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council. **Directive 2008/50/EC**: n. 2008/50/EC, p. 1–44, 21 maio 2008. Disponível em: http://news.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2013/02/LexUriServ.pdf. Acesso em: 26 jan. 2026.

FAIRBRIDGE, Rhodes W. XEROPHILE, XEROPHYTE, XEROSEREXerophile, xerophyte, xerosere. *In*: GEOMORPHOLOGY. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. p. 1237–1237. Disponível em: https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_409. Acesso em: 8 maio 2025.

FAVRETTO, Felipe *et al.* Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [*s. l.*], v. 26, n. 3, p. e13001, 2021.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *fib*. **Model Code 2010. 1**. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (*fib*), 2010. (Bulletin / Fédération Internationale du Béton, v. 55). v. 1

FELIX, Emerson Felipe; CARRAZEDO, Rogério; POSSAN, Edna. Análise experimental da vida útil à fadiga de concretos submetidos à compressão cíclica de baixa frequência. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [*s. l.*], v. 27, p. e202145017, 2022.

FENG, De-Cheng *et al.* Investigation of the time-dependent bearing capacities of concrete structures in different environments considering climate change. **Structure and Infrastructure Engineering**, [*s. l.*], v. 22, n. 8, p. 1546–1562, 2024.

FENG, Pan *et al.* Microstructural Origins of Cement Paste Degradation by External Sulfate Attack. **Construction and building materials**, [*s. l.*], v. 96, p. 391–403, 2015.

FERNANDES, Rodrigo *et al.* Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. **Remote Sensing**, [*s. l.*], v. 15, n. 4, p. 884, 2023.

FIALHO, Edson Soares *et al.* Introdução: Classificações climáticas: perspectivas e possibilidades. *In*: NOVAIS, Giuliano Tostes (org.). **Climas do Brasil:** classificação climática e aplicações. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023. p. 3–38. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

FINLAYSON-PITTS, B. J. *et al.* The heterogeneous hydrolysis of NO2 in laboratory systems and in outdoor and indoor atmospheres: An integrated mechanism. **Physical Chemistry Chemical Physics**, [*s. l.*], v. 5, n. 2, p. 223–242, 2003.

FONSECA, Letícia Assis Barony V. **Fruticultura Brasileira**: Diversidade e sustentabilidade para alimentar o Brasil e o Mundo. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://cnabrasil.org.br/. Acesso em: 7 maio 2025.

FRANÇOIS, Raoul; LAURENS, Stéphane; DEBY, Fabrice. Steel Corrosion in Reinforced Concrete. *In*: FRANÇOIS, Raoul; LAURENS, Stéphane; DEBY, Fabrice (org.). **Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures**. [*S. l.*]: Elsevier, 2018. p. 1–41. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781785482342500019. Acesso em: 16 jul. 2024.

FREDERICKSON, Louise Bøge *et al.* Are dense networks of low-cost nodes really useful for monitoring air pollution? A case study in Staffordshire. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 22, n. 21, p. 13949–13965, 2022.

GARCÍA, M. Aguanell. Crack development through plastic shrinkage in fresh concretes and mortars. **Materiales de Construcción**, [*s. l.*], v. 39, n. 215, p. 5–18, 1989.

GARRATT, J.R.; HESS, G.D. BOUNDARY LAYERS | Neutrally Stratified Boundary Layer. *In*: HOLTON, James R. (ed.). **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. [*S. l.*]: Academic Press, 2003. p. 262–271. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/referencework/abs/pii/B0122270908000907. Acesso em: 15 fev. 2026.

GE, Baozhu *et al.* Inter-annual variations of wet deposition in Beijing from 2014–2017: implications of below-cloud scavenging of inorganic aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 21, n. 12, p. 9441–9454, 2021.

GEDDES, Jeffrey A.; MARTIN, Randall V. Global deposition of total reactive nitrogen oxides from 1996 to 2014 constrained with satellite observations of NO_2 columns. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 17, n. 16, p. 10071–10091, 2017.

GELARO, Ronald *et al.* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, [*s. l.*], v. 30, n. 14, p. 5419–5454, 2017.

GEBLER, Luciano; PALHARES, Julio Cesar Pascale (ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007.

GHANOONI-BAGHA, Mohammad; YEKEFALLAH, Mohammad Reza; SHAYANFAR, Mohsen Ali. Durability of RC Structures against Carbonation-Induced Corrosion

under the Impact of Climate Change. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 24, n. 1, p. 131–142, 2020.

GHOURCHIAN, Sadegh; WYRZYKOWSKI, Mateusz; LURA, Pietro. A practical approach for reducing the risk of plastic shrinkage cracking of concrete. **RILEM Technical Letters**, [*s. l.*], v. 2, p. 40–44, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo, SP: Editora Atlas Ltda, 2022.

GLOBAL MODELING AND ASSIMILATION OFFICE; PAWSON, Steven. *GMAO*. MERRA-2 tavgM_2d_adg_Nx: 2d,Monthly mean,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics (extended) V5.12.4. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, , 2015. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/M2TMNXADG_5.12.4.html. Acesso em: 7 nov. 2025.netCDF

GOBO, João Paulo Assis; BIBIANO, Bruno Henrique; GALVANI, Emerson. Zonas Climáticas Urbanas em Cidade de Pequeno Porte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [*s. l.*], v. 12, n. 6, p. 2066–2079, 2019.

GOOGLE CLOUD. **Espera exponencial | Memorystore for Redis**. [*S. l.*], 2026. Documentation. Disponível em: https://docs.cloud.google.com/memorystore/docs/redis/exponential-backoff?hl=pt-br. Acesso em: 15 fev. 2026.

GOOGLE LLC. **Google Acadêmico**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://scholar.google.pt/schhp?hl=pt-BR&as_sdt=0,5. Acesso em: 4 mar. 2024.

GRAEDEL, T. E.; KEENE, W. C. Tropospheric budget of reactive chlorine. **Global Biogeochemical Cycles**, [*s. l.*], v. 9, n. 1, p. 47–77, 1995.

GU, Jianbin *et al.* Harmonizing satellite and ground NO2 observations in China: A multi-sensor framework for scenario-specific calibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [*s. l.*], v. 230, p. 486–494, 2025.

GUIMARÃES, Carlos Alberto. **Sudeste concentra mais de um terço das áreas urbanizadas do país | Agência de Notícias**. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/35585-sudeste-concentra-mais-de-um-terco-das-areas-urbanizadas-do-pais. Acesso em: 24 fev. 2026.

GUO, Yuming *et al.* Degradation Behavior of Surface Wear Resistance of Marine Airport Rigid Pavements. **Materials**, [*s. l.*], v. 19, n. 1, p. 54, 2026.

GUO, Jin-Jun *et al.* Effect of Dry–Wet Cycle Periods on Properties of Concrete under Sulfate Attack. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 11, n. 2, p. 888, 2021.

GUO, Jinjun *et al.* Multi-scale model investigating the effects of pore structure and drying-wetting cycles on diffusion in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 140, p. 105086, 2023.

HANSEN, J. *et al.* Target atmospheric CO_2: Where should humanity aim? **The Open Atmospheric Science Journal**, [*s. l.*], v. 2, n. 1, p. 217–231, 2008.

HARDACRE, Catherine *et al.* Evaluation of SO_2, SO_4^{2-} and an updated SO_2 dry deposition parameterization in the United Kingdom Earth System Model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 21, n. 24, p. 18465–18497, 2021.

HASANAIN, G. S.; KHALLAF, T. A.; MAHMOOD, K. Water evaporation from freshly placed concrete surfaces in hot weather. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 19, n. 3, p. 465–475, 1989.

HASSAN, Mostafa. Carbonation of Reinforced Concrete Sections Containing Various Supplementary Cementitious Materials: A Review. **Journal of Building Material Science**, [*s. l.*], p. 142–161, 2025.

HASSAN, Mostafa; AMLEH, Lamya. Influence of Climate Change on Probability of Carbonation-Induced Corrosion Initiation. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 68, n. 1, p. 57–67, 2024.

HE, Jian *et al.* Experimental investigation of the effect of salt on the hygroscopic properties of autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 370, p. 130412, 2023.

HE, Hankun; SCHÄFER, Benjamin; BECK, Christian. Spatial heterogeneity of air pollution statistics in Europe. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 12215, 2022.

HELENE, Paulo. Converse com o IBRACON. **Concreto & Construções**, [*s. l.*], v. ano L, out-nov 2022, n. 108, p. 100, 2022.

HERBERS, Max *et al.* Crack monitoring on concrete structures: Comparison of various distributed fiber optic sensors with digital image correlation method. **Structural Concrete**, [*s. l.*], v. 24, n. 5, p. 6123–6140, 2023.

HERNÁNDEZ-BERNAL, Norma Angélica. Rainwater Management to Restore Ecosystems and Foster Food Production: A Case Study in the Semiarid Region of Minas Gerais in Brazil. *In*: LEAL FILHO, Walter; DE TRINCHERIA GOMEZ, Josep (org.). **Rainwater-Smart Agriculture in Arid and Semi-Arid Areas: Fostering the Use of Rainwater for Food Security, Poverty Alleviation, Landscape Restoration and Climate Resilience**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 359–377. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66239-8_19. Acesso em: 7 maio 2025.

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Ana *et al.* Experimental analysis on the carbonation rate of Portland cement at room temperature and CO_2 partial pressure from 1 to 51 bar. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 124, p. 104271, 2021.

HILBIG, H.; GUTBERLET, T.; BEDDOE, R. E. Acid attack on hydrated cement: effect of organic acids on the degradation process. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 57, n. 4, p. 83, 2024.

HILL, J. *et al.* An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 25, n. 8, Thaumasite in Cementitious Materials, p. 997–1003, 2003.

HOINASKI, Leonardo; WILL, Robson; RIBEIRO, Camilo Bastos. Brazilian Atmospheric Inventories – BRAIN: a comprehensive database of air quality in Brazil. **Earth System Science Data**, [*s. l.*], v. 16, n. 5, p. 2385–2405, 2024.

HONG, Sung In; ANN, Ki Yong. Numerical Prediction of Chloride Penetration in Concrete Exposed to a Marine Environment at Tide. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2018, n. 1, p. 7591576, 2018.

HU, Jiezhen *et al.* The Coupled Effect of Temperature and Carbonation on the Corrosion of Rebars in the Simulated Concrete Pore Solutions. **Journal of Chemistry**, [*s. l.*], v. 2015, n. 1, p. 462605, 2015.

HUANG, Daguan *et al.* Effect of leaching on mechanical properties and durability of concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 100, p. 111682, 2025.

HUANG, Changhao *et al.* Impact of Wet–Dry Cycles on the Durability and Degradation Mechanisms of Recycled Aggregate Concrete With Varying Replacement Percentages. **Advances in Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 2025, n. 1, p. 5560054, 2025.

HUANG, Yaoying *et al.* Study of freeze-thaw deterioration of saturated and unsaturated hydraulic concrete based on measured strain. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 97, p. 110771, 2024.

HUSSAIN, Shaik *et al.* A study on the carbonation of binary and ternary blended cement mortar and concrete. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 46–60, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Downloads**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html. Acesso em: 3 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Malha Municipal. Downloads | Geociências, , 2024. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2023/Brasil/. Acesso em: 4 fev. 2025.shp

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Sistema Costeiro-Marinho do Brasil. Biomas, , 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/15842-biomas.html?=&t=downloads. Acesso em: 4 dez. 2025.shp

INSTITUTO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO (org.). IBI Brasil. **Manual de utilização de aditivos químicos para concreto [livro eletrônico]** : aditivos para concreto. 2. ed. São Paulo, SP: IBI Brasil, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. **Dados históricos anuais**. Brasil, 2025. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos. Acesso em: 20 jan. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. Download de dados. *In*: TERRABRASILIS. 2 maio 2019. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/download-de-dados/. Acesso em: 3 dez. 2024.

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION. IBM. **IBM® SPSS® Statistics**. versão 27.0.1.0. [*S. l.*]: International Business Machines Corporation, 2022. Windows 64 bits.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO*. **ISO 9223**: Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation. Geneva, Switzerland, 2012. Disponível em: https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?Q=d3NHbDRxVlM5dm51cXByYkNwTWJGUm5XbHdwNUxWWnJIZmJ2cm42VTdERT0=. Acesso em: 26 jan. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO*. **ISO/IEC 25010**: Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model. Geneva, 2023.

IRASSAR, E. F. *et al.* Hidratação e propriedades de cimentos compostos (com três adições) com fíler calcário e escória. **Revista ALCONPAT**, [*s. l.*], v. 5, n. 2, p. 84–96, 2015.

ISMAEIL, Rawaa H. *et al.* Concrete Erosion Modelling by Water Jet using Discrete Phase Method. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 1058, n. 1, p. 012032, 2021.

IZUMI, Hiroki; ARAI, Juniti; MIZOBUCHI, Toshiaki. Study on Characteristics of Tensile Strength of Concrete Considering Temperature Dependence in Mass Concrete Structures. **MATEC Web of Conferences**, [*s. l.*], v. 199, p. 11012, 2018.

JACQUES, D. *et al.* Modelling chemical degradation of concrete during leaching with rain and soil water types. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 40, n. 8, p. 1306–1313, 2010.

JAŚNIOK, Tomasz; JAŚNIOK, Mariusz. Influence of Rapid Changes of Moisture Content in Concrete and Temperature on Corrosion Rate of Reinforcing Steel. **Procedia Engineering**, [*s. l.*], v. 108, 7th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering MATBUD'2015, p. 316–323, 2015.

JI, Haodong *et al.* Passivation and Depassivation of HPB335 Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution. **International Journal of Electrochemical Science**, [*s. l.*], v. 15, n. 7, p. 6488–6507, 2020.

JIANG, Chunmeng *et al.* Comparative Study on the Calcium Leaching Resistance of Low-Heat Cement, Moderate-Heat Cement, and Ordinary Portland Cement Pastes. **Materials**, [*s. l.*], v. 18, n. 1, p. 212, 2025.

JIN, Hesong *et al.* Influence of the rainfall intensity on the chloride ion distribution in concrete with different levels of initial water saturation. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 281, p. 122561, 2021.

JUNG, Myung-Pyo *et al.* Classification of Agro-Climatic Zones of the State of Mato Grosso in Brazil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, [*s. l.*], v. 38, n. 1, p. 34–37, 2019.

KAEWUNRUEN, Sakdirat *et al.* Vulnerability of Structural Concrete to Extreme Climate Variances. **Climate**, [*s. l.*], v. 6, n. 2, p. 40, 2018.

KALETA-JUROWSKA, Alina; JUROWSKI, Krystian. The Influence of Ambient Temperature on High Performance Concrete Properties. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 20, p. 4646, 2020.

KANAKIDOU, M. *et al.* Past, Present and Future Atmospheric Nitrogen Deposition. **Journal of the atmospheric sciences**, [*s. l.*], v. 73, n. 5, p. 2039–2047, 2016.

KANG, Seung-Min *et al.* CO_2 Diffusion and Carbonation in OPC/γ-2CaO·SiO2 Composite. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 13, n. 7, p. 4529, 2023.

KAPLIŃSKI, Oleg. Architectural, Civil, and Infrastructure Engineering in View of Sustainability: Editor's Comment. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 15, n. 7, p. 5967, 2023.

KEDEM, Benjamin; CHIU, Long S. On the lognormality of rain rate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [*s. l.*], v. 84, n. 4, Applied Mathematical Sciences, p. 901–905, 1987.

KEO, Sam Ang *et al.* Detection of Concrete Cover of Reinforcements in Reinforced Concrete Wall by Microwave Thermography with Transmission Approach. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 12, n. 19, p. 9865, 2022.

KERMANI, Sasan; KHALATBARI, Soheil. Enhancing Concrete Strength with Polymer-Based Additives in the Cement Matrix: A Comprehensive Review. **Journal of Civil Engineering Researchers**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, p. 48–64, 2024.

KEWALRAMANI, Manish; KHARTABIL, Ahmad. Porosity Evaluation of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials for Durability Assessment through Volume of Permeable Voids and Water Immersion Conditions. **Buildings**, [*s. l.*], v. 11, n. 9, p. 378, 2021.

KHAN, M. S.; ALMUTAIRI, Saud; ABBAS, H. Mechanical properties of concrete subjected to cyclic thermal loading. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 26, n. 7, p. 2855–2868, 2022.

KHATEI, Ganesh *et al.* Wind Erodibility and Particulate Matter Emissions of Salt-Affected Soils: The Case of Dry Soils in a Low Humidity Atmosphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [*s. l.*], v. 129, n. 1, p. e2023JD039576, 2024.

KHATTAK, Maaz Aslam *et al.* Assessment of Mechanical and Non Destructive Properties of Heavy Density Concrete Subjected to Acid Attack. **Fusion Journal of**

Engineering and Sciences, [*s. l.*], 2025. Disponível em: https://fusionesj.com/index.php/fjes/article/view/19. Acesso em: 26 jan. 2026.

KHUPTONG, Lalhmangaihzuali; KUMAR, P. C. Ashwin; SHARMA, Umesh Kumar. Impact of chloride-induced corrosion pits on the mechanical properties of reinforcement bars through 3D scanning and degradation analysis. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 470, p. 140604, 2025.

KIERNOŻYCKI, Włodzimierz; BŁYSZKO, Jarosław. The Influence of Temperature on the Hydration Rate of Cements Based on Calorimetric Measurements. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 11, p. 3025, 2021.

KIM, Yun-Yong *et al.* Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2014, n. 1, p. 273460, 2014.

KIM, Yail J.; GADDAFI, Adel; YOSHITAKE, Isamu. Permeable concrete mixed with various admixtures. **Materials & Design**, [*s. l.*], v. 100, p. 110–119, 2016.

KIM, Jeonghyun; KIM, Namho. Exploring the role of thermal activation of cement exposed to the external environment on the improvement of concrete properties. **Journal of Materials Research and Technology**, [*s. l.*], v. 24, p. 2868–2878, 2023.

KIPKEMBOI, Benson; MIYAZAWA, Shingo. Evaluating the Influence of Drying Shrinkage on Cracking Resistance of Massive Self-Compacting Concrete with Blast Furnace Slag Using Finite Element Method. **Infrastructures**, [*s. l.*], v. 10, n. 1, p. 11, 2025.

KISH, Leslie. **Survey Sampling**. New York: Wiley, 1995.

KLEMCZAK, Barbara; ŻMIJ, Aneta. Insight into Thermal Stress Distribution and Required Reinforcement Reducing Early-Age Cracking in Mass Foundation Slabs. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 3, p. 477, 2021.

KNEPP, T. *et al.* Estimating surface NO_2 and SO_2 mixing ratios from fast-response total column observations and potential application to geostationary missions. **Journal of Atmospheric Chemistry**, [*s. l.*], v. 72, n. 3, p. 261–286, 2015.

KÖPPEN, W. **Das geographische System der Klimate**. Berlin, Germany: Gebrüder Borntraeger, 1936.

KOREC, E. *et al.* **A phase-field chemo-mechanical model for corrosion-induced cracking in reinforced concrete**. [*S. l.*]: arXiv, 2023. Disponível em: http://arxiv.org/abs/2306.01903. Acesso em: 2 maio 2025.

KOROLEV, Alexander Sergeevich *et al.* Compressive and Tensile Elastic Properties of Concrete: Empirical Factors in Span Reinforced Structures Design. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 24, p. 7578, 2021.

KOST, Oliver; STOLL, Heather. Marine aerosols in coastal areas and their impact on cave drip water – A monitoring study from Northern Spain. **Atmospheric Environment**, [*s. l.*], v. 302, p. 119730, 2023.

KOTZE, J. D. F.; BEUKES, H. B.; SEIFERT, T. Essential environmental variables to include in a stratified sampling design for a national-level invasive alien tree survey. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, [*s. l.*], v. 12, n. 5, p. 418, 2019.

KRATOCHVÍLOVÁ, Darina; CAJTHAML, Jiří. Accuracy assessment of old large-scale maps and reducing positional error in land use change analyses. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 15, p. 26994, 2025.

KROTKOV, Nickolay A. *et al.* OMI/Aura NO_2 Cloud-Screened Total and Tropospheric Column Daily L3 Global 0.25deg Lat/Lon Grid. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, , 2013. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/OMNO2d_003.html. Acesso em: 30 out. 2025.HDF-EOS5

KUMAR POLOJU, Kiran *et al.* Experimental Study on Acid Resistance of Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash and GGBS: Towards Low-Carbon and Sustainable Construction. **Buildings**, [*s. l.*], v. 15, n. 21, p. 4012, 2025.

KWAN, Ir Dr Albert K H; NG, Ivan Y T. **Avoiding early thermal cracking in concrete structures: to insulate or not to insulate? (Vol 32 Feb 2004) - The Hong Kong Institution of Engineers**. [*S. l.*], 2004. Disponível em: https://www.hkengineer.org.hk/issue/vol32-feb2004/feature_story/?id=12922. Acesso em: 18 jan. 2026.

KWON, Seung-Jun; LEE, Byung Jae; KIM, Yun Yong. Concrete Mix Design for Service Life of RC Structures under Carbonation Using Genetic Algorithm. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2014, n. 1, p. 653753, 2014.

LACERDA, Marta Aurélia Dantas de; LACERDA, Rogério Dantas de. O Cluster da fruticultura no Pólo Petrolina/Juazeiro. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, 2004.

LAMSAL, L. N. *et al.* Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [*s. l.*], v. 113, n. D16, 2008. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JD009235. Acesso em: 15 fev. 2026.

LAN, Xin *et al.* Gradients of column CO_2 across North America from the NOAA Global Greenhouse Gas Reference Network. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 17, n. 24, p. 15151–15165, 2017.

LAN, Xin *et al.* Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA GML, , 2023. Disponível em: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html?doi=10.15138/9n0h-zh07. Acesso em: 15 fev. 2026.

LEE, Hyung-Min *et al.* Carbonation-Induced Corrosion Initiation Probability of Rebars in Concrete With/Without Finishing Materials. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 10, n. 10, p. 3814, 2018.

LEE, Yunsu *et al.* Chloride-Binding Capacity of Portland Cement Paste Blended with Synthesized CA2 (CaO·2Al2O3). **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2018, n. 1, p. 5418930, 2018.

LEE, Chang Hoon; HOVER, Kenneth C. Compatible Datum Temperature and Activation Energy for Concrete Maturity. **Materials Journal**, [*s. l.*], v. 113, n. 2, p. 197–206, 2016.

LEEMANN, Andreas; MORO, Fabrizio. Carbonation of concrete: the role of CO2 concentration, relative humidity and CO2 buffer capacity. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 50, n. 1, p. 30, 2016.

LEMON, C. E. Atmospheric Corrosion of Silver Investigated by X-ray Photoelectron Spectroscopy. *In*: , 2012. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 2012. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Atmospheric-Corrosion-of-Silver-Investigated-by-Lemon/97afcb1d64cdc2f10cff30824cd136e0568bea12. Acesso em: 29 jan. 2026.

LI, Guodong *et al.* Damage Evaluation of Concrete under Uniaxial Compression Based on the Stress Dependence of AE Elastic Wave Velocity Combined with DIC Technology. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 20, p. 6161, 2021.

LI, Zongli *et al.* Effect of thermal fatigue on mechanical properties and microstructure of concrete in constant ambient humidity. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 368, p. 130367, 2023.

LI, Zhongbin *et al.* Impacts of Spatial Resolution and XCO2 Precision on Satellite Capability for CO2 Plumes Detection. **Sensors (Basel, Switzerland)**, [*s. l.*], v. 24, n. 6, p. 1881, 2024.

LI, Dawang *et al.* Modelling of convection, diffusion and binding of chlorides in concrete during wetting-drying cycles. **Marine Structures**, [*s. l.*], v. 84, p. 103240, 2022.

LI, Dawang *et al.* Pitting corrosion of reinforcing steel bars in chloride contaminated concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 199, p. 359–368, 2019.

LI, Yanli *et al.* Vertical distribution of CO_2 in the atmospheric boundary layer: Characteristics and impact of meteorological variables. **Atmospheric Environment**, [*s. l.*], v. 91, p. 110–117, 2014.

LI, Wenting *et al.* Water Absorption and Critical Degree of Saturation Relating to Freeze-Thaw Damage in Concrete Pavement Joints. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 24, n. 3, p. 299–307, 2012.

LI, Yao; DENG, Yonggang; LIU, Runqing. Hydration Kinetics of Portland Cement–Silica Fume Binary System at Low Temperature. **Materials**, [*s. l.*], v. 12, n. 23, p. 3896, 2019.

LI, Can; KROTKOV, Nickolay A.; LEONARD, Peter. OMI/Aura Sulfur Dioxide (SO_2) Total Column Daily L3 Best Pixel Global 0.25deg Lat/Lon Grid. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, , 2012. Disponível em:

https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/OMSO2e_003.html. Acesso em: 2 nov. 2025.HDF-EOS5

LI, Fanghua; OU, Xiaoduo. An innovative simplified approach for conductive heat flux in pavement structures. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 316, p. 114240, 2024.

LIANG, Zhipeng *et al.* Experimental and Numerical Study of the Influence of Solar Radiation on the Surface Temperature Field of Low-Heat Concrete in a Pouring Block. **Buildings**, [*s. l.*], v. 13, n. 6, p. 1519, 2023.

LISBOA, Bruno Britto. **Diagnósticos da produção da erva-mate no Rio Grande do Sul**: aspectos socioeconômicos, produtividade, fertilidade do solo e nutrição das plantas. Porto Alegre, RS: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, 2023.

LIU, Jinliang *et al.* Drying and wetting mechanisms of cementitious materials under natural climate: Models, simulations, and experiments. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 338, p. 127532, 2022.

LIU, Peng *et al.* Effect of Temperature on Concrete Carbonation Performance. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2019, n. 1, p. 9204570, 2019.

LIU, Fang *et al.* Effects of Sodium Sulfate Attack on Concrete Incorporated with Drying-Wetting Cycles. **Advances in Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 5393504, 2021.

LIU, Jiaping *et al.* Evaluation Method and Mitigation Strategies for Shrinkage Cracking of Modern Concrete. **Engineering**, [*s. l.*], v. 7, n. 3, p. 348–357, 2021.

LIU, Jialiang *et al.* Fragmentation Pattern and Removal Mechanism of Concrete Subjected to Abrasive Water Jet Impact. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 6618386, 2021.

LIU, Wei-Jia *et al.* Influences of short-term heavy rainfall on interlayer properties and microstructure of concrete dam. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], v. 17, p. e01544, 2022.

LIU, Jun *et al.* Numerical and experimental research on the effect of rainfall on the transporting behavior of chloride ions in concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 302, p. 124160, 2021.

LIU, Peng *et al.* Research on Sulfate Attack Mechanism of Cement Concrete Based on Chemical Thermodynamics. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2020, n. 1, p. 6916039, 2020.

LIU, Chang *et al.* Synergistic reaction between SO_2 and NO_2 on mineral oxides: a potential formation pathway of sulfate aerosol. **Physical Chemistry Chemical Physics**, [*s. l.*], v. 14, n. 5, p. 1668–1676, 2012.

LIU, Tengyu; CHAN, Arthur W. H.; ABBATT, Jonathan P. D. Multiphase Oxidation of Sulfur Dioxide in Aerosol Particles: Implications for Sulfate Formation in Polluted

Environments. **Environmental Science & Technology**, [*s. l.*], v. 55, n. 8, p. 4227–4242, 2021.

LIU, Peng; CHEN, Ying; YU, Zhiwu. Effects of temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration on concrete carbonation. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 72, n. 18, p. 936–947, 2020.

LIU, Yushan; PANG, Jianyong; YAO, Weijing. Fatigue Performance of Rubber Concrete in Hygrothermal Environment. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 9913297, 2021.

LIU, Yongqi; SHI, Jinjie. Recent progress and challenges of using smart corrosion inhibitors in reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 411, p. 134595, 2024.

LIU, Mengyang; WEI, Di; CHEN, Hong. Consistency of the relationship between air pollution and the urban form: Evidence from the COVID-19 natural experiment. **Sustainable Cities and Society**, [*s. l.*], v. 83, p. 103972, 2022.

LOERTING, Thomas; LIEDL, Klaus R. Toward elimination of discrepancies between theory and experiment: The rate constant of the atmospheric conversion of SO3 to H2SO4. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [*s. l.*], v. 97, n. 16, p. 8874–8878, 2000.

LOHR, Sharon L. **Sampling**: Design and Analysis. 3. ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2021. Disponível em: https://www.taylorfrancis.com/books/9780429298899. Acesso em: 6 out. 2025.

LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos como Parâmetro de Durabilidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência Mecânica e sem Adições Minerais. *In*: CONGRESO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN, 2021. **CONGRESO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN**. [*S. l.*]: ALCONPAT, 2021. p. 2124–2134. Disponível em: http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/conpat2021.678. Acesso em: 27 jan. 2026.

LUO, San *et al.* Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures: A Review. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 13, p. 4568, 2022.

LUO, Yang; NIU, Ditao; SU, Li. Chloride Diffusion Property of Hybrid Basalt–Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete in a Chloride–Sulphate Composite Environment under Drying–Wetting Cycles. **Materials**, [*s. l.*], v. 14, n. 5, p. 1138, 2021.

LUO, Daming; WANG, Yan; NIU, Ditao. Durability Environmental Regionalization for Concrete Structures. **Mathematical Problems in Engineering**, [*s. l.*], v. 2013, n. 1, p. 482641, 2013.

LV, Yao *et al.* Corrosion Damage and Life Prediction of Concrete Structure in a 41-Year-Old Steelworks. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 17, p. 5893, 2022.

LYON, Stuart. **Atmospheric corrosion**. Teddington, Middlesex, Reino Unido: National Physical Laboratory (NPL), 2020. Technical Guide / Good Practice Guide. Disponível em: https://www.npl.co.uk/getattachment/aeb2c3c7-0988-4a7c-9ca3-5e265f5bb436/NPL-guide-Atmospheric_corrosion-LYON_V2-1_TrainingTemplate-(002)-Final-update.pdf?lang=en-US. Acesso em: 15 fev. 2026.

MA, Hongfa *et al.* Experimental investigation into the effects of composition and microstructure on the tensile properties and failure characteristics of different gypsum rocks. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 11, n. 1, p. 14517, 2021.

MA, Zhu *et al.* Structural Behavior of Massive Reinforced Concrete Structures Exposed to Thermomechanical Loads. **Energies**, [*s. l.*], v. 15, n. 7, p. 2671, 2022.

MACIOSKI, Gustavo *et al.* Modelos de difusão para penetração de cloretos em concreto. *In*: 66º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2025, Curitiba, PR. **Anais**. [*S. l.*]: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/397253744_Modelos_de_difusao_para_penetracao_de_cloretos_em_concreto. Acesso em: 5 fev. 2026.

MAHMOOD, Ammar; DEHN, Frank; THISSEN, Peter. Carbonation under Varying Humidity Conditions: A 3D Micro-Scale Kinetic Monte Carlo Approach. **Langmuir**, [*s. l.*], v. 41, n. 4, p. 2259–2268, 2025.

MAHMOOD, Wajeeha; KHAN, Asad-ur-Rehman; AYUB, Tehmina. Carbonation Resistance in Ordinary Portland Cement Concrete with and without Recycled Coarse Aggregate in Natural and Simulated Environment. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 14, n. 1, p. 437, 2022.

MAIA, Alexandre Gori *et al.* Climate change and farm-level adaptation: the Brazilian Sertão. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, [*s. l.*], v. 10, n. 5, p. 729–751, 2018.

MAINIER, Fernando B. *et al.* Corrosion Caused by Sulfur Dioxide in Reinforced Concrete. **Open Journal of Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 5, n. 4, p. 379–389, 2015.

MARAN, A. P. *et al.* Assessment of cover to reinforcement in slabs using different spacer and tying distances. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 8, p. 625–643, 2015.

MARANHÃO, Amanda Gabriela Dias; JÚNIOR, Fuad Carlos Zarzar; OLIVEIRA, Romilde Almeida de. COMPORTAMENTO DO CONCRETO EM RELAÇÃO AO ATAQUE QUÍMICO POR SULFATOS. **A Aplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias**, [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/comportamento-do-concreto-em-relacao-ao-ataque-quimico-por-sulfatos. Acesso em: 29 jan. 2026.

MARKETING TECNOSIL. Aditivos para concreto: principais tipos e para que servem. *In*: 21 nov. 2017. Disponível em: https://www.tecnosilbr.com.br/aditivos-para-concreto-principais-tipos-e-para-que-servem-2/. Acesso em: 28 ago. 2024.

MARTINS, Ana Claudia. **Impermeabilização é a causa das enchentes**. [*S. l.*], 2023. Disponível em:

https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/noticias/2023/03/711818-impermeabilizacao-e-a-causa-das-enchentes.html. Acesso em: 7 maio 2025.

MARVILA, Paula de Souza; MOUNZER, Elie Chahdan. Chloride depositions and their concentrations in concretes exposed to the Brazilian marine atmosphere. **Multidisciplinary Reviews**, [*s. l.*], v. 9, n. 1, p. 2026025–2026025, 2026.

MATEUS 7:24-25. *In*: BÍBLIA SAGRADA. Nova Almeida Revista e Atualizada (NARA)ed. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2017.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. 3. ed. [*S. l.*]: McGraw-Hill Professional, 2005.

MEHTA, Paulo J. M.; MONTEIRO, P. Kumar. **Concreto - Estrutura Propriedades E Materiais**. São Paulo (SP): Pini, 1994.

MEI, Liang; GUAN, Peng; KONG, Zheng. Remote sensing of atmospheric NO_2 by employing the continuous-wave differential absorption lidar technique. **Optics Express**, [*s. l.*], v. 25, n. 20, p. A953–A962, 2017.

MEIER, Sandro *et al.* **A light-weight NO_2 to NO_x conversion model for quantifying NO_x emissions of point sources from NO_2 satellite observations**. [*S. l.*]: Gases/Remote Sensing/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions), 2024. Disponível em: https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-159/. Acesso em: 15 fev. 2026.

MEIRA, G. R. *et al.* Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 29, n. 9, p. 667–676, 2007a.

MEIRA, G. R. *et al.* Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 32, n. 6, p. 427–435, 2010.

MEIRA, G. R. *et al.* Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment**, [*s. l.*], v. 40, n. 29, p. 5596–5607, 2006.

MEIRA, G. R. *et al.* Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. **Corrosion Science**, [*s. l.*], v. 50, n. 9, p. 2724–2731, 2008.

MEIRA, G. R. *et al.* Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area—Influence of wind regime. **Atmospheric Environment**, [*s. l.*], v. 41, n. 38, p. 8431–8441, 2007b.

MEIRA, Gibson Rocha; FERREIRA, Pablo Ramon; ANDRADE, Carmen. Long-Term Chloride Accumulation on Concrete Surface in Marine Atmosphere Zone—Modelling the Influence of Exposure Time and Chloride Availability in Atmosphere. **Corrosion and Materials Degradation**, [*s. l.*], v. 3, n. 3, p. 349–362, 2022.

MERAH, Ahmed. Concrete anti-carbonation coatings: a review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, [*s. l.*], v. 35, n. 4, p. 337–356, 2021.

MESHESHA, Derege Tsegaye; TSUNEKAWA, Atsushi; HAREGEWEYN, Nigussie. Influence of raindrop size on rainfall intensity, kinetic energy, and erosivity in a sub-humid tropical area: a case study in the northern highlands of Ethiopia. **Theoretical and Applied Climatology**, [*s. l.*], v. 136, n. 3, p. 1221–1231, 2019.

MESQUITA, Daiane Felix Santiago. **Vulnerabilidades das lavouras de sequeiro no Semiárido Brasileiro**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Economia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2016. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/17381. Acesso em: 7 maio 2025.

MEYER, Marnu; ZYL, Juandré van; COMBRINCK, Riaan. The influence of temperature on the cracking of plastic concrete. **MATEC Web of Conferences**, [*s. l.*], v. 364, p. 02018, 2022.

MICROSOFT. **CAST and CONVERT (Transact-SQL) - SQL Server**. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://learn.microsoft.com/en-us/sql/t-sql/functions/cast-and-convert-transact-sql?view=sql-server-ver17. Acesso em: 6 out. 2025.

MICROSOFT. **COLLATE (Transact-SQL) - SQL Server**. [*S. l.*], 2025a. Disponível em: https://learn.microsoft.com/en-us/sql/t-sql/statements/collations?view=sql-server-ver17. Acesso em: 6 out. 2025.

MICROSOFT. **Excel® para Microsoft 365 MSO**. versão 2412 Build 16.0.18324.20092. [*S. l.*]: Microsoft Corporation, 2025b. Windows 64 bits.

MICROSOFT. **Microsoft SQL Server 2022 Enterprise Edition**. versão 16.0.1150.1 (X64). Redmond, Washington: Microsoft Corporation, 2025c. Windows 10 Pro 10.0 (Build 26100).

MICROSOFT. **Microsoft SQL Server Management Studio**. versão 21.5.14+6.36429.23. Redmond, Washington: Microsoft Corporation, 2025d. Windows.

MICROSOFT. **Windows 11 Pro**. versão 24H2 (Compilação do SO 26100.6725). [*S. l.*]: Microsoft Corporation, 2025e. x64.

MIKROSILIKA TRADE. Products. *In*: MIKROSILIKA TRADE. [*s. d.*]. Disponível em: https://mikrosilika-trade.com/en/products/. Acesso em: 10 dez. 2024.

MIN, Sang-Ho; LEE, Han-Seung; SINGH, Jitendra Kumar. Effects of Different Inhibitors on the Corrosion Mitigation of Steel Rebar Immersed in NaCl-Contaminated Concrete Pore Solution. **Buildings**, [*s. l.*], v. 14, n. 11, p. 3559, 2024.

MIN, Hongguang; SONG, Zhigang. Investigation on the Sulfuric Acid Corrosion Mechanism for Concrete in Soaking Environment. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2018, n. 1, p. 3258123, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. **Download de dados geográficos**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm. Acesso em: 3 dez. 2024.

MIZZI, Bernice; WANG, Ying; BORG, Ruben Paul. Effects of climate change on structures; analysis of carbonation-induced corrosion in Reinforced Concrete Structures in Malta. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 442, n. 1, p. 012023, 2018.

MOELICH, G. M. *et al.* The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [*s. l.*], v. 123, p. 104182, 2021.

MOHANAVELU, Aadhityaa; NAGANNA, Sujay Raghavendra; AL-ANSARI, Nadhir. Irrigation Induced Salinity and Sodicity Hazards on Soil and Groundwater: An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies. **Agriculture**, [*s. l.*], v. 11, n. 10, p. 983, 2021.

MORCILLO, Manuel. Atmospheric corrosion in Ibero-America: the MICAT project. [*s. l.*], 1995. Disponível em: https://digital.csic.es/handle/10261/84662. Acesso em: 15 fev. 2026.

MORIYOSHI, Akihiro *et al.* Deterioration of modern concrete structures and asphalt pavements by respiratory action and trace quantities of organic matter. **PLoS ONE**, [*s. l.*], v. 16, n. 5, p. e0249761, 2021.

MÜLLER, Matthias; LUDWIG, Horst-Michael; HASHOLT, Marianne Tange. Salt frost attack on concrete: the combined effect of cryogenic suction and chloride binding on ice formation. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 54, n. 5, p. 189, 2021.

MUMBERGER, Francine Barcellos; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; BOLINA, Fabrício Longhi. Proposed durability parameters for reinforced concrete structures with design service life between 50 years and 100 years in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 15, n. 6, p. e15603, 2022.

MUSTAFA, M. A.; YUSOF, K. M. Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 24, n. 4, p. 661–670, 1994.

MUTHU, Murugan; SADOWSKI, Łukasz. Evaluation of the acid degradation properties of colloidal nanosilica-based cement pastes. **Structural Concrete**, [*s. l.*], v. 25, n. 5, p. 3615–3629, 2024.

NASA JET PROPULSION LABORATORY. **Overview | Mission**. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://airs.jpl.nasa.gov/mission/overview. Acesso em: 15 fev. 2026.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; LUIZ, Gislaine Cristina; OLIVEIRA, Ivanilton José de. Capítulo 1: Retrospectiva histórica das classificações climáticas no Brasil. *In*: NOVAIS, Giuliano Tostes (org.). **Climas do Brasil:** classificação climática e aplicações. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023. p. 41–62. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

NASIR, Muhammad *et al.* Sulfuric acid resistance of alkali/slag activated silico-manganese fume-based mortars. **Structural Concrete**, [*s. l.*], v. 22, n. S1, p. E400–E414, 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *NASA*. **Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**. [*S. l.*], 2025. Repositório de dados científicos / Portal institucional. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/. Acesso em: 11 fev. 2026.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. *NRMCA*. **CIP 42- Thermal Cracking of Concrete**: Concrete in Practice. Silver Spring, MD, EUA: National Ready Mixed Concrete Association, 2009.

NDAHIRWA, Désiré; QIAO, Hongxia; MAHAME, Constant. Effect of Carbonation, Chloride and Sulphate Attacks on Reinforced Concrete: A Review. [*s. l.*], v. Volume 6, p. 2055–6586, 2018.

NENES, Athanasios *et al.* Aerosol acidity and liquid water content regulate the dry deposition of inorganic reactive nitrogen. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 21, n. 8, p. 6023–6033, 2021.

NEVILLE, Adam M. **Properties of Concrete**. 5. ed. [*S. l.*]: Longman Publishing Co., 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/. Acesso em: 5 ago. 2024.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.; CREMONINI, Ruy Alberto. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ediçãoed. [*S. l.*]: Bookman, 2013.

NEYMAN, Jerzy. On the Two Different Aspects of the Representative Method: The Method of Stratified Sampling and the Method of Purposive Selection. **Journal of the Royal Statistical Society**, [*s. l.*], v. 97, n. 4, p. 558–625, 1934.

NGUYEN, Van-Hau. An investigation of cracks caused by concrete shrinkage and temperature difference in common reinforced concrete bridge structures. **Frattura ed Integrità Strutturale**, [*s. l.*], v. 18, n. 68, p. 242–254, 2024.

NGUYEN, Trong Chuc; BUI, Anh Kiet; HOANG, Quoc Long. Thermal Cracks in Concrete Structure—The Basic Issues to Be Understood. *In*: , 2021, Singapore. (Tinh Quoc Bui, Le Thanh Cuong, & Samir Khatir, Org.)**Structural Health Monitoring and Engineering Structures**. Singapore: Springer, 2021. p. 229–240.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1979. (Recursos naturais e meio ambiente, ISSN 0101-2894). v. 4

NIU, J.G. *et al.* Corrosion rules for ordinary concrete exposed to sulfur dioxide-containing environments. **Toxicological & Environmental Chemistry**, [*s. l.*], v. 97, n. 3–4, p. 367–378, 2015.

NIU, Wenlong *et al.* Microscopic Deterioration Mechanism and Different Reinforcement Methods of Concrete Under Freeze–Thaw Environment: A Review. **Processes**, [*s. l.*], v. 13, n. 12, p. 4064, 2025a.

NIU, Wenlong *et al.* Microscopic Deterioration Mechanism and Different Reinforcement Methods of Concrete Under Freeze–Thaw Environment: A Review. **Processes**, [*s. l.*], v. 13, n. 12, p. 4064, 2025b.

NIU, Ditao *et al.* Study on the Sulfuration Mechanism of Concrete: Microstructure and Product Analysis. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 15, p. 3386, 2020.

NÓBREGA, Ranyére Silva; FARIAS, Rafhael Fhelipe de Lima; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*s. l.*], v. 30, p. 171–180, 2015.

NÓBREGA, Ranyére Silva; SANTIAGO, Gabriela Ayane Chagas Felipe. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista de geografía Norte Grande**, [*s. l.*], n. 63, p. 9–26, 2016.

NOVAIS, Giuliano Tostes. Apresentação: Uma breve história da Classificação Climática de Novais. *In*: NOVAIS, Giuliano Tostes (org.). **Climas do Brasil:** classificação climática e aplicações. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023a. p. vii–xii. Disponível em: file:///C:/Users/thale/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/LivrodosClimasdoBrasil-final.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

NOVAIS, Giuliano Tostes. Capítulo 4: Tipologia da classificação climática brasileira. *In*: CLIMAS DO BRASIL: **CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E APLICAÇÕES**. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023b. p. 97–192. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

NOVAIS, Giuliano Tostes. **Classificação climática aplicada ao Bioma Cerrado**. 2019. Teses (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26606. Acesso em: 2 jul. 2024.

NOVAIS, Giuliano Tostes; GALVANI, Emerson. Uma tipologia de classificação climática aplicada ao estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, [*s. l.*], v. 42, p. e184630, 2022.

NOVAIS, Giuliano Tostes; MACHADO, Lilian Aline. Capítulo 2: Caminho de método. *In*: CLIMAS DO BRASIL: **CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E APLICAÇÕES**. Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023a. p. 62–76. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/51/o/Livro_dos_Climas_do_Brasil_-_final.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

NOVAIS, Giuliano Tostes; MACHADO, Lilian Aline. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. **Revista Brasileira de Climatologia**, [*s. l.*], v. 32, p. 1–39, 2023b.

NZABARINDA, Vincent. **Re: Can anyone help to convert from molecules/cm2 to micrograms/m3?**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/post/Can_anyone_help_to_convert_from_molecules_cm2_to_micrograms_m3. Acesso em: 15 fev. 2026.

OBINNA, Ubani. Coefficient of Thermal Expansion of Concrete - Structville. *In*: 28 abr. 2020. Disponível em: https://structville.com/2020/04/coefficient-of-thermal-expansion-of-concrete.html. Acesso em: 18 jan. 2026.

OKOCHI, Hiroshi. Deterioration of Concrete Structure by Acid Deposition. **Corrosion Engineering**, [*s. l.*], v. 44, n. 12, p. 690–697, 1995.

OLIVEIRA, Janir Ponciano DE. Análise econômica em plantios de pinus e eucalipto no planalto serrano catarinense. [*s. l.*], 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/125195533/An%C3%A1lise_econ%C3%B4mica_em_plantios_de_pinus_e_eucalipto_no_planalto_serrano_catarinense. Acesso em: 7 maio 2025.

OLIVEIRA, Marcio Eurelio de Paiva. **Estudo comparativo das propriedades reológicas e mecânicas dos concretos produzidos com diferentes aditivos redutores de água**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AFHQ8R. Acesso em: 5 maio 2025.

OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. Interfacial transition zone in concrete. **Advanced Cement Based Materials**, [*s. l.*], v. 2, n. 1, p. 30–38, 1995.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019a. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 19 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Sustainable Development Goal 9: Indústria, inovação e infraestrutura | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019b. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9. Acesso em: 19 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Sustainable Development Goal 11: Cidades e comunidades sustentáveis | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019c. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11. Acesso em: 19 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Sustainable Development Goal 12: Consumo e produção responsáveis | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019d. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12. Acesso em: 19 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Sustainable Development Goal 13: Ação contra a mudança global do clima | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019e. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13. Acesso em: 19 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. **Sustainable Development Goal 17: Parcerias e meios de implementação | As Nações Unidas no Brasil**. [*S. l.*], 2019f. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/17. Acesso em: 19 mar. 2025.

OVERMANN, Steffen; LIN, Xiaochen; VOLLPRACHT, Anya. Investigations on the leaching behavior of fresh concrete – A review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 272, p. 121390, 2021.

OZKAN, Istemi F. *et al.* Atmospheric Corrosion of Steel Infrastructure in Canada Under Climate Change. **Corrosion**, [*s. l.*], v. 79, n. 9, p. 1064–1078, 2023.

ÖZKAN, Şengül. Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments. **Teknik Dergi**, [*s. l.*], v. 22, n. 2, p. 5409–5423, 2011.

PAGOT, Mariana Renee *et al.* Salt dust storms from the Mar Chiquita Lagoon (Argentina): 20-year occurrence analysis and WRF-Chem modeling of PM10 distribution in selected case studies. **Environmental Monitoring and Assessment**, [*s. l.*], v. 198, n. 2, p. 150, 2026.

PALM, Vinícius *et al.* Influência da distribuição de espaçadores no cobrimento e na vida útil de lajes maciças. **Ambiente Construído**, [*s. l.*], v. 20, p. 671–686, 2020.

PANG, Xueyu *et al.* Cement hydration kinetics study in the temperature range from 15 °C to 95 °C. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 148, p. 106552, 2021.

PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. **Materials Journal**, [*s. l.*], v. 88, n. 4, p. 363–373, 1991.

PASTOR-FERNÁNDEZ, Andrés *et al.* Air Quality Assessment During the Initial Implementation Phase of a Traffic-Restricted Zone in an Urban Area: A Case Study Based on NO2 Levels in Seville, Spain. **Processes**, [*s. l.*], v. 13, n. 3, p. 645, 2025.

PEDROZA, Luis Felipe Minieri. **Avaliação do desempenho do ensaio não destrutivo de pacometria para verificação do cobrimento e posicionamento de barras de aço**. 2018. 46 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Centro Universitário de Brasília (UniCEUB/FATECS), Brasília, 2018. Disponível em: http://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/prefix/13235. Acesso em: 8 ago. 2024.

PELLIZZER, Giovanni Pais *et al.* Time-Dependent Reliability of Reinforced Concrete Considering Chloride Penetration via Boundary Element Method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, [*s. l.*], v. 17, p. e316, 2020.

PENG, Haiyou *et al.* Experimental investigations and micromechanical thermal fatigue models of concrete. **International Journal of Damage Mechanics**, [*s. l.*], v. 34, n. 1, p. 140–156, 2025.

PENG, Jianxin *et al.* Numerical Simulation on Carbonation Depth of Concrete Structures considering Time- and Temperature-Dependent Carbonation Process. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2018, n. 1, p. 2326017, 2018.

PEREIRA, Thales da Silva Soares. **Estudo dos macroclimas brasileiros e sua correlação na deterioração do concreto por carbonatação**. 2023. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Construção Civil -

Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/15338. Acesso em: 20 abr. 2024.

PEREIRA, Thales da Silva Soares; BARBOSA, Maria Teresa Gomes; SORANÇO, Laura Coura. A investigação da contribuição das condições climáticas do território brasileiro para o avanço da carbonatação no concreto. *In*: 64º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2023, Florianópolis, SC. **Anais**. Florianópolis, SC: IBRACON, 2023. Disponível em: https://ibracon.org.br/eventos/64cbc/artigos/artigos. Acesso em: 7 nov. 2024.

PEREIRA, Thales da Silva Soares; BRANQUINHO, Maria Ávila; BARBOSA, Maria Teresa Gomes. Análise crítica das prescrições normativas brasileiras acerca da durabilidade do concreto armado/protendido. *In*: 65º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2024, Maceió, AL. **Anais**. Maceió, AL: IBRACON, 2024. Disponível em: https://ibracon.org.br/eventos/65cbc/artigos/artigos. Acesso em: 7 nov. 2024.

PEREZ-MONSERRAT, Elena *et al.* Black Layers of Decay and Color Patterns on Heritage Limestone as Markers of Environmental Change. **Geosciences**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, p. 4, 2016.

PESSOA, Bruno *et al.* Assessment of thermal stress risk in mass concrete elements: use of expedited diagrams. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 17, p. e17412, 2024.

PICHLER, Bernhard L. A. Pichler. Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures Subjected to Temperature Cycles: Insight from Multiscale Thermomechanical Analysis. **Durability of Building Materials and Components for Sustainability**, [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Pichler_2023a. Acesso em: 18 jan. 2026.

PIEROTT, Rodrigo *et al.* STRESS CORROSION CRACKING IN PRESTRESSED CONCRETE: A STUDY OF SCC IN PRESTRESSED CONCRETE APPLICATIONS. [*s. l.*], 2024.

PIVETTA, Marcos. Efeito das ilhas de calor urbano esquenta até cidades de médio e pequeno porte. **Pesquisa FAPESP**, [*s. l.*], n. 331, 2023. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/efeito-das-ilhas-de-calor-urbano-esquenta-ate-cidades-de-medio-e-pequeno-porte/. Acesso em: 20 abr. 2025.

POKORNÝ, Petr *et al.* Effect of Elevated Temperature on the Bond Strength of Prestressing Reinforcement in UHPC. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 21, p. 4990, 2020.

POLESELLO, Eduardo; MAUS, Marcelo. A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido. **Revista Tecnologia e Tendências**, [*s. l.*], v. 11, n. 1, p. 14–36, 2020.

POPOVICHEVA, O B *et al.* Quantification of water uptake by soot particles. **Environmental Research Letters**, [*s. l.*], v. 3, n. 2, p. 025009, 2008.

POSSAN, Edna *et al.* Protection of interrupted concrete structure to prevent degradation: a case study. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 5, 2020.

POSSANI, Laura *et al.* Percepções das mudanças climáticas e seus impactos nos processos produtivos de uvas nas vinícolas do Rio Grande do Sul. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [*s. l.*], v. 17, n. 9, p. e10557, 2024.

POZO-ANTONIO, José Santiago *et al.* Characterization of black crusts developed on historic stones with diverse mineralogy under different air quality environments. **Environmental Science and Pollution Research International**, [*s. l.*], v. 29, n. 20, p. 29438–29454, 2022.

PRAKASH, Shubhum *et al.* Influence of silica fume and ground granulated blast furnace slag on the engineering properties of ultra-high-performance concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 117, 2021.

PTÁČEK, Petr *et al.* Activation of Bentonite and Talc by Acetic Acid as a Carbonation Feedstock for Mineral Storage of CO_2. *In*: ATOMIC ABSORPTION SPECTROSCOPY. [*S. l.*]: IntechOpen, 2012. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/26286. Acesso em: 22 jan. 2026.

PUGH, Thomas A. M. *et al.* Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. **Environmental Science & Technology**, [*s. l.*], v. 46, n. 14, p. 7692–7699, 2012.

PUNGERCAR, Vesna; MUSSO, Florian. Hygrothermal Performance of Salt (NaCl) for Internal Surface Applications in the Building Envelope. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 9, p. 3266, 2022.

PURWONDHO, Rudy; MAULANA, Suhenra. The application of new coating material in an effort for damage protection on steel and concrete. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [*s. l.*], v. 1564, n. 1, p. 012114, 2025.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python**. versão 3.13.5. [*S. l.*]: Python Software Foundation, 2025. Windows, macOS, Linux. Disponível em: https://www.python.org/downloads/. Acesso em: 4 maio 2025.

QGIS DOCUMENTATION TEAM. **12.1. The Vector Properties Dialog — QGIS Documentation documentation**. [*S. l.*], 2025. Documentation. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/working_with_vector/vector_properties.html#joins-properties. Acesso em: 16 fev. 2026.

QIN, Yu *et al.* Time-Dependent Behavior of Shrinkage Strain for Early Age Concrete Affected by Temperature Variation. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2017, n. 1, p. 3627251, 2017.

QIU, Qiwen. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 247, p. 118503, 2020.

RAHMON, Suraj Adedamola. **Carbonation of Composite Cement under Different Relative Humidity Conditions**. 2023. 201 f. Tese de PhD - The University of Leeds, West Yorkshire, UK, 2023. Disponível em:

https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/33885/1/Rahmon_S.A_Civil%20Engineering_PhD_2023.pdf. Acesso em: 10 maio 2026.

RAMADAN, S. *et al.* Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique. **Applied Surface Science**, [*s. l.*], v. 254, n. 8, p. 2255–2261, 2008.

RANDLES, C. A. *et al.* The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part I: System Description and Data Assimilation Evaluation. **Journal of Climate**, [*s. l.*], v. 30, n. 17, p. 6823–6850, 2017.

RANGEL, Caroline S. *et al.* Influence of Wetting and Drying Cycles on Physical and Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Concrete. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 24, p. 5675, 2020.

RATH, Sothyrak; SAKAI, Yuya. Impact of wet–dry cycles on concrete: chemical-phase and pore-structure changes and moisture distribution mechanisms observed via hyperspectral imaging. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 496, p. 143864, 2025.

RAUPACH, Michael; BÜTTNER, Till. **Concrete repair to EN 1504**: diagnosis, design, products and practice. Boca Raton: CRC Press, 2014.

RAY, Mike; MICROSOFT. **Char and varchar (Transact-SQL) - SQL Server**. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://learn.microsoft.com/en-us/sql/t-sql/data-types/char-and-varchar-transact-sql?view=sql-server-ver17. Acesso em: 6 out. 2025.

RIBEIRO, Milton Cezar *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, [*s. l.*], v. 142, n. 6, Conservation Issues in the Brazilian Atlantic Forest, p. 1141–1153, 2009.

RICHTER, A. Nitrogen oxides in the troposphere – What have we learned from satellite measurements?. **The European Physical Journal Conferences**, [*s. l.*], v. 1, p. 149–156, 2009.

RINCÓN, O. Troconis De *et al.* Reinforced Concrete Durability in Marine Environments DURACON Project: Long-Term Exposure. **Corrosion**, [*s. l.*], v. 72, n. 6, p. 824–833, 2016.

ROCKSTRÖM, Johan *et al.* Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology and Society**, [*s. l.*], v. 14, n. 2, 2009. Disponível em: https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/. Acesso em: 22 jan. 2026.

RODRIGUES, Jeferson Mauricio. ESPACIALIZAÇÃO DAS CHUVAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SEMIÁRIDO DA PARAÍBA. **Revista de Geociências do Nordeste**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, p. 28–35, 2020.

RODRIGUES, Romain *et al.* Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 269, p. 121240, 2021.

RONG, Guocheng *et al.* A review on chloride transport model and research method in concrete. **Materials Research Express**, [*s. l.*], v. 10, n. 4, p. 042002, 2023.

ROOSTAEI, Vahid *et al.* Vertical distribution of ambient air pollutants (PM2.5, PM10, NOX, and NO2); A systematic review. **Heliyon**, [*s. l.*], v. 10, n. 21, p. e39726, 2024.

ROSKY, Elise *et al.* Molecular simulations reveal that heterogeneous ice nucleation occurs at higher temperatures in water under capillary tension. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 23, n. 18, p. 10625–10642, 2023.

RYU, Gum-Sung *et al.* Evaluation of Concrete Compressive Strength Prediction Using the Maturity Method Incorporating Various Curing Temperatures and Binder Compositions. **Materials**, [*s. l.*], v. 17, n. 23, p. 5794, 2024.

SAE-JUNG, Jinda; CHEN, Xiao Yong; PHUONG, Do Minh. ERROR PROPAGATION MODELING IN GIS POLYGON OVERLAY. [*s. l.*], 2008.

SAETTA, Anna V.; SCOTTA, Roberto V.; VITALIANI, Renato V. Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. **ACI Materials Journal**, [*s. l.*], v. 90, n. 5, 1993. Disponível em: http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJournalSearch.aspx?m=details&ID=3874. Acesso em: 12 jul. 2026.

SAIDI, Maroua; JADIDI, Kazem; KARAKOUZIAN, Moses. Assessment of Quality of Fresh Concrete Delivered at Varying Temperatures. **CivilEng**, [*s. l.*], v. 3, n. 1, p. 135–146, 2022.

SALES, Almir *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2014.

SAMIE, F.; TIDBLAD, J. Influence of nitric acid on atmospheric corrosion of copper, zinc and carbon steels. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [*s. l.*], v. 43, n. 2, p. 117–122, 2008.

SAMPAIO, Rui; BASTOS, Alexandre; FERREIRA, Mário. New Sensors for Monitoring pH and Corrosion of Embedded Steel in Mortars during Sulfuric Acid Attack. **Sensors**, [*s. l.*], v. 22, n. 14, p. 5356, 2022.

SANT'ANNA NETO, Joao Lima. **História da Climatologia no Brasil**: gênese, paradigmas e a construção de uma Geografia do Clima. 2001. Tese de Livre-Docência - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SANTUCCI, R. J.; DAVIS, R. S.; SANDERS, C. E. Atmospheric corrosion severity and the precision of salt deposition measurements made by the wet candle method. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, [*s. l.*], v. 57, n. 2, p. 147–158, 2022.

SCHÄR, Christoph *et al.* Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. **Climatic Change**, [*s. l.*], v. 137, n. 1, p. 201–216, 2016.

SCHINDLER, Anton K.; FRANK MCCULLOUGH, B. Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions. **Transportation Research Record**, [*s. l.*], v. 1813, n. 1, p. 3–10, 2002.

SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARY ONLINE. SciELO. **SciELO - Brasil**. [*S. l.*], 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/. Acesso em: 6 ago. 2024.

SEDDON, G. Xerophytes, xeromorphs and sclerophylls: the history of some concepts in ecology. **Biological Journal of the Linnean Society**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, p. 65–87, 1974.

SEMENENOK, S. N. Effect of solar radiation on the temperature regime of concrete masonry. **Hydrotechnical Construction**, [*s. l.*], v. 3, n. 3, p. 237–240, 1969.

SENEVIRATNE, S.I. *et al.* Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. *In*: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (org.). **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2023. p. 1513–1766. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book. Acesso em: 23 fev. 2026.

SHAH, Viral *et al.* Nitrogen oxides in the free troposphere: implications for tropospheric oxidants and the interpretation of satellite NO_2 measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 23, n. 2, p. 1227–1257, 2023.

SHAROBIM, Kamal G.; FOUAD, Mohamed I. Prevention of Carbonation of RC Structures (Critical Review). **International Journal of Advances in Structural and Geotechnical Engineering**, [*s. l.*], v. 06, n. 03, p. 96–109, 2022.

SHEN, Shiyi *et al.* Study on the process of chloride invasion and deposition in concrete under dry-wet cycles and continuous loading. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [*s. l.*], v. 861, n. 7, p. 072013, 2021.

SHEN, Leiting *et al.* Thermodynamic Modeling of Calcium Sulfate Hydrates in the $CaSO_4$ –H_2 O System from 273.15 to 473.15 K with Extension to 548.15 K. **Journal of Chemical & Engineering Data**, [*s. l.*], v. 64, n. 6, p. 2697–2709, 2019.

SHERMAN, Gary E. *et al.* **QGIS**. versão 3.44.3-Solothurn. [*S. l.: s. n.*], 2025. Windows 11 Version 24H2. Disponível em: https://qgis.org/.

SHUSHKEWICH, Kenneth W. Eugène Freyssinet—Invention of Prestressed Concrete and Precast Segmental Construction. **Structural Engineering International**, [*s. l.*], v. 22, n. 3, p. 415–420, 2012.

SIDIQ, Amir *et al.* Self-repairing cement mortars with microcapsules: A microstructural evaluation approach. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 232, p. 117239, 2020.

SILVA, Libério Junio *et al.* Predominantly positive XCO2 anomalies in the Caatinga biome highlight carbon vulnerability. **Scientific Reports**, [*s. l.*], 2026. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-026-37629-1. Acesso em: 24 fev. 2026.

SILVA, Ana Célia Soares da; QUISSANGA, Vencislau Manuel; SILVA, José Guilherme Santos da. Steel-concrete composite highway bridges dynamic structural behaviour assessment considering the pavement progressive deterioration effect. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 16, p. e16404, 2022.

SILVA, Paulo Fernando Jurado da; SPOSITO, Eliseu Savério; SANTANA, Mateus Ubirajara Silva. **Geografia e economia**: Relações e interfaces. [*S. l.*]: Editora UEMS, 2020. Disponível em: https://livros.uems.br/index.php/Editora/catalog/book/16?utm_source=openai. Acesso em: 7 maio 2025.

SILVERN, R. F. *et al.* Observed NO/NO2 Ratios in the Upper Troposphere Imply Errors in NO-NO2-O3 Cycling Kinetics or an Unaccounted NOx Reservoir. **Geophysical Research Letters**, [*s. l.*], v. 45, n. 9, p. 4466–4474, 2018.

SILVESTRO, Laura; ROMANO, Fátima Sequeira; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos. **Ambiente Construído**, [*s. l.*], v. 21, p. 101–118, 2020.

SISMANIDIS, Panagiotis *et al.* A multi-level Bayesian analysis of urban and rural warming trends across global climates. **Environmental Research Communications**, [*s. l.*], v. 8, n. 5, p. 051011, 2026.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA; OBSERVATÓRIO DO CLIMA. SEEG/OC. SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. , 2024. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/. Acesso em: 3 dez. 2024.

SITEK, Libor; HLAVÁČEK, Petr; BODNÁROVÁ, Lenka. Use of high-speed water flows for accelerated mechanical modelling of erosive wear of concrete surfaces. **MATEC Web of Conferences**, [*s. l.*], v. 244, p. 02007, 2018.

SMITH, Scott H. *et al.* Service-life of concrete in freeze-thaw environments: Critical degree of saturation and calcium oxychloride formation. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 122, p. 93–106, 2019.

SONG, Yang *et al.* Concrete shrinkage and creep under drying/wetting cycles. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 140, p. 106308, 2021.

SOUSA, Ivana Tito *et al.* ATUAÇÃO DE DIFERENTES CORRETIVOS NA RECUPERAÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO CULTIVADO COM PITHECELLOBIUM DULCE (ROXB.) BENTH. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [*s. l.*], v. 17, n. 1, p. 626–637, 2024.

SOUSA, Flávio; MOURA, Derick. Evapotranspiração potencial (ETp) e sua influência na vazão de rios do Cerrado Brasileiro. **Élisée - Revista de Geografia da UEG**, [*s. l.*], v. 11, p. e111222, 2022.

SOUTO, Jean. **CONCRETO – 100 DÚVIDAS**: O mundo do concreto pela visão de um concreteiro. São Paulo, SP: Leud, 2024.

SPARACINO, J.; ARGIBAY, D. S.; ESPINDOLA, G. Long-term (35 Years) Rainy and Dry Season Characterization in Semiarid Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*s. l.*], v. 36, p. 377–391, 2021.

SQUIZZATO, Rafaela *et al.* Beyond megacities: tracking air pollution from urban areas and biomass burning in Brazil. **npj Climate and Atmospheric Science**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, p. 17, 2021.

STEFANONI, Matteo; ANGST, Ueli M.; ELSENER, Bernhard. Electrochemistry and capillary condensation theory reveal the mechanism of corrosion in dense porous media. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 8, p. 7407, 2018.

SU, Ray Kai Leung *et al.* Novel accelerated carbonation methods based on deep breathing analogous and prediction model for pressurized carbonation of concrete. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 14, p. 24268, 2024.

SUN, Jia *et al.* A review of chloride transport in concrete exposed to the marine atmosphere zone environment: Experiments and numerical models. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 84, p. 108591, 2024.

TAHSIRI, Hamidreza; BELARBI, Abdeldjelil; GENCTURK, Bora. Thermal effects on transfer length and prestress losses in CFRP prestressed prisms. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 416, p. 135160, 2024.

TAHWIA, Ahmed M. *et al.* Long-Term Performance of Concrete Made with Different Types of Cement under Severe Sulfate Exposure. **Materials**, [*s. l.*], v. 16, n. 1, p. 240, 2022.

TANG, Yongbo *et al.* Dehydration Pathways of Gypsum and the Rehydration Mechanism of Soluble Anhydrite γ-CaSO4. **ACS Omega**, [*s. l.*], v. 4, n. 4, p. 7636–7642, 2019.

TANG, Sai *et al.* Spatial Sampling Design for Monitoring the Quality of Cultivated Land by Simulated Annealing. **Sensor Letters**, [*s. l.*], v. 12, 2014.

TAYLOR, Peter Clement. **Curing concrete**. Boca Raton: CRC press, 2014.

TEIXEIRA, Antônio *et al.* EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO DETERMINADA COM PRODUTOS MODIS E ESTAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. *In*: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO, 2017, Fortaleza, CE. **Anais**. [*S. l.*]: Embrapa, 2017. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/0B9cQbhL617PHLUtWdHZzeDBmUzg/view. Acesso em: 23 fev. 2026.

THE GLOBAL CARBON ATLAS. Carbon story. *In*: GLOBAL CARBON ATLAS. [*s. d.*]. Disponível em: https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-story/. Acesso em: 22 jan. 2026.

TIAN, Bing; COHEN, Menashi D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?. **Cement and Concrete Research**, [*s. l.*], v. 30, n. 1, p. 117–123, 2000.

TIAN, Wei; HAN, Nv. Experiment Analysis of Concrete's Mechanical Property Deterioration Suffered Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2017, n. 1, p. 5673985, 2017.

TING, Matthew Zhi Yeon *et al.* Deterioration of marine concrete exposed to wetting-drying action. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 278, p. 123383, 2021.

TOOHEY, Matthew *et al.* Stratospheric residence time and the lifetime of volcanic stratospheric aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 25, n. 6, p. 3821–3839, 2025.

TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado**: uma meta-análise. 2011. 186 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, 2011. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29405/000777122.pdf?sequence=1. Acesso em: 5 fev. 2026.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Appendix C - Chloride Threshold Values**. [*S. l.*]: Transportation Research Board, 2018. Apêndice técnico. Disponível em: https://shrp2.transportation.org/documents/Appendix_C-Chloride_threshold_v3.pdf. Acesso em: 8 fev. 2026.

TRUDINGER, Cathy; BORLEY, Issy; LANGENFELDS, Ray. **Even as emissions level off, carbon dioxide in the atmosphere is growing faster than ever. Here's why**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: http://theconversation.com/even-as-emissions-level-off-carbon-dioxide-in-the-atmosphere-is-growing-faster-than-ever-heres-why-254072. Acesso em: 15 fev. 2026.

TU, Jing-Ting; WANG, Xiao-Hui. Influence of the environmental relative humidity on carbonation behavior of cracked PC, FA and GGBS concretes. **Journal of Physics: Conference Series**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 012051, 2021.

TUKEY, John W. **Exploratory Data Analysis**. 1. ed. Reading, Mass: Pearson, 1977.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of steel in concrete**. 1982. 474 f. Doctoral Thesis (monograph) - LUND UNIVERSITY, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Swedish, 1982. Disponível em: https://www.scopus.com/pages/publications/0020092304. Acesso em: 21 jan. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. UFJF. Acervo digital. *In*: BIBLIOTECAS | JF. [*s. d.*]. Disponível em: https://www2.ufjf.br/biblioteca/pesquisa/acervo-digital/. Acesso em: 2 dez. 2024.

VACEK, Miroslav *et al.* Experimental Measurement of Deposition Chloride Ions in the Vicinity of Road Cut. **Materials**, [*s. l.*], v. 16, n. 1, p. 88, 2022.

VALDUGA, Vander; MINASSE, Maria Henriqueta S. G. G. O enoturismo no Brasil: principais regiões e características da atividade. **Territoires du vin**, [*s. l.*], n. 9, 2018. Disponível em: https://preo.ube.fr/territoiresduvin/index.php?id=1635. Acesso em: 7 maio 2025.

VALENZA, John J.; SCHERER, George W. Mechanism for Salt Scaling. **Journal of the American Ceramic Society**, [*s. l.*], v. 89, n. 4, p. 1161–1179, 2006.

VAN, Linh Nguyen *et al.* Comprehensive relationships between kinetic energy and rainfall intensity based on precipitation measurements from an OTT Parsivel2 optical disdrometer. **Frontiers in Environmental Science**, [*s. l.*], v. 10, 2022. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.985516/full. Acesso em: 11 jan. 2026.

VAN DER BERGH, John Milan *et al.* Comparison of Microbially Induced Healing Solutions for Crack Repairs of Cement-Based Infrastructure. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 13, n. 8, p. 4287, 2021.

VÄNTTINEN, Kari *et al.* Equilibrium Moisture Content of High Strength Concrete Used in Hollow Core Slabs. *In*: JOURNAL OF PHYSICS CONFERENCE SERIES, 2023. **Anais [...]**. [*S. l.*]: IOP, 2023. p. 012032. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023JPhCS2654a2032V. Acesso em: 17 fev. 2026.

VERHULST, Kristal R. *et al.* Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 17, n. 13, p. 8313–8341, 2017.

VINAYKUMAR, C. H.; TIRTHAKAR, S. N. Quality Control In Construction Using Non-Destructive Technology. **Journal of Real Estate, Construction & Management**, [*s. l.*], v. 23, n. 4, p. 5–10, 2008.

VIVEK, D. *et al.* Experimental Investigation on Carbonation due to Climate Change Impacts. **Global NEST Journal**, [*s. l.*], v. 25, n. 6, p. 130–141, 2023.

VLADISLAVOVIC, Triapyshko Andrei *et al.* Evaluating the effectiveness of technical solutions for reinforcing concrete structures with composite materials. **Journal of critical reviews**, [*s. l.*], v. 7, n. 04, 2020. Disponível em: http://jcreview.com/fulltext/197-1585484928.pdf?1585745917. Acesso em: 16 jul. 2024.

VON GREVE-DIERFELD, Stefanie *et al.* Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, [*s. l.*], v. 53, n. 6, p. 136, 2020.

WALLY, Gustavo Bosel *et al.* On factors affecting probabilistic service life modeling of concrete structures under marine environments. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*s. l.*], v. 15, p. e15605, 2022.

WAN, Li Soon *et al.* Synergistic impact of temperature and pore saturation on corrosion in carbonated reinforced concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], v. 22, p. e04364, 2025a.

WAN, Li Soon *et al.* Synergistic impact of temperature and pore saturation on corrosion in carbonated reinforced concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], v. 22, p. e04364, 2025b.

WANG, Lei *et al.* Chloride Corrosion Process of Concrete with Different Water–Binder Ratios under Variable Temperature Drying–Wetting Cycles. **Materials**, [*s. l.*], v. 17, n. 10, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/17/10/2263. Acesso em: 6 fev. 2026.

WANG, Jiaming *et al.* Effects of carbonation on mechanical properties of concrete under high temperature and impact. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction**, [*s. l.*], v. 175, n. 1, p. 44–56, 2022.

WANG, Junfeng *et al.* Fast sulfate formation from oxidation of SO_2 by NO_2 and HONO observed in Beijing haze. **Nature Communications**, [*s. l.*], v. 11, n. 1, p. 2844, 2020.

WANG, Lingbo *et al.* Pore Solution Chemistry of Calcium Sulfoaluminate Cement and Its Effects on Steel Passivation. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 9, n. 6, p. 1092, 2019.

WANG, Zehua *et al.* Synergistic Reaction of SO_2 with NO_2 in Presence of H_2O and NH_3: A Potential Source of Sulfate Aerosol. **International Journal of Molecular Sciences**, [*s. l.*], v. 20, n. 15, p. 3746, 2019.

WANG, Guoqing *et al.* Temperature and Temperature Stress Analysis in Mass Concrete under Cold Environments of Strong Wind and Large Diurnal Temperature Range. **Geofluids**, [*s. l.*], v. 2022, n. 1, p. 3064754, 2022.

WANG, Yu *et al.* The characterization of chloride effect on concrete water sorption and its application in the modelling of concrete conditions in tidal zones. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 253, p. 119074, 2020.

WANG, Yong; XIA, Wenwen; ZHANG, Guang J. What rainfall rates are most important to wet removal of different aerosol types?. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 21, n. 22, p. 16797–16816, 2021.

WEGEN, Gert van der; POLDER, Rob; BREUGEL, Klaas van. Guideline for service life design of structural concrete - A performance based approach with regard to chloride induced corrosion. **Heron**, [*s. l.*], v. 57, n. 3, p. 153–168, 2012.

WILBANKS, T. *et al.* Toward indicators of the performance of US Infrastructures under climate change risks. **Climatic change**, [*s. l.*], v. 163, p. 1795–1813, 2020.

WILSON, Tyler *et al.* Beyond Point Prediction: Capturing Zero-Inflated & Heavy-Tailed Spatiotemporal Data with Deep Extreme Mixture Models. *In*: BEYOND POINT PREDICTION, 2022, New York, NY, USA. **Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining**. New York, NY, USA:

Association for Computing Machinery, 2022. p. 2020–2028. Disponível em: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3534678.3539464. Acesso em: 23 fev. 2026.

WOOD, Warren W.; SANFORD, Ward E. Eolian transport, saline lake basins, and groundwater solutes. **Water Resources Research**, [*s. l.*], v. 31, n. 12, p. 3121–3129, 1995.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO*. **Carbon dioxide levels increase by record amount to new highs in 2024**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: https://wmo.int/news/media-centre/carbon-dioxide-levels-increase-record-amount-new-highs-2024. Acesso em: 15 fev. 2026.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO*. **Guide to Instruments and Methods of Observation**: Volume I – Measurement of Meteorological Variables. Geneva: *WMO*, 2024. (Guide to Instruments and Methods of Observation, v. WMO-No. 8). v. I Disponível em: https://library.wmo.int/records/item/68695-guide-to-instruments-and-methods-of-observation. Acesso em: 11 jan. 2026.

WU, Jieqiong *et al.* Effects of pre-fatigue damage on high-cycle fatigue behavior and chloride permeability of RC beams. **International Journal of Fatigue**, [*s. l.*], v. 122, p. 9–18, 2019.

WU, Yueyue *et al.* Spatial and Temporal Variability of Near-Surface CO2 and Influencing Factors in Urban Communities. **Land**, [*s. l.*], v. 14, n. 4, p. 888, 2025.

WU, Chao *et al.* Testing of High Thermal Cycling Stability of Low Strength Concrete as a Thermal Energy Storage Material. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 6, n. 10, p. 271, 2016.

XAVIER, Larissa; FILGUEIRAS, Leandro. Estudo de patologias em estruturas hidráulicas. **CONCRETO & Construções - ISSN 1809-7197**, [*s. l.*], v. 110, n. 110, p. 31–35, 2023.

XIA, Kailun *et al.* Carbonation Resistance of Surface Protective Materials Modified with Hybrid NanoSiO2. **Coatings**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 269, 2021.

XIE, Zongxu *et al.* Seasonal Characteristics of Disdrometer-Observed Raindrop Size Distributions and Their Applications on Radar Calibration and Erosion Mechanism in a Semi-Arid Area of China. **Remote Sensing**, [*s. l.*], v. 12, n. 2, p. 262, 2020.

XING, Yingmei *et al.* Remotely sensed spatiotemporal dynamics of soluble salts and their natural and anthropogenic drivers in hyper-arid basins. **Scientific Reports**, [*s. l.*], v. 16, n. 1, p. 4262, 2026.

XIONG, Jie *et al.* A hierarchical climatic zoning method for energy efficient building design applied in the region with diverse climate characteristics. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 186, p. 355–367, 2019.

XU, Lantian *et al.* A New Concrete Freeze–Thaw Damage Model Based on Hydraulic Pressure Mechanism and Its Application. **Materials**, [*s. l.*], v. 18, n. 15, p. 3708, 2025.

XU, Chen *et al.* Chloride ion ingress distribution within an alternate wetting-drying marine environment area. **Science China Technological Sciences**, [*s. l.*], v. 55, n. 4, p. 970–976, 2012.

XU, Zuhua *et al.* Effects of temperature, humidity and CO_2 concentration on carbonation of cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 346, p. 128399, 2022.

XU, Hao *et al.* Multidimensional Transport Experiment and Simulation of Chloride Ions in Concrete Subject to Simulated Dry and Wet Cycles in a Marine Environment. **Materials**, [*s. l.*], v. 16, n. 22, p. 7185, 2023.

XU, Wanyun *et al.* NH_3-promoted hydrolysis of NO_2 induces explosive growth in HONO. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 19, n. 16, p. 10557–10570, 2019.

YANG, Hyun Min *et al.* Apparent Activation Energy for Predicting Compressive Strength of Concrete Using Blast Furnace Slag. **Applied Mechanics and Materials**, [*s. l.*], v. 764–765, p. 13–17, 2015.

YANG, Zixin *et al.* Deliquescence-driven moisture sorption in salt-contaminated sintered bricks: Experimental analysis and implications for building heritage conservation. **Frontiers of Architectural Research**, [*s. l.*], 2026. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263525001785. Acesso em: 6 fev. 2026.

YANG, Yong *et al.* Influence of Sulfates on Formation of Ettringite during Early C3A Hydration. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 19, p. 6934, 2022.

YANG, Keun-Hyeok *et al.* Temperature Effect on Service Life of Reinforced Concrete (RC) Structure Under Chemical Erosion: Deterministic and Probabilistic Approach. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 15, n. 9, p. 4816, 2025.

YANG, Gang; ZHOU, Lijun. Acid rain formation through catalytic transformation of sulfur dioxide over clay dusts: remarkable promotion by a vicinal aluminium site. **Catalysis Science & Technology**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 785–789, 2021.

YENATS; DBASTON; XUNILK. **Robust Zonal stats in R and QGIS**. [*S. l.*], 2017. Stack Exchange. Disponível em: https://gis.stackexchange.com/questions/259475/robust-zonal-stats-in-r-and-qgis. Acesso em: 15 fev. 2026.

YI, Bing *et al.* Research on Inhibiting Performance of Compound Corrosion Inhibitors Based on Nitrite. **Advances in Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 6655080, 2021.

YIN, Guang-Ji *et al.* A Review on the Transport-Chemo-Mechanical Behavior in Concrete under External Sulfate Attack. **Coatings**, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 174, 2023.

YIN, Qingqing *et al.* Measurement report: Long-term variations in surface NO_x and SO_2 mixing ratios from 2006 to 2016 at a background site in the Yangtze River Delta

region, China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [*s. l.*], v. 22, n. 2, p. 1015–1033, 2022.

YOON, In-Seok; CHANG, Chun-Ho. Effect of Chloride on Electrical Resistivity in Carbonated and Non-Carbonated Concrete. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 10, n. 18, 2020a. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6272. Acesso em: 6 fev. 2026.

YOON, In-Seok; CHANG, Chun-Ho. Time Evolution of CO_2 Diffusivity of Carbonated Concrete. **Applied Sciences**, [*s. l.*], v. 10, n. 24, p. 8910, 2020b.

YOUNAS, Ahtisham; SHAHZAD, Sharoon; INAYAT, Shahzad. Data Analysis and Presentation in Integrative Reviews: A Narrative Review. **Western Journal of Nursing Research**, [*s. l.*], v. 44, n. 12, p. 1124–1133, 2022.

YU, Qi; GUO, Bingbing; LI, Changjiang. Effects of CO_2 Concentration and the Uptake on Carbonation of Cement-Based Materials. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 18, p. 6445, 2022.

ZHA, Jie *et al.* Influence of Temperature and Carbonation on Chloride Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete Pore Solutions. **International Journal of Electrochemical Science**, [*s. l.*], v. 17, n. 1, p. 220130, 2022.

ZHANG, Hao *et al.* Carbonation Resistance of Cement-Based Materials Improved by Nitrite. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2024, n. 1, p. 8895736, 2024.

ZHANG, Deying *et al.* Estimating Ground-Level Concentrations of Multiple Air Pollutants and Their Health Impacts in the Huaihe River Basin in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [*s. l.*], v. 16, n. 4, p. 579, 2019.

ZHANG, Qingzhang *et al.* Investigation on Numerical Simulation of Chloride Transport in Unsaturated Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 7548071, 2021.

ZHANG, Kai *et al.* Long-term deterioration behavior of round-end hollow piers during cyclic solar radiation. **Engineering Fracture Mechanics**, [*s. l.*], v. 310, p. 110436, 2024.

ZHANG, Chuanchuan *et al.* Mechanism and Performance Control Methods of Sulfate Attack on Concrete: A Review. **Materials**, [*s. l.*], v. 17, n. 19, p. 4836, 2024.

ZHANG, Genhe *et al.* State of the Art on Prevention and Control Measures of Thermal Cracks in Mass Concrete. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 17, n. 24, p. 11301, 2025.

ZHANG, Guoming *et al.* Wind erosion from crusted playa surfaces by no saltation and with saltation: A comparison through laboratory wind tunnel experiments. **International Soil and Water Conservation Research**, [*s. l.*], v. 11, p. 518–527, 2023.

ZHANG, Li-Na; KWON, Seung-Jun; WANG, Xiao-Yong. Low-Carbon Slag Concrete Design Optimization Method Considering the Coupled Effects of Formwork Stripping, Strength Progress, and Carbonation Durability. **Buildings**, [*s. l.*], v. 15, n. 8, p. 1316, 2025.

ZHANG, Guohui; LI, Xiaohang; LI, Zongli. Experimental Study on Static Mechanical Properties and Moisture Contents of Concrete Under Water Environment. **Sustainability**, [*s. l.*], v. 11, n. 10, p. 2962, 2019.

ZHAO, Ming. A Study of AR-, TS-, and MCS-Associated Precipitation and Extreme Precipitation in Present and Warmer Climates. **Journal of Climate**, [*s. l.*], v. 35, n. 2, p. 479–497, 2022.

ZHAO, Gaowen *et al.* Degradation Mechanism of Concrete Subjected to External Sulfate Attack: Comparison of Different Curing Conditions. **Materials**, [*s. l.*], v. 13, n. 14, p. 3179, 2020.

ZHAO, Qicai *et al.* Influence of Structural Characterization of C3S-C3A Paste under Sulfate Attack. **Materials**, [*s. l.*], v. 16, n. 1, p. 77, 2022.

ZHOU, Yong *et al.* Moisture Transport of Axial-Compression-Damaged Mortar and Concrete in Atmospheric Environment. **Materials**, [*s. l.*], v. 15, n. 16, p. 5498, 2022.

ZHOU, Xianliang *et al.* Nitric acid photolysis on surfaces in low-NOx environments: Significant atmospheric implications. **Geophysical Research Letters**, [*s. l.*], v. 30, n. 23, 2003. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL018620. Acesso em: 25 jan. 2026.

ZHOU, Xin *et al.* The removal of atmospheric aerosols in a heavy industrial coastal city in China with frequent rainfall. **Frontiers in Marine Science**, [*s. l.*], v. 9, 2022. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2022.977120/full. Acesso em: 29 jan. 2026.

ZHU, B.-Q. Atmospheric significance of aeolian salts in the sandy deserts of northwestern China. **Solid Earth**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 191–203, 2016.

ŽIVICA, Vladimir; KRIZMA, Martin. Acidic-resistant slag cement. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 65, n. 18, p. 1073–1080, 2013.

ZOU, Yang; YE, Yichao; TANG, Qianlong. Innovative Insights into Fatigue Damage Evolution of Shield Tunnel Segments by Introducing Stable Damage Limit and Memory Effect. **Materials**, [*s. l.*], v. 18, n. 4, p. 740, 2025.

ZUNITA, Megawati; KEVIN, Yosef Juliyus. Ionic liquids as corrosion inhibitor: From research and development to commercialization. **Results in Engineering**, [*s. l.*], v. 15, p. 100562, 2022.

ZYL, J. V. *et al.* The influence of solar radiation on the temperature of fresh concrete, pore water evaporation and plastic shrinkage cracking. *In*: , 2021. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/The-influence-of-

solar-radiation-on-the-temperature-Zyl-Moelich/93edc837957f2df1092ee00480bfab1493da0fb4. Acesso em: 16 fev. 2026.

APÊNDICE A – Descrição do conjunto populacional e fontes de dados

- NOTA DE ESCLARECIMENTO METODOLÓGICO: os dados referentes à radiação solar (Rs) apresentados neste Apêndice refletem a etapa exploratória de coleta e processamento de dados da pesquisa. Contudo, em alinhamento com o refinamento metodológico e para evitar o mascaramento de escala na avaliação macroclimática, essa variável é suprimida da composição final dos perfis geográficos. O registro de seu processamento é mantido neste documento exclusivamente por rigor científico, reprodutibilidade e transparência quanto ao volume de dados inicialmente investigado.

Para temperatura, umidade relativa, intensidade de precipitações atmosféricas e radiação solar (variável exploratória), utilizam-se os dados de estações meteorológicas automáticas para o período de 2000-2024, disponibilizados brutos e individualizados (INMET, 2025).

O conjunto populacional inicial consiste em um volume de 79.824.072 registros horários, consolidados na tabela `[dbo].[Dados consolidados - INMET]` de um banco de dados denominado `DadosINMET`, implementado no Microsoft SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), hospedado no servidor local `PEREIRA-TSS`. Essa população de dados inclui um espectro de variáveis como temperatura, umidade relativa, precipitações atmosféricas e radiação solar (variável exploratória), além de metadados geográficos das estações meteorológicas automáticas (633 no total), fornecendo uma cobertura espacial detalhada de todo o território brasileiro.

Para as variáveis obtidas via produtos de satélite, utilizam-se dados disponibilizados pelo *National Aeronautics and Space Administration* (*NASA*) (*GES DISC*) (*NASA*, 2025), com períodos e resoluções específicos conforme a disponibilidade de cada sensor. Para a concentração de dióxido de carbono atmosférico ($[CO_2]$), utiliza-se o produto *AIRS/Aqua L3 CLIMCAPS* (Barnet, 2021) para o período de setembro de 2002 a dezembro de 2024 (22 anos), com resolução espacial de 1° × 1°. Para os óxidos de nitrogênio ([NOx]) e óxidos de enxofre ([SOx]), utiliza-se o sensor *OMI* (Li; Krotkov; Leonard, 2012; Krotkov *et al.*, 2013) a bordo do satélite Aura para o período de outubro de 2004 a outubro de 2025 (21 anos), com resolução espacial de 0,25° × 0,25°.

Para o sulfato particulado atmosférico ($[SO_4^{2-}]$), utiliza-se o produto *MERRA-2 M2TMNXADG* (*GMAO*, 2015) para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2024

(25 anos), com resolução espacial de 0,5° × 0,625° e resolução temporal de 1 mês. A população de dados para [SO_4^{2-}] consiste em 300 arquivos mensais em formato *netCDF* (*Network Common Data Form*), resultando em 2.268 pixels sobre o território brasileiro após recorte espacial.

Para a deposição de íons cloreto ([Cl^-]), utiliza-se o mesmo produto *MERRA-2 M2TMNXADG* (*GMAO*, 2015), especificamente as variáveis de deposição de sal marinho (`SSSD001` a `SSSD005`) para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2024 (25 anos), com resolução espacial de 0,5° × 0,625° e resolução temporal de 1 mês. A deposição de cloretos é calculada como a soma das cinco variáveis de deposição de sal marinho, convertida de kg/m²/s para mg/m²/dia (fator de conversão: $8{,}64 \cdot 10^{10}$).

APÊNDICE B – Processamento de variáveis do INMET (T, UR, i_{prec})

- NOTA DE ESCLARECIMENTO METODOLÓGICO: os dados referentes à radiação solar (Rs) apresentados neste Apêndice refletem a etapa exploratória de coleta e processamento de dados da pesquisa. Contudo, em alinhamento com o refinamento metodológico e para evitar o mascaramento de escala na avaliação macroclimática, esta variável foi suprimida da composição final dos perfis geográficos. O registro de seu processamento é mantido neste documento exclusivamente por rigor científico, reprodutibilidade e transparência quanto ao volume de dados inicialmente investigado.

Este Apêndice detalha o fluxo metodológico completo de tratamento das variáveis obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025). O procedimento abrange três etapas sequenciais: (i) a padronização semiautomatizada dos arquivos brutos via algoritmo *Visual Basic for Applications* (*VBA*); (ii) a constituição da população no banco de dados SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c) e a subsequente amostragem estratificada dos 79.824.072 registros horários; e (iii) a exportação e preparação final dos dados para análise estatística e geoespacial.

B.1 PADRONIZAÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS ARQUIVOS BRUTOS

A etapa preliminar consiste na conformação dos dados climáticos históricos, disponibilizados originalmente em múltiplas planilhas eletrônicas (uma para cada combinação de estação meteorológica e ano de coleta) no formato Excel (Microsoft, 2025b). Para viabilizar a importação massiva e a unificação desses dados no ambiente SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), desenvolve-se um algoritmo em *VBA* focado na padronização estrutural dos arquivos.

O Código 1 é projetado para processar os dados independentemente do ano de origem (2000 a 2024), eliminando inconsistências de formatação que impediriam a consolidação automática. O algoritmo prioriza os atributos de confiabilidade e eficiência de desempenho conforme a *ISO/IEC* 25010 (*ISO*, 2023), da *International Organization for Standardization* (*ISO*).

Código 1 – Função *VBA* para unificar planilhas do INMET (2000-2024)

```
Sub UnificarPlanilhasINMET()
    Dim wsUnificado As Worksheet
    Dim wbSource As Workbook
    Dim sourcePath As String
    Dim lastRow As Long
    Dim file As String
    Dim srcSheet As Worksheet
    Dim i As Long, j As Long
    Dim valorOriginal As Variant
    Dim iLinhaExtendida As Long
    Dim lastDataRow As Long

    Application.ScreenUpdating = False
    Application.Calculation = xlCalculationManual

    ' Definir a planilha de destino
    Set wsUnificado = ThisWorkbook.Worksheets("Unificado")
    sourcePath = "C:\Users\thale\OneDrive\Área de Trabalho\INMET\"

    file = Dir(sourcePath & "*.xlsx")

    Do While file <> ""
        On Error Resume Next
        Set wbSource = Workbooks.Open(sourcePath & file)
        If Err.Number <> 0 Then GoTo NextFile

        Set srcSheet = wbSource.Sheets(1)
        lastRow = wsUnificado.Cells(wsUnificado.Rows.Count, 1).End(xlUp).Row + 1

        ' === ETAPA 1: Transferir cabeçalho ==='
        For j = 1 To 8
            Select Case j
                Case 5, 6 ' Latitude e Longitude
                    valorOriginal = CDbl(srcSheet.Cells(j, 2).Value)
                Case 7 ' Altitude
                    valorOriginal = CDbl(srcSheet.Cells(j, 2).Value)
                Case 8 ' Data com ano de 2 dígitos
                    valorOriginal = DateValue(srcSheet.Cells(j, 2).Value)
                Case Else ' Demais colunas
                    valorOriginal = srcSheet.Cells(j, 2).Value
            End Select

            wsUnificado.Cells(lastRow, j).Value = valorOriginal

            ' Preencher para todas as linhas estendidas
            lastDataRow = srcSheet.Cells(srcSheet.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
            For iLinhaExtendida = lastRow + 1 To lastRow + lastDataRow - 10
                wsUnificado.Cells(iLinhaExtendida, j).Value = valorOriginal
            Next iLinhaExtendida
        Next j

        ' === ETAPA 2: Transferir dados brutos ==='
        For i = 10 To lastDataRow
            For j = 1 To 19
                valorOriginal = srcSheet.Cells(i, j).Value
                If IsNumeric(valorOriginal) And valorOriginal <> "" Then
                    wsUnificado.Cells(lastRow + i - 10, j + 9).Value = CDbl(valorOriginal)
                Else
                    wsUnificado.Cells(lastRow + i - 10, j + 9).Value = valorOriginal
                End If
            Next j
        Next i

        wbSource.Close False
        Kill sourcePath & file

NextFile:
        file = Dir()
    Loop

    Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
    Application.ScreenUpdating = True

    MsgBox "Processo concluído!", vbInformation
End Sub
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

B.1.1 **Características do algoritmo de padronização**

A implementação foca na capacidade de processar arquivos com estruturas heterogêneas, característica comum nas séries históricas do INMET (INMET, 2025).

Destacam-se as seguintes funcionalidades críticas para a integridade da base de dados:

- Detecção dinâmica de registros: identificação automática do número de linhas úteis (`lastDataRow`) em cada arquivo, adaptando-se às variações anuais sem necessidade de intervenção manual.
- Tratamento de dados temporais e geográficos: conversão automática de formatos de data (anos de dois dígitos para quatro dígitos) e padronização das coordenadas geográficas (latitude e longitude) para o formato decimal, garantindo a consistência necessária para o georreferenciamento posterior.
- Automação de fluxo: o *script* executa a leitura recursiva de todos os arquivos `.xlsx` no diretório alvo, transfere metadados e matrizes de dados climáticos para uma estrutura tabular única e exclui os arquivos processados para otimização de armazenamento.

Esta etapa de "conformação" dos dados foi pré-requisito para a constituição do conjunto universo (população) no banco de dados, detalhada na seção a seguir.

B.2 PROCESSO DE AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA

Após a importação dos dados padronizados para o Microsoft SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), constitui-se a população de análise. Dada a magnitude do conjunto populacional e a necessidade de análises estatísticas rigorosas e computacionalmente eficientes, opta-se pela aplicação de um método de amostragem estratificada aleatória homogênea [15] (Boschetti; Stehman; Roy, 2016). Essa metodologia é selecionada estrategicamente por sua capacidade de preservar a variabilidade inerente aos dados climáticos, minimizando vieses amostrais e assegurando a representatividade proporcional de diferentes contextos ambientais (Kotze; Beukes; Seifert, 2019).

[15] Amostragem estratificada aleatória homogênea: técnica de amostragem probabilística onde a população é dividida em subgrupos (estratos) homogêneos com base em características comuns. Em seguida, uma amostra aleatória simples é retirada de cada estrato, garantindo que todos os subgrupos sejam representados proporcionalmente. "Homogênea" refere-se à seleção de um número igual de elementos em cada estrato ou à uniformidade dos elementos dentro do estrato (Cochran, 1977; Bolfarine; Bussab, 2019).

A amostragem estratificada minimiza a variância dos estimadores em populações heterogêneas, ao segmentar o domínio em subgrupos internamente homogêneos, sendo metodologicamente superior para dados climáticos com alta variabilidade espacial (Cochran, 1977; Tang *et al.*, 2014; Lohr, 2021). Como técnica de amostragem probabilística, o método assegura a validade estatística das inferências para a população alvo, reduzindo o erro padrão das médias calculadas (Neyman, 1934; Kish, 1995).

Os estratos são definidos com base em quatro variáveis categóricas, consideradas fundamentais para capturar as nuances climáticas relevantes à durabilidade do CA/CP:

i) Domínio Climático de Novais (2019): categorização geográfica do Brasil que classifica o território em oito distintas áreas climáticas: Árido, Equatorial, Equatorial Ameno, Semiárido, Subtropical, Temperado, Tropical e Tropical Ameno. Esta variável assegura que a amostra represente a diversidade macroclimática do país.
ii) Ano de Coleta: abrangendo o período de 2000 a 2024, este critério garante a captura de tendências temporais de longo prazo e variações interanuais, essenciais para uma análise das mudanças climáticas e seus impactos.
iii) Código (*WMO*) – *World Meteorological Organization*: o código de identificação único de cada estação meteorológica, permitindo a representação da variabilidade espacial local e microclimática entre as diferentes estações meteorológicas automáticas.
iv) Estação do Ano: a inclusão dos quatro períodos sazonais (primavera, verão, outono e inverno) como critério de estratificação para garantir a representação das variações sazonais e dos ciclos diurnos e para a compreensão dos mecanismos de deterioração do CA/CP que são influenciados por padrões sazonais.

Para determinar a dimensão exata do universo amostral através do número de microestratos únicos (M), realiza-se a quantificação das combinações únicas destas quatro variáveis no banco de dados. O procedimento computacional, executado via consulta de agregação em linguagem de consulta estruturada (*Structured Query Language* – *SQL*), é apresentado no Código 2:

Código 2 – Consulta *SQL* para quantificação dos microestratos únicos (M)

```
SELECT
    COUNT(*) AS NumeroDeMicroEstratosUnicos
FROM (
    SELECT DISTINCT
        [Domínio Climático de Novais],
        [Ano de Coleta],
        [CODIGO (WMO):],
        [Estação do Ano] -- Variável de estratificação
    FROM
        [DadosINMET].[dbo].[Dados consolidados - INMET]
    WHERE
        [Domínio Climático de Novais] IN (
            'Árido',
            'Equatorial',
            'Equatorial Ameno',
            'Semiárido',
            'Subtropical',
            'Subtropical Frio',
            'Tropical',
            'Tropical Ameno'
        )
        AND [Ano de Coleta] BETWEEN 2000 AND 2024
        AND [CODIGO (WMO):] IS NOT NULL
        AND [Estação do Ano] IS NOT NULL
) AS DistinctCombinations;
    MsgBox "Processo concluído!", vbInformation
End Sub
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A lógica do algoritmo opera em duas etapas: primeiramente, a subconsulta interna (`DistinctCombinations`) filtra os registros para considerar apenas os oito domínios climáticos de interesse e o período de 2000 a 2024, isolando as combinações únicas das variáveis estratificadoras. Em seguida, a consulta externa realiza a contagem total (`COUNT`) dessas ocorrências distintas.

A execução desta rotina resulta na identificação de 36.237 microestratos [16] distintos. Essa granularidade na estratificação assegura que mesmo regiões climáticas menos frequentes ou com menor densidade de estações meteorológicas automáticas sejam devidamente representadas, mantendo a integridade da análise em todo o território.

Dentro de cada um desses microestratos, adota-se uma estratégia de amostragem por dias completos. A unidade de seleção não é o registro horário individual, mas sim um dia inteiro de leituras (com até 24 registros horários, dependendo da completude dos dados originais). Essa decisão é justificada pela necessidade de preservar a integridade dos ciclos diurnos. Selecionar registros horários de forma isolada poderia introduzir vieses, fragmentando os padrões diurnos

[16] No contexto da amostragem estratificada, um microestrato é o menor e mais específico subgrupo resultante da combinação de todas as variáveis utilizadas para estratificação (neste caso, Domínio Climático, Ano de Coleta, Código da Estação Meteorológica Automática e Estação do Ano). Cada microestrato representa um "balde" de dados com características muito específicas (Cochran, 1977; Bolfarine; Bussab, 2019).

e comprometendo a precisão de análises que dependem da dinâmica temporal, como foi o caso da variável exploratória Rs.

A aleatoriedade na seleção dos dias é garantida pela utilização da função `NEWID()` [17] do SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), que gera identificadores únicos globalmente para uma ordenação imparcial dos dias dentro de cada microestrato. Em microestratos onde não há dados suficientes para compor um dia completo de 24 horas, todos os registros disponíveis para o dia selecionado são incluídos, mantendo a máxima representatividade sem recorrer à imputação artificial de dados.

O dimensionamento da amostra visa um equilíbrio entre representatividade e eficiência computacional, para que o conjunto de dados seja gerenciável por programas como o *IBM SPSS Statistics* 27 (IBM, 2022). Considerando um alvo de aproximadamente 1.000.000 de leituras horárias, e com M = 36.237 microestratos únicos, o cálculo para o número de dias (Y) a ser selecionado por microestrato é (Equação (1))**:**

$$\mathrm{Y} = \frac{\text{Tamanho Total da Amostra (leituras horárias)}}{\mathrm{M} \cdot 24\ (\text{leituras/dia})} \tag{1}$$

$$\Rightarrow Y = \frac{1.000.000}{36.237 \cdot 24} \approx 1{,}15$$

Baseado nesse cálculo, opta-se por selecionar 1 dia completo (Y = 1) aleatoriamente por microestrato, o que resulta em uma amostra final de 875.753 registros horários, armazenada na tabela `[dbo].[AmostraINMET_DiasCompletos_1X]`. Este tamanho de amostra, que corresponde a cerca de 1,1 % da população total (dados de 625 das 633 estações meteorológicas automáticas são incluídas – 98,7 % do total), é estatisticamente robusto e otimizado para as análises subsequentes, permitindo inferências válidas e aprofundadas sobre a influência climática na durabilidade do CA/CP. A alocação igualitária (um dia por microestrato) reduz a variância intraestrato e equilibra a representação entre DCs, anos e períodos sazonais.

[17] `NEWID()`: uma função do SQL *Server* (Microsoft, 2025c) que gera um valor de identificador único global (*GUID – Globally Unique Identifier*). É utilizada em cláusulas `ORDER BY` para introduzir aleatoriedade na seleção de registros, pois a ordem dos *GUID*s gerados não segue um padrão previsível.

O processo de amostragem é executado no ambiente do Microsoft SQL *Server Management Studio* v21 (Microsoft, 2025d), utilizando consultas *T-SQL* [18]. A amostra resultante é persistida em uma nova tabela permanente no banco de dados SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), denominada `[dbo].[AmostraINMET_DiasCompletos_1X]`. Ressalta-se que nenhuma variável de ponderação (`SampleWeight`) é utilizada neste processo, uma vez que a seleção de registros dentro de cada microestrato é feita de forma aleatória e homogênea, sem atribuir pesos diferenciados. A ausência de ponderação é justificada pela natureza da amostragem, que assegura a representatividade proporcional dos estratos sem a necessidade de ajustes posteriores.

B.3 EXPORTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE

Após a conclusão do processo de amostragem, os dados são exportados da tabela `[dbo].[AmostraINMET_DiasCompletos_1X]` para um arquivo no formato CSV (*Comma-Separated Values*). A exportação é realizada utilizando o utilitário *Bulk Copy Program* (*BCP*) [19], uma ferramenta nativa do SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c). O *BCP* é escolhido por sua eficiência no manuseio de grandes volumes de dados e pela flexibilidade na personalização de delimitadores e codificações. Isso garante a compatibilidade direta do arquivo gerado com o ecossistema analítico da pesquisa: o *IBM SPSS Statistics* (IBM, 2022) para a estatística descritiva, e o QGIS (Sherman *et al.*, 2025) em conjunto com rotinas em linguagem *Python* (biblioteca *GeoPandas*) para a análise geoespacial. O comando *BCP*, detalhado no Código 3, é executado diretamente no *Prompt* de Comando do Windows [20] (Microsoft, 2025e).

---

[18] *T-SQL* (*Transact-SQL*): extensão proprietária da Microsoft para a linguagem *SQL*. Além dos comandos padrão de manipulação de dados, incorpora recursos de programação procedural, como variáveis, controle de fluxo, tratamento de exceções e funções integradas, sendo a linguagem nativa para interação com o Microsoft SQL *Server* (Microsoft, 2025c).

[19] *Bulk Copy Program* (*BCP*): um utilitário de linha de comando fornecido pelo SQL *Server* (Microsoft, 2025c) que permite importar e exportar grandes volumes de dados entre uma instância própria e um arquivo de dados em um formato especificado pelo usuário.

[20] *Prompt* de Comando do Windows (cmd.exe) (Microsoft, 2025e): uma interface de linha de comando no sistema operacional Windows (Microsoft, 2025e) que permite ao usuário interagir com o sistema inserindo comandos de texto. O *BCP* é tipicamente executado por meio dessa interface.

Código 3 – Comando de exportação via *BCP* para arquivo *CSV*

```
bcp "SELECT 'UF:','ESTACAO:','CODIGO (WMO):','LATITUDE:','LONGITUDE:', ^
'ALTITUDE:','DATA DE FUNDACAO:','Domínio Climático de Novais','Data', ^
'Hora UTC','PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)', ^
'PRESSAO ATMOSFERICA AO NIVEL DA ESTACAO, HORARIA (mB)', ^
'PRESSÃO ATMOSFERICA MAX NA HORA ANT (AUT) (mB)', ^
'PRESSÃO ATMOSFERICA MIN NA HORA ANT (AUT) (mB)', ^
'RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)','TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)', ^
'TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (°C)', ^
'TEMPERATURA MÁXIMA NA HORA ANT (AUT) (°C)', ^
'TEMPERATURA MÍNIMA NA HORA ANT (AUT) (°C)', ^
'TEMPERATURA ORVALHO MAX NA HORA ANT (AUT) (°C)', ^
'TEMPERATURA ORVALHO MIN NA HORA ANT (AUT) (°C)', ^
'UMIDADE REL MAX NA HORA ANT (AUT) (%)', ^
'UMIDADE REL MIN NA HORA ANT (AUT) (%)', ^
'UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)', ^
'VENTO, DIREÇÃO HORARIA (gr) (° (gr))','VENTO, RAJADA MAXIMA (m/s)', ^
'VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)','Ano de Coleta','Hora de Coleta', ^
'Data de Coleta','Dia de Coleta','Mês de Coleta','DT_Coleta', ^
'Estação do Ano' ^
UNION ALL ^
SELECT [UF:] COLLATE DATABASE_DEFAULT, ^
[ESTACAO:] COLLATE DATABASE_DEFAULT, ^
[CODIGO (WMO):] COLLATE DATABASE_DEFAULT, ^
CONVERT(VARCHAR(50), [LATITUDE:]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [LONGITUDE:]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [ALTITUDE:]), ^
CONVERT(VARCHAR(20), [DATA DE FUNDACAO:], 120), ^
[Domínio Climático de Novais] COLLATE DATABASE_DEFAULT, ^
CONVERT(VARCHAR(20), [Data], 120), ^
CONVERT(VARCHAR(8), [Hora UTC], 108), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [PRESSAO ATMOSFERICA AO NIVEL DA ESTACAO, HORARIA (mB)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [PRESSÃO ATMOSFERICA MAX NA HORA ANT (AUT) (mB)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [PRESSÃO ATMOSFERICA MIN NA HORA ANT (AUT) (mB)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA MÁXIMA NA HORA ANT (AUT) (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA MÍNIMA NA HORA ANT (AUT) (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA ORVALHO MAX NA HORA ANT (AUT) (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [TEMPERATURA ORVALHO MIN NA HORA ANT (AUT) (°C)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [UMIDADE REL MAX NA HORA ANT (AUT) (%)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [UMIDADE REL MIN NA HORA ANT (AUT) (%)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [VENTO, DIREÇÃO HORARIA (gr) (° (gr))]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [VENTO, RAJADA MAXIMA (m/s)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [Ano de Coleta]), ^
CONVERT(VARCHAR(8), [Hora de Coleta], 108), ^
CONVERT(VARCHAR(20), [Data de Coleta], 120), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [Dia de Coleta]), ^
CONVERT(VARCHAR(50), [Mês de Coleta]), ^
CONVERT(VARCHAR(20), [DT_Coleta], 120), ^
[Estação do Ano] COLLATE DATABASE_DEFAULT ^
FROM [DadosINMET].[dbo].[AmostraINMET_DiasCompletos_1X]" ^
queryout "C:\Users\thale\OneDrive\Documentos\DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PROAC\0. ANÁLISES
ESTATÍSTICAS\AmostraINMET_DiasCompletos_1X\AmostraINMET_DiasCompletos_1X.csv" ^
-c -t; -T -S PEREIRA-TSS -d DadosINMET -C 65001
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o processo de exportação, são implementadas configurações específicas para garantir a integridade e a usabilidade dos dados:

i) Inclusão de cabeçalhos: o arquivo *CSV* é gerado com uma linha de cabeçalhos contendo os nomes de todas as 34 colunas relevantes da tabela de amostra, facilitando a identificação das variáveis.

ii) Delimitador de campo: o ponto e vírgula (;) é especificado como delimitador de colunas. Essa escolha deve-se a prevenção de conflitos com a vírgula, que é utilizada como separador decimal em valores numéricos em padrões regionais brasileiros.

iii) Codificação de caracteres: a codificação UTF-8 (`-C 65001`) é empregada para assegurar a correta preservação de caracteres acentuados e especiais presentes nos nomes das colunas e nos dados, como "Domínio Climático de Novais", "Árido", "°C", entre outros.

iv) Conversão de tipos de dados: todos os campos são explicitamente convertidos para o tipo de dado `VARCHAR` [21] (texto) durante a exportação, utilizando funções `CONVERT` [22] com formatos específicos para colunas de data/hora, o que resolve incompatibilidades e erros de conversão implícita. Cláusulas `COLLATE DATABASE_DEFAULT` [23] são aplicadas para uniformizar as regras de ordenação e evitar conflitos entre as colunas.

v) Exclusão de colunas irrelevantes: uma coluna binária de sistema, `[SSMA_TimeStamp]`, que se mostra irrelevante para os objetivos da pesquisa e gera erros de conversão, é excluída do processo de exportação, simplificando o fluxo de trabalho e otimizando a integridade dos dados exportados.

O arquivo *CSV* resultante é salvo, contendo todas as 34 colunas relevantes da tabela de amostra. Essa abordagem assegura a integridade e a usabilidade dos dados para as análises qualiquantitativas subsequentes, incluindo a avaliação exploratória da radiação solar (Rs) e a elaboração dos perfis das variáveis mantidas no escopo final da pesquisa, bem como a análise da agressividade ambiental nos DCs.

B.3.1 **Preparação das variáveis para importação**

[21] `VARCHAR`: um tipo de dado em sistemas de gerenciamento de banco de dados usado para armazenar *strings* de caracteres de comprimento variável. É comumente utilizado para converter dados de outros tipos (numéricos, datas) para texto, facilitando a exportação e importação entre diferentes sistemas (Ray; Microsoft, 2024).

[22] `CONVERT`: uma função do SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c) que converte uma expressão de um tipo de dado para outro tipo de dado. É necessária para assegurar a compatibilidade de dados durante operações como exportação, especialmente para formatar datas e números de maneira consistente (Microsoft, 2024).

[23] `COLLATE DATABASE_DEFAULT`: uma cláusula no SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c) que especifica as regras de ordenação (*collation*) a serem aplicadas a uma coluna ou expressão de caracteres. `DATABASE_DEFAULT` indica que a *collation* padrão definida para o banco de dados atual deve ser utilizada. *Collation* define como as *strings* são comparadas e classificadas (sensibilidade a maiúsculas/minúsculas, acentos, etc.) (Dalley, 2022; Microsoft, 2025a).

O arquivo *CSV* resultante é preparado para importação no ambiente de análise estatística. O processo envolve a configuração de delimitadores, codificação de caracteres e verificação de integridade dos dados.

As etapas de organização, exportação e preparação dos dados do INMET foram conduzidas no Microsoft SQL *Server* 2022 (Microsoft, 2025c), com uso de rotinas auxiliares para padronização e consolidação da base. Após a exportação, os dados foram compatibilizados para análise estatística descritiva no *IBM SPSS Statistics* 27 (IBM, 2022) e para eventual integração espacial QGIS (Sherman *et al.*, 2025).

A escala temporal da análise é definida como 2000-2024 para as variáveis diretas (T, UR, i_{prec}) e para a variável exploratória (Rs). A cobertura geográfica segue a delimitação dos DCs de Novais (Novais, 2019, 2023b).

A elaboração cartográfica final e as análises espaciais avançadas são executadas via rotinas em linguagem *Python* (bibliotecas *GeoPandas* e *Matplotlib*). Os arquivos vetoriais (*shapefiles* – `.shp`) necessários para o processamento são obtidos de fontes oficiais como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, [*s. d.*]), Ministério do Meio Ambiente – MMA (MMA, [*s. d.*]), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, [*s. d.*]) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (INPE, 2019). Adicionalmente, utiliza-se a base cartográfica digital dos Domínios Climáticos Brasileiros, gentilmente cedida por Novais (comunicação pessoal, 2025), que constitui a referência espacial primária para a delimitação das regiões climáticas analisadas nesta pesquisa.

APÊNDICE C – Obtenção e processamento de variáveis de satélite ([CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}], [Cl^-])

A obtenção e o processamento das variáveis de satélite empregam fontes de dados e procedimentos distintos, adaptados à natureza física de cada variável analisada. Para operacionalizar essas etapas, utilizaram-se rotinas computacionais em *Python 3.13.5* (Python Software Foundation, 2025), gerenciado pelo Miniconda 3 (Anaconda, Inc., 2024), com emprego das bibliotecas `h5py`, `numpy`, `pandas`, *GeoPandas*, `rasterio`, `shapely`, `requests` e `tqdm`. Essas rotinas foram utilizadas para leitura de arquivos *HDF-EOS5* (*Hierarchical Data Format – Earth Observing System 5*) e *netCDF*, manipulação tabular, operações espaciais, processamento *raster*, automação de *downloads* e controle de execução.

A seguir, descrevem-se os métodos adotados para [CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}] e [Cl^-].

C.1 CONCENTRAÇÃO DE CO_2 ATMOSFÉRICO ([CO_2])

Os dados de concentração de CO_2 atmosférico são obtidos do produto de satélite *AIRS/Aqua L3 CLIMCAPS* (*Atmospheric Infrared Sounder/Aqua Level 3 Community Long-term Infrared Microwave Combined Atmospheric Product System*) versão 2, disponibilizado pela *NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (*GES DISC*) (Barnet, 2021; *NASA*, 2025). Utiliza-se a variável `co2_vmr_uppertrop` (CO_2 volume *mixing ratio* na troposfera superior), com resolução espacial de 1° × 1° (aproximadamente 111 km × 111 km no equador) e cobertura temporal de setembro de 2002 a dezembro de 2024, totalizando 268 meses de dados.

A escolha deste período (2002-2024) é determinada pela disponibilidade dos dados do satélite *AIRS*, que iniciou suas operações em setembro de 2002 (Barnet, 2021). Embora represente uma lacuna de dois anos em relação ao período padrão das demais variáveis (2000-2024), esta diferença é justificável pelo comportamento monotonicamente crescente da concentração de CO_2 atmosférico ao longo dos anos (média de 2,4 ppm/ano na década 2011-2020) (Trudinger; Borley; Langenfelds, 2025; *WMO*, 2025), o que implica que os valores de 2000-2001 seriam ligeiramente

inferiores (~3,1 ppm acumulados) aos de 2002, sem alteração qualitativa no perfil geográfico (Lan *et al.*, 2023).

Os dados, originalmente expressos em unidades de m^3/m^3 (fração volumétrica), são convertidos para ppm (partes por milhão) mediante multiplicação por 1.000.000, unidade padrão para concentrações de gases-traço na atmosfera. Para cada arquivo mensal, calcula-se a média aritmética dos dois passes orbitais (ascendente e descendente) do satélite, procedimento que reduz ruídos e melhora a representatividade espacial das medições. A média temporal do período completo (2002-2024) é então calculada *pixel* a *pixel*, gerando um campo contínuo de concentrações médias de CO_2.

Esta abordagem de média de longo prazo, em detrimento de análises de flutuação diária ou sazonal, justifica-se pela natureza do mecanismo de carbonatação do concreto, que é um processo difusivo lento e cumulativo, governado pela concentração média de exposição ao longo de décadas, e não por picos instantâneos (Papadakis; Vayenas; Fardis, 1991; Qiu, 2020; Yoon; Chang, 2020b).

Ressalta-se que, diferentemente das variáveis de poluentes locais ([NOx], [SOx] e $[SO_4^{2-}]$), para o $[CO_2]$ não é aplicada a conversão baseada na Camada Limite Planetária (*PBL*, do inglês *Planetary Boundary Layer*) (Meier *et al.*, 2024; Roostaei *et al.*, 2024). Isso se deve à natureza do dióxido de carbono como um gás de mistura global (*well-mixed gas*) (Enting, 2002; Diallo *et al.*, 2017), cuja concentração na troposfera livre é representativa da concentração em superfície em escalas regionais, excetuando-se microclimas urbanos muito específicos que fogem à resolução do satélite (Crevoisier *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2014, 2024).

Este campo é recortado para o território brasileiro (limites: 35°S a 5°N, 75°W a 30°W), e, para a extração dos valores de CO_2 por domínio climático, os 119 polígonos individuais do *vetor (SHP)* de classificação climática de Novais (Novais, 2019, 2023b; Novais; Machado, 2023a) são previamente agregados (dissolução geométrica) com base na coluna identificadora do domínio climático, resultando em 8 geometrias únicas (`MultiPolygon`) correspondentes aos domínios: Árido, Equatorial, Equatorial Ameno, Semiárido, Subtropical, Subtropical Frio (Temperado), Tropical e Tropical Ameno. Essa agregação é necessária porque o *SHP* original contém polígonos correspondentes a subdivisões hierárquicas mais detalhadas da classificação climática, e a análise da dissertação opera no nível dos domínios climáticos principais.

Após a agregação, os valores de CO_2 são extraídos para cada domínio climático mediante análise de estatística zonal [24], utilizando o Método do Centroide (Yenats; Dbaston; Xunilk, 2017; Esri, 2025b). Nesta técnica, um *pixel* da grade *raster* (1° × 1°) é atribuído a um domínio climático específico se, e somente se, o ponto central geométrico desse *pixel* estiver contido dentro dos limites do polígono do domínio. Essa abordagem, embora apresente limitações em áreas de borda entre domínios, é compatível com a resolução espacial do sensor *AIRS* e adequada para análises em escala continental (Yenats; Dbaston; Xunilk, 2017; NASA Jet Propulsion Laboratory, 2020; Esri, 2025b).

C.2 CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO ([NOx])

Os dados de concentração de óxidos de nitrogênio são obtidos do sensor *OMI* (*Ozone Monitoring Instrument*) a bordo do satélite Aura da *NASA*. Utiliza-se o produto OMNO2d versão 003 (*OMI/Aura Nitrogen Dioxide (NO_2) Total and Tropospheric Column Daily L3 Global Gridded 0.25 degree x 0.25 degree V3*), disponibilizado pelo *NASA GES DISC* (Krotkov *et al.*, 2013; *NASA*, 2025).

A concentração de óxidos de nitrogênio (NOx) é representada pelo NO_2 por ser o óxido de nitrogênio detectável por sensoriamento remoto (Mei; Guan; Kong, 2017; Shah *et al.*, 2023; Gu *et al.*, 2025) e porque o NO (monóxido de nitrogênio) é rapidamente oxidado a NO_2 na presença de ozônio, estabelecendo um equilíbrio fotoquímico entre as espécies (Calvert; Stockwell, 1983; Richter, 2009; Silvern *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2023). A variável utilizada é `ColumnAmountNO2Trop` (coluna troposférica de NO_2), expressa em moléculas/cm², posteriormente convertida para µg/m³.

A resolução espacial do produto é de 0,25° × 0,25° (aproximadamente 28 km × 28 km no equador), com cobertura temporal de 1º de outubro de 2004 a 31 de dezembro de 2025 (Krotkov *et al.*, 2013). O período de análise é definido como outubro de 2004 a outubro de 2025, totalizando 21 anos de dados diários.

---

[24] Estatística zonal: técnica de geoprocessamento que calcula estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão etc.) de valores de *pixels* de uma camada *raster* (grade espacial) que estão contidos dentro de polígonos de uma camada vetorial (domínios climáticos). No contexto desta pesquisa, para cada domínio climático, identificam-se todos os *pixels* de CO_2 cujos centroides geográficos (coordenadas lat/lon) estavam dentro do polígono do domínio, e calcula-se a média aritmética desses valores.

O processo de obtenção dos dados segue as seguintes etapas:

i) Acesso ao portal *NASA GES DISC* (Krotkov *et al.*, 2013; *NASA*, 2025): seleção do produto OMNO2d v003 e definição da região de interesse (território brasileiro: 35°S a 5°N, 75°W a 30°W) e do período temporal (2004-2025).

ii) *Download* dos arquivos: os arquivos diários em formato *HDF-EOS5* são baixados utilizando credenciais de autenticação *NASA Earthdata*. O *download* é automatizado mediante script *Python* (Python Software Foundation, 2025) utilizando a biblioteca requests com autenticação `HTTPBasicAuth`, garantindo renovação automática de sessão a cada 100 arquivos para evitar expiração de credenciais. O *script* implementa 5 tentativas por arquivo com *backoff* progressivo [25] e tratamento específico para erros 401 (autenticação), 503 (servidor sobrecarregado) e erros de rede, totalizando 7.303 arquivos baixados.

iii) Extração e processamento dos dados: os arquivos *HDF-EOS5* são processados utilizando a biblioteca `h5py` do *Python* (Python Software Foundation, 2025). Para cada arquivo diário, extrai-se a variável `ColumnAmountNO2Trop`, aplicando-se critérios de qualidade para remoção de valores negativos (indicativos de ruído instrumental ou erros de recuperação) e filtragem de *pixels* com cobertura de nuvens superior a 30 %.

Para a conversão da densidade de coluna (moléculas/cm²) em concentração de superfície (µg/m³), adota-se uma metodologia física baseada na altura da Camada Limite Planetária (*PBL – Planetary Boundary Layer*) (Lamsal *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2019). Assume-se que a massa total de poluentes da coluna troposférica está uniformemente distribuída dentro da *PBL* (Knepp *et al.*, 2015; Chang *et al.*, 2022), com uma altura de mistura de referência fixada em 2.000 m (2 km) (Garratt; Hess, 2003; Nzabarinda, 2021). Esta abordagem substitui o uso da altura total da troposfera, proporcionando uma estimativa mais realista da concentração ao nível do solo, onde as estruturas de concreto estão efetivamente expostas (Lamsal *et al.*, 2008; Knepp *et al.*, 2015).

[25] *Backoff* progressivo (*exponential backoff*): estratégia automática de reenvio de requisições na qual, após uma falha (por exemplo, servidor sobrecarregado), o sistema aguarda um tempo antes de tentar novamente, e esse tempo de espera aumenta progressivamente a cada nova tentativa (1 segundo, depois 2 segundos, depois 4 segundos, e assim por diante). Essa técnica evita sobrecarregar ainda mais o servidor e aumenta a chance de sucesso nas tentativas seguintes (Brooker, 2015; Google Cloud, 2026).

iv) Recorte espacial por DC: os dados são recortados espacialmente utilizando as geometrias agregadas dos domínios climáticos de Novais (Novais, 2019, 2023b; Novais; Machado, 2023a). Para cada domínio, identificam-se os pixels da grade 0,25° × 0,25° cujos centroides estavam contidos na geometria do domínio.

v) Agregação temporal: os dados diários são agregados temporalmente calculando-se a média aritmética de longo prazo (2004-2025) para cada pixel. Essa agregação representa a condição típica de exposição ao NO_2 no período analisado, reduzindo a influência de eventos episódicos e capturando o padrão de fundo da poluição atmosférica.

vi) Cálculo de estatísticas descritivas: para cada domínio climático, calculam-se as seguintes estatísticas descritivas sobre os valores médios de NO_2: número de *pixels* válidos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), valor mínimo, valor máximo, amplitude, 25º percentil, 75º percentil e amplitude interquartil (AIQ). O número de *pixels* válidos refere-se às células da grade espacial com dados disponíveis em cada DC após aplicação dos critérios de qualidade. A mediana e o AIQ são priorizados na análise devido à sua robustez contra *outliers*. Ressalta-se que a literatura específica correlacionando concentrações ambientais de NOx com efeitos diretos sobre a durabilidade do concreto é mais limitada do que aquela disponível para outros poluentes atmosféricos ou para materiais metálicos. Por essa razão, a interpretação desta variável exigiu apoio complementar da distribuição estatística dos dados brasileiros. Nesse contexto, os percentis P90, P95 e P99 foram utilizados como balizadores auxiliares de severidade relativa, sem constituírem, isoladamente, critério autônomo de classificação.

C.3 CONCENTRAÇÃO DE ÓXIDOS DE ENXOFRE ([SOx])

Os dados de concentração de óxidos de enxofre ([SOx]) são obtidos do mesmo sensor *OMI* a bordo do satélite Aura da *NASA*. Utiliza-se o produto OMSO2e versão 003 (*OMI/Aura Sulphur Dioxide (SO_2) Total Column L3 1 day Best Pixel in 0.25 degree x 0.25 degree V3*), disponibilizado pelo *NASA GES DISC* (Li; Krotkov; Leonard, 2012; *NASA*, 2025).

A concentração de óxidos de enxofre é representada pela concentração do SO_2 porque este é o óxido predominante emitido por fontes antrópicas (combustão de combustíveis fósseis, processos industriais) e naturais (vulcões, oxidação de compostos sulfurados biogênicos) (Loerting; Liedl, 2000; Cleveland, 2025). O SO_3 (trióxido de enxofre) é rapidamente convertido em H_2SO_4 (ácido sulfúrico) na presença de umidade atmosférica, não permanecendo em concentrações significativas na troposfera (Loerting; Liedl, 2000; Toohey *et al.*, 2025). A variável utilizada é `ColumnAmountSO2_PBL` (coluna de SO_2 na camada limite planetária, 0-2 km de altitude), expressa em *Unidades Dobson* (*DU*, do inglês *Dobson Units*), posteriormente convertida para µg/m³.

A resolução espacial do produto é de 0,25° × 0,25° (aproximadamente 28 km × 28 km no equador), com cobertura temporal de 1º de outubro de 2004 a 31 de outubro de 2025 (Li; Krotkov; Leonard, 2012). O período de análise é definido como 2004-2025, totalizando 21 anos de dados diários.

O processo de obtenção dos dados segue metodologia idêntica à descrita para [NOx], com as seguintes especificidades:

i) Produto utilizado: OMSO2e v003 (Li; Krotkov; Leonard, 2012), com a variável `ColumnAmountSO2_PBL` representando a concentração de SO_2.
ii) Critérios de qualidade: aplicam-se os mesmos critérios de remoção de valores negativos e filtragem de cobertura de nuvens descritos para [NOx].
iii) Conversão de Unidades: a conversão de *DU* para concentração de massa (µg/m³) segue a mesma premissa física adotada para o [NOx], utilizando a *PBL* de 2.000 m como volume de diluição de referência.
iv) Agregação temporal e espacial: Idêntica à metodologia de [NOx], calculando-se a média climatológica de longo prazo (2004-2025) para cada *pixel* e, posteriormente, as estatísticas descritivas por DC. A média aritmética é adotada como medida de tendência central principal, em substituição à mediana. Esta escolha justifica-se pela norma de referência adotada para a construção do perfil geográfico (*ISO* 9223 (*ISO*, 2012)) utilizar a média anual de concentração como parâmetro classificatório.
v) Embasamento: a construção do perfil geográfico para concentração de óxidos de enxofre fundamenta-se nos limites de concentração estabelecidos pela norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012) (Tabela B.3 — *Grouping of pollution by sulfur-containing substances represented by* SO_2). Embora voltada para a

corrosividade atmosférica em metais, esta norma fornece faixas de concentração de SO_2 correlacionadas à agressividade química do ambiente, servindo como *proxy* para a durabilidade do CA/CP, dada a ausência de normatização específica para este material.

C.4 DEPOSIÇÃO TOTAL DE SULFATO PARTICULADO ATMOSFÉRICO ($[SO_4^{2-}]$)

Os dados de taxa de deposição total de sulfato particulado atmosférico ($[SO_4^{2-}]$) são obtidos do produto *MERRA-2 M2TMNXADG* (*MERRA-2 tavgM_2d_adg_Nx: 2d, Monthly mean, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics (extended) V5.12.4*), versão 5.12.4, disponibilizado pelo *NASA GES DISC* (*GMAO*, 2015; *NASA*, 2025). Este produto fornece dados mensais agregados de SO_4^{2-} particulado na atmosfera com resolução espacial de 0,5° × 0,625° (aproximadamente 55 km × 69 km no equador) e cobertura temporal de janeiro de 1980 a setembro de 2025. O período de análise é definido como janeiro de 2000 a dezembro de 2024 (25 anos), totalizando 300 arquivos mensais em formato *netCDF*.

O acesso aos dados é realizado através do portal *NASA GES DISC* (*NASA*, 2025), seleciona-se a região de interesse (território brasileiro: 35°S a 5°N, 75°W a 30°W). O *download* dos 300 arquivos é automatizado mediante *script Python* (Python Software Foundation, 2025) utilizando a biblioteca `requests` com autenticação *NASA Earthdata*, implementa-se 5 tentativas por arquivo com *backoff* progressivo. Para cada arquivo mensal, extraem-se as variáveis de deposição seca [26] (`SUDP001`, `SUDP002`, `SUDP003`, `SUDP004`) e deposição úmida [27] (`SUWT001`, `SUWT002`, `SUWT003`, `SUWT004`) de sulfato, expressas em kg/m²/s. A escolha pela análise de deposição, em detrimento da concentração atmosférica, fundamenta-se na premissa de que a agressividade

[26] Deposição seca: transferência de poluentes presentes no ar (gases e partículas sólidas, como poeira, fumaça e sais secos) para uma superfície sem participação direta da chuva/neblina, ocorrendo principalmente pelo transporte do ar (vento), por correntes térmicas e pela difusão associada a diferenças de concentração entre a atmosfera e a superfície (Lyon, 2020).

[27] Deposição úmida: transferência de poluentes para uma superfície via água atmosférica, quando esses poluentes se dissolvem em gotículas (em nuvens) e chegam ao material por precipitação, como chuva, neve ou neblina; além disso, esse tipo de deposição também contribui para lavar/remover poluentes previamente acumulados por deposição seca em superfícies expostas (Lyon, 2020).

química ao concreto é governada pela quantidade efetiva de íons sulfato que se acumulam na superfície da estrutura e interagem com a matriz cimentícia, e não apenas pela sua presença no ar (Demirbaş; Öztürk; Karataş, 2001; *ISO*, 2012; Niu *et al.*, 2015; Lyon, 2020).

Os dados são agregados somando-se as oito componentes de deposição (quatro faixas de tamanho para deposição seca e quatro para deposição úmida) para obter a deposição total de sulfato por *pixel*. Em seguida, realiza-se a conversão de unidades de fluxo de massa (kg/m²/s) para taxa de deposição diária (mg/m²/dia) através da multiplicação pelo fator $8{,}64 \cdot 10^{10}$ (conversão de kg para mg e de segundos para dia). Esta unidade é compatível com os critérios de classificação de corrosividade atmosférica estabelecidos pela norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012), que utiliza a taxa de deposição de dióxido de enxofre (P_d) como parâmetro para estimar a agressividade do ambiente.

Dada a ausência de normatização específica para a deposição de sulfato particulado em concreto, adota-se a classificação da *ISO* 9223 (*ISO*, 2012) para substâncias contendo enxofre (representadas pelo SO_2) como *proxy* para a avaliação do perfil de ataque por sulfatos, assumindo uma correlação direta entre a carga de enxofre depositada e o potencial de degradação (*ISO*, 2012; Lemon, 2012; Randles *et al.*, 2017; Wang, Junfeng *et al.*, 2020; Hardacre *et al.*, 2021; Liu; Chan; Abbatt, 2021).

Ressalta-se que para a deposição de sulfato não se aplica correção baseada na altura da *PBL* ou altitude topográfica. O modelo *MERRA-2* (*GMAO*, 2015) já fornece o fluxo de massa diretamente à superfície, integrando os processos físicos de sedimentação e lavagem atmosférica, o que torna desnecessária e incorreta qualquer tentativa de ajuste volumétrico vertical (Lyon, 2020). Uma limitação assumida é que o modelo, devido à sua resolução espacial (0,5° × 0,625°), não captura microclimas de deposição influenciados pela topografia local complexa ou barreiras físicas em escala urbana (Buchard *et al.*, 2017; Randles *et al.*, 2017).

O campo contínuo é recortado para o território brasileiro, resultando em 2.268 *pixels*. Os 119 polígonos individuais do arquivo vetorial de classificação climática de Novais (Novais, 2019, 2023b; Novais; Machado, 2023a) são agregados por dissolução geométrica, resultando em 8 geometrias únicas correspondentes aos domínios climáticos: Árido, Equatorial, Equatorial Ameno, Semiárido, Subtropical, Subtropical Frio (Temperado), Tropical e Tropical Ameno.

Para cada domínio, identificam-se todos os *pixels* cujos centroides estavam contidos na geometria e calcula-se a média aritmética das taxas de deposição de SO_4^{2-}. Finalmente, para cada DC, calculam-se as estatísticas descritivas: número de *pixels* válidos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo, amplitude, percentis (P25, P75, P90, P95, P99) e amplitude interquartil.

Para a caracterização do perfil de manifestação do sulfato, adota-se a média aritmética como medida de tendência central principal, em vez da mediana utilizada para outras variáveis. Esta decisão metodológica visa o alinhamento estrito com a norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012), que estabelece suas classes de corrosividade (P_0 a P_3) com base na média anual de deposição. O uso da mediana, neste caso, desviaria do parâmetro normativo de referência, dificultando a comparação direta com os limites de agressividade estabelecidos.

Os percentis P90, P95 e P99 são utilizados internamente para calibração dos perfis geográficos, enquanto P25 e P75 são incluídos nos resultados apresentados ao leitor para caracterização da distribuição de dados por DC.

C.5 DEPOSIÇÃO DE ÍONS CLORETO ($[Cl^-]$)

Os dados de deposição de íons cloreto são obtidos do produto *MERRA-2 M2TMNXADG* (*MERRA-2 tavgM_2d_adg_Nx: 2d, Monthly mean, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics (extended) V5.12.4*) (*GMAO*, 2015), utilizando especificamente as variáveis de deposição de sal marinho (`SSSD001`, `SSSD002`, `SSSD003`, `SSSD004`, `SSSD005`), que representam a taxa de deposição de partículas de sal marinho em diferentes faixas de tamanho (*bins*): `SSSD001` (0,03 - 0,1 µm), `SSSD002` (0,1 - 0,5 µm), `SSSD003` (0,5 - 1,5 µm), `SSSD004` (1,5 - 5,0 µm) e `SSSD005` (5,0 - 10,0 µm) (*GMAO*, 2015).

A escolha de utilizar a deposição de sal marinho como *proxy* para cloretos atmosféricos baseia-se no fato de o sal marinho ser a principal fonte de cloretos na atmosfera em regiões costeiras e continentais próximas ao litoral (Graedel; Keene, 1995; Meira *et al.*, 2006), e sua deposição representa o fluxo de cloretos que efetivamente atinge a superfície de estruturas expostas (Meira *et al.*, 2010; Lyon, 2020), sendo mais diretamente relevante para a durabilidade do CA/CP do que a concentração atmosférica isolada (Morcillo, 1995; Meira *et al.*, 2010), conforme

estabelecido pela *ISO* 9223 (*ISO*, 2012), que utiliza taxa de deposição de cloretos como parâmetro classificatório de corrosividade atmosférica.

Para estruturas em imersão ou na zona de respingos, onde o contato com a água do mar é contínuo, a deposição atmosférica perde seu sentido físico (Meira *et al.*, 2008; *ISO*, 2012; *ACI*, 2019). Nesses casos, para fins de classificação do perfil, assume-se que a taxa de deposição equivale a uma disponibilidade superficial máxima e contínua de cloretos (Meira *et al.*, 2007b; Angst *et al.*, 2009), representando o teto físico de qualquer taxa de deposição e o cenário mais agressivo de exposição (Ann; Song, 2007; *ISO*, 2012; Bertolini, 2013).

O período de análise é definido como janeiro de 2000 a dezembro de 2024 (25 anos), totalizando 300 arquivos mensais em formato *netCDF*. A resolução espacial é de 0,5° × 0,625° (aproximadamente 55 km × 69 km no equador) e a resolução temporal é de 1 mês.

O processo de obtenção dos dados segue as seguintes etapas:

i) Acesso ao portal *NASA GES DISC* (*NASA*, 2025): seleção do produto *MERRA-2 M2TMNXADG* (*GMAO*, 2015) e definição da região de interesse (território brasileiro: 35°S a 5°N, 75°W a 30°W) e do período temporal (2000-2024).

ii) *Download* dos arquivos: os 300 arquivos mensais em formato *netCDF* são baixados utilizando credenciais de autenticação *NASA Earthdata*. O *download* é automatizado mediante script *Python* (Python Software Foundation, 2025) utilizando a biblioteca `requests` com autenticação `HTTPBasicAuth`, implementando 5 tentativas por arquivo com *backoff* progressivo.

iii) Extração e processamento dos dados: para cada arquivo mensal, extraem-se as cinco variáveis de deposição de sal marinho (`SSSD001` a `SSSD005`), expressas em kg/m²/s. Os valores são somados *pixel* a *pixel* para obter a deposição total de sal marinho (Randles *et al.*, 2017), e posteriormente convertidos para mg/m²/dia mediante multiplicação pelo fator $8{,}64 \cdot 10^{10}$. Esta unidade (mg/m²/dia) é mais intuitiva para análises de durabilidade do concreto, representando a taxa diária de acúmulo de cloretos na superfície (Meira *et al.*, 2006, 2010; *ISO*, 2012).

Para a deposição de cloretos não se aplica correção baseada na altura da *PBL*, pois o produto *MERRA-2* (*GMAO*, 2015) fornece diretamente o fluxo de massa depositado na superfície, integrando os processos físicos de sedimentação seca e úmida.

iv) Recorte espacial por domínio climático: os dados são recortados espacialmente utilizando as geometrias agregadas dos domínios climáticos de Novais (Novais, 2019, 2023b; Novais; Machado, 2023a). Para cada DC, identificam-se os *pixels* da grade 0,5° × 0,625° cujos centroides estavam contidos na geometria do domínio.

v) Agregação temporal: os dados mensais são agregados temporalmente calculando-se a média aritmética de longo prazo (2000-2024) para cada *pixel*. Essa agregação representa a condição típica de exposição a cloretos no período analisado, reduzindo a influência de eventos episódicos e capturando o padrão de fundo da deposição de sal marinho no Brasil.

vi) Cálculo de estatísticas descritivas: para cada DC, calculam-se as seguintes estatísticas descritivas sobre os valores médios de deposição de cloretos: número de *pixels* válidos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), valor mínimo, valor máximo, amplitude, percentis (P25, P75, P90, P95, P99) e amplitude interquartil (AIQ). Para a caracterização do perfil de manifestação de cloretos, adota-se a média aritmética como medida de tendência central principal. Esta decisão metodológica visa o alinhamento com a norma *ISO* 9223 (*ISO*, 2012), que estabelece suas categorias de corrosividade (S_0 a S_3) com base na média anual de deposição de cloretos. Os percentis P90, P95 e P99 são utilizados internamente para calibração dos perfis geográficos, enquanto P25 e P75 são incluídos nos resultados apresentados ao leitor para caracterização da distribuição de dados por domínio.

APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil)

- NOTA DE ESCLARECIMENTO METODOLÓGICO: os dados referentes à radiação solar (Rs) apresentados neste Apêndice correspondem à etapa exploratória de tratamento estatístico da pesquisa. Contudo, em alinhamento com o refinamento metodológico e para evitar o mascaramento de escala na avaliação macroclimática, essa variável foi suprimida da composição final dos perfis geográficos. O registro de seu processamento é mantido neste documento exclusivamente por rigor científico, reprodutibilidade e transparência quanto ao volume de dados inicialmente investigado.

A análise estatística descritiva global constitui a etapa de tratamento e caracterização do conjunto populacional total, desconsiderando as divisões regionais. O objetivo desta etapa é fornecer as métricas de referência (*benchmarks* nacionais) necessárias para a construção e calibração dos perfis geográficos, bem como validar a qualidade dos dados coletados. Esta seção detalha os procedimentos analíticos aplicados aos dados do INMET (2025) (variáveis diretas) e de satélites (Li; Krotkov; Leonard, 2012; Krotkov *et al.*, 2013; *GMAO*, 2015; Barnet, 2021) (variáveis antrópicas e químicas obtidas por sensoriamento remoto) para todo o território nacional.

D.1 IMPORTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE QUALIDADE DOS DADOS DO INMET (2025)

Para a fase de análise estatística, o arquivo *CSV*, exportado nos procedimentos apresentados no “APÊNDICE B – Processamento de variáveis do INMET (T, UR, i_{prec})” (mais especificamente, em “B.3 EXPORTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE”) é importado para o *IBM SPSS Statistics* (IBM, 2022). O processo de importação envolve a configuração do assistente para reconhecer o ponto e vírgula (;) como delimitador de campo, as aspas duplas (") como qualificador de texto, e a primeira linha como contendo os nomes das variáveis.

Após a importação, procede-se à seleção das variáveis do conjunto de dados que representam os fenômenos investigados na dissertação, estabelecendo a correspondência entre os dados brutos do SQL (Microsoft, 2025c) e os rótulos utilizados no *SPSS* (IBM, 2022).

Para a intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}), a variável `[PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)]` da amostra *SQL* é rotulada no *SPSS* (IBM, 2022) como `i_prec - Precipitação total horária (mm/h)`. Esta variável quantifica o volume de precipitação acumulado em uma hora. Na engenharia civil, a intensidade da precipitação está associada à saturação do concreto, à lixiviação de componentes da pasta de cimento — principalmente íons de cálcio (Ca^{2+}) — e ao transporte de agentes agressivos (como íons cloreto) para o interior da estrutura (Favretto *et al.*, 2021; Jin *et al.*, 2021; Overmann; Lin; Vollpracht, 2021).

A radiação solar (Rs), tratada nesta pesquisa em caráter exploratório, é representada pela variável `[RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)]` da amostra *SQL*, rotulada no *SPSS* (IBM, 2022) como `Rs - Radiação global (kJ/m²/h)`. Esta variável quantifica a energia solar total (direta e difusa) que incide sobre uma superfície, expressa em quilojoules por metro quadrado. Para a durabilidade do concreto, a Rs relaciona-se ao aquecimento superficial do material, que pode induzir gradientes térmicos associados à fissuração, à aceleração de evaporação da água — contribuindo para retração plástica em concreto fresco e retração por secagem em concreto endurecido (Semenenok, 1969; Moelich *et al.*, 2021; Zyl *et al.*, 2021; Do Nascimento; Sanches; Pinheiro, 2022; Liang *et al.*, 2023).

A temperatura (T) é extraída da variável `[TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)]` da amostra *SQL*, recebendo o rótulo interno `T - Temperatura do ar - bulbo seco, horária (°C/h)` no *SPSS* (IBM, 2022). Ressalta-se que a unidade física da variável é °C, sendo a notação adotada no rótulo utilizada apenas para identificação operacional da série horária no banco de dados. Esta variável quantifica a temperatura ambiente, que é o indicador primário do estado térmico da atmosfera. Na engenharia, a T influencia a cinética das reações químicas no concreto —especialmente a hidratação do cimento —, induz a expansão e contração térmica do material (associadas à fissuração) e afeta a taxa de evaporação da água (Hasanain; Khallaf; Mahmood, 1989; Mehta; Monteiro, 1994; Do Nascimento; Sanches; Pinheiro, 2022; Zhang *et al.*, 2025).

A umidade relativa do ar (UR) é representada pela variável `[UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)]` da amostra *SQL*, recebendo, no *SPSS* (IBM, 2022), o rótulo interno `UR - Umidade relativa do ar horária (%/h)`. Ressalta-se que a unidade física da variável é %, sendo a notação adotada no rótulo utilizada apenas para identificação operacional da série horária no banco de dados. Diferentemente das demais variáveis,

para a UR não se procede à agregação diária dos dados. Opta-se pela manutenção da resolução horária original para preservar a identificação dos ciclos de umedecimento e secagem ao longo das 24 horas. Para a caracterização estatística da UR, adota-se a mediana como medida de tendência central preferencial, em detrimento da média aritmética, devido à natureza assimétrica da distribuição de frequências da umidade relativa observada nos dados e à presença de limites físicos rígidos (0 % e 100 %), o que torna a mediana um estimador mais robusto da condição típica de exposição.

Para a organização espacial dos dados, utiliza-se a variável `[Domínio Climático de Novais]` da amostra *SQL*, rotulada no *SPSS* como `Domínio Climático (DC)`. Essa variável não constitui um perfil geográfico independente, mas um atributo categórico empregado para estratificação, agrupamento e sumarização regional dos dados. Para facilitar a manipulação e a análise estatística, uma variável numérica derivada, `DC_NUM` (com rótulo `DC - Domínio Climático`), é criada a partir desta variável categórica. Outras variáveis geográficas, como `[LATITUDE:]`, `[LONGITUDE:]`, `[ESTACAO:]`, `[CODIGO (WMO):]` e a `REGIAO_ADM`, são utilizadas como apoio para a correta associação dos registros ao respectivo domínio climático e contexto regional.

D.2 REVISÃO DAS PROPRIEDADES DAS VARIÁVEIS

Em seguida, uma revisão detalhada das propriedades de cada variável é conduzida, envolvendo a verificação e ajuste de seus nomes, tipos (numérico, data, cadeia), largura e número de decimais, rótulos descritivos e a atribuição de rótulos de valor para variáveis categóricas, como os DCs e as regiões administrativas.

A criação de variáveis numéricas como `REGIAO_ADM` (oriunda da `UF`) e `DC_NUM` (oriunda da variável `Domínio Climático de Novais`) é realizada para facilitar a categorização e o processamento estatístico, otimizando a manipulação de dados em procedimentos que exigem formatos numéricos. Valores omissos, como `-9999` ou células vazias, são explicitamente definidos para serem tratados como `SYSMIS` [28],

[28] `SYSMIS` (*System-Missing*): no contexto do *IBM SPSS Statistics (IBM, 2022)* representa um valor ausente reconhecido pelo sistema. Diferentemente de valores ausentes definidos pelo usuário (*user-missing*), `SYSMIS` é o valor padrão atribuído pelo *SPSS* quando os dados são inconsistentes ou não existem, sendo automaticamente excluído da maioria das análises estatísticas (Berg, [*s. d.*]).

prevenindo sua inclusão indevida nos cálculos. Por fim, o nível de medida (`Escala` ou `Nominal`) é atribuído a cada variável.

D.3 CONTROLE DE QUALIDADE E INSPEÇÃO VISUAL DOS DADOS

Uma inspeção visual dos dados é realizada na "Visualização de Dados" para identificar padrões inesperados, erros de entrada ou valores extremos, servindo como um controle de qualidade inicial. Posteriormente, análises de frequências são aplicadas às variáveis categóricas (`Domínio Climático (DC)`, `DC_NUM`, `SEASON`, `REGIAO_ADM`) para verificar a representatividade e a distribuição de cada categoria, examinando o "Resumo de processamento de casos" para confirmar a consistência dos dados. Para as variáveis contínuas (`T`, `UR`, `i_prec` e, em caráter exploratório, `Rs`), uma análise descritiva detalhada é conduzida utilizando a função "Explorar". Esta análise permite obter medidas de tendência central e dispersão, incluindo média, desvio padrão, mínimo, máximo e, notadamente, a mediana e percentis (5º, 10º, 25º, 50º, 75º, 90º, 95º).

A escolha da mediana e dos percentis é justificada pela natureza dos dados climáticos, que frequentemente apresentam distribuições assimétricas e a presença de valores extremos, tornando-os menos sensíveis a esses fatores e mais fidedignos para indicar o valor típico da ocorrência. *Boxplots*, histogramas e testes de normalidade são gerados para visualizar a distribuição dos dados e identificar *outliers*, com a compreensão de que, em grandes conjuntos de dados, desvios da normalidade são esperados e não invalidam a robustez das análises baseadas em percentis. Os resultados descritivos relevantes são então exportados para documentação e para a construção dos perfis geográficos das variáveis mantidas no escopo final da pesquisa, bem como para o registro das variáveis exploratórias posteriormente excluídas.

D.4 AGREGAÇÃO TEMPORAL DE VARIÁVEIS DO INMET (T, UR, i_{prec} E, EM CARÁTER EXPLORATÓRIO, Rs)

Para as variáveis de leituras diretas – aquelas oriundas de dados brutos de estações meteorológicas do INMET (2025) (T, UR, i_{prec} e, em caráter exploratório, Rs)

– os dados horários são processados conforme a natureza física de cada fenômeno considerando sua relevância para os mecanismos de deterioração do CA/CP. No *SPSS Statistics* (IBM, 2022):

- Para a intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária (i_{prec}): calcula-se o máximo diário, agregando-se os dados [29] por `Data` + `CODIGOWMO` (cada estação em cada dia). A máxima intensidade horária de precipitação em cada dia é extraída da variável `[PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)]` do INMET (2025), gerando a variável `iprec_máx_diário` (expressa em mm/h). Esta abordagem é justificada porque a severidade dos processos de lixiviação de compostos hidratados da pasta de cimento (especialmente hidróxido de cálcio) e o carreamento de agentes agressivos para o interior da matriz porosa do concreto são influenciados pela intensidade instantânea da precipitação, além do volume acumulado (Okochi, 1995; Liu, Jun *et al.*, 2021). Eventos de alta intensidade (picos horários) geram maior pressão hidráulica nos poros, acelerando a penetração de íons deletérios e a dissolução de fases cimentícias, sendo, portanto, o parâmetro crítico para a avaliação do perfil de manifestação dessa variável (Kim; Gaddafi; Yoshitake, 2016; Jin *et al.*, 2021).

  A caracterização do perfil de i_{prec} utiliza o percentil P95 como parâmetro representativo de severidade, em vez da média ou da mediana. Esta escolha é justificada por duas razões: (i) dados de precipitação apresentam distribuição altamente assimétrica, com muitos dias sem chuva (zero) e cauda longa de eventos extremos (Cho; Bowman; North, 2004; Kedem; Chiu, 1987); (ii) a deterioração do concreto por lixiviação e carreamento de agentes agressivos é governada por eventos extremos, não pela média (Jin *et al.*, 2021; Liu, Wei-Jia *et al.*, 2022; Adesina; Zhang, 2024). O P95 representa o valor de intensidade de precipitação pluviométrica máxima diária que é excedido em apenas 5 % dos dias, capturando os eventos críticos que podem causar deterioração acelerada.
- Para a radiação solar (Rs): calcula-se o total diário (soma dos valores horários), agregando-se os dados por `Data` + `CODIGOWMO` (cada estação em cada dia). A

[29] A agregação de dados horários consiste no processamento dos 24 registros de cada dia para extrair um único valor representativo (diário) utilizando operações estatísticas específicas (máximo, soma ou média), reduzindo a dimensionalidade temporal sem perda de informação sobre os eventos extremos ou acumulados.

soma dos valores horários de radiação solar (expressos originalmente em kJ/m²) é convertida para MJ/m² mediante divisão por 1.000, gerando a variável `Rs_MJ_dia`. Esta abordagem é justificada porque o aquecimento superficial do concreto e a magnitude dos gradientes térmicos induzidos (entre a superfície exposta e o núcleo da peça) são primariamente função da energia total acumulada ao longo do dia, embora picos de irradiância instantânea também contribuam para variações térmicas localizadas (Liang *et al.*, 2023; Li; Ou, 2024).

A energia acumulada determina a elevação de temperatura da camada superficial e as tensões térmicas diferenciais que podem levar à microfissuração (Nguyen; Bui; Hoang, 2021; Zhang, Kai *et al.*, 2024), além de acelerar a cinética de reações químicas deletérias (carbonatação, corrosão) (Pang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023). Para fins exploratórios, adota-se a mediana como medida de tendência central, devido à menor assimetria dos dados diários observada para essa variável. Ressalta-se, contudo, que a radiação solar (Rs) foi posteriormente excluída da composição final do conjunto de perfis geográficos, permanecendo neste Apêndice apenas como registro metodológico da etapa exploratória.

Após a agregação diária, a variável `Rs_MJ_dia` é submetida a tratamento de outliers utilizando o Método do Intervalo Interquartil (IQR) (Tukey, 1977). Calculam-se os quartis Q1 (P25) e Q3 (P75) da distribuição de `Rs_MJ_dia` para todo o Brasil. O IQR é definido como IQR = Q3 − Q1. Os limites para identificação de *outliers* são estabelecidos como: Limite Superior = Q3 + 1,5 × IQR e Limite Inferior = Q1 − 1,5 × IQR. Todos os registros com `Rs_MJ_dia` fora dessa faixa são removidos da amostra, eliminando valores fisicamente implausíveis (máximos > 35 MJ/m²/dia ou mínimos < 0,78 MJ/m²/dia) que resultam de erros de medição ou processamento. Este procedimento garante que a distribuição final de `Rs_MJ_dia` reflita adequadamente as condições climáticas reais do Brasil.

- Para a temperatura (T) e a umidade relativa (UR): não é realizada agregação para valores diários. Os dados horários são utilizados diretamente para o cálculo de estatísticas descritivas (mediana, média, desvio padrão, percentis), uma vez que essas variáveis representam estados termodinâmicos do ambiente que controlam a cinética das reações de deterioração (carbonatação,

corrosão eletroquímica, hidratação de fases expansivas) e o equilíbrio higroscópico do concreto (Andrade; Alonso; Sarría, 2002; Vänttinen *et al.*, 2023; Wan *et al.*, 2025a).

Para a UR, especificamente, a mediana horária reflete a disponibilidade típica de água nos poros, fator determinante para a formação do eletrólito necessário à corrosão e para a taxa de difusão de CO_2 na carbonatação (Andrade; Alonso; Sarría, 2002; Wan *et al.*, 2025b). A manutenção da resolução horária permite capturar os ciclos de umedecimento e secagem que seriam mascarados pela média diária.

Para a T, a média horária governa a taxa média das reações termicamente ativadas ao longo do ciclo diurno (Pang *et al.*, 2021; Kim; Kim, 2023). A amplitude térmica máxima diária (`T_máx − T_mín`) é também calculada como indicador complementar (Wang, Guoqing *et al.*, 2022).

Para a caracterização do perfil de manifestação de T e UR, adota-se a mediana como medida de tendência central, garantindo robustez estatística frente à variabilidade diária e sazonal e à presença de *outliers*.

Importante ressaltar que, para os dados de todas as variáveis diretas, não é feita a separação por DCs nesta etapa, pois os dados consolidados são utilizados para a montagem do perfil geográfico para a respectiva variável, e ela é aplicada para todos os DCs, garantindo a universalidade e a comparabilidade dos critérios de classificação.

D.5 PROCESSAMENTO GLOBAL DAS VARIÁVEIS DE SATÉLITE (*PYTHON*)

Diferentemente das variáveis do INMET, processadas via *IBM SPSS Statistics* (IBM, 2022), as variáveis de satélite ([CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}], [Cl^-]) apresentam-se originalmente em malhas *raster* (*grids)* cobrindo todo o território nacional. A análise global destas variáveis foi processada em ambiente *Python* (Miniconda 3 (Anaconda, Inc., 2024)), utilizando as bibliotecas `rasterio` para manipulação geoespacial e `numpy` para cálculos estatísticos de matrizes massivas.

O objetivo desta etapa foi extrair o histograma de frequências de todos os pixels válidos sobre o território brasileiro (sem distinção de DC), obtendo percentis de referência (P10, P25, P50, P75, P90, P95 e P99) para subsidiar a calibração

complementar dos perfis geográficos e apoiar a caracterização estatística global das variáveis de satélite.

O Código 4 apresenta o algoritmo desenvolvido para a variável de concentração de CO_2 atmosférico. Esta rotina exemplifica o fluxo metodológico aplicado a todas as variáveis de satélite, consistindo em: (i) leitura e agregação temporal das séries históricas (*NetCDF*); (ii) dissolução dos vetores estaduais para criação de uma máscara única do território brasileiro; (iii) extração dos pixels válidos contidos na geometria nacional; e (iv) cálculo das estatísticas descritivas e exportação dos resultados.

Código 4 – Rotina *Python* para processamento de [CO_2]: leitura *NetCDF* e estatística global

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Leitura
data_dir = Path("dados_nasa_co2")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc")))

# 2. Agregação Temporal (Média de todos os arquivos)
co2_arrays = []
for nc_file in nc_files:
    try:
        ds = xr.open_dataset(nc_file)
        # Identifica variável de CO2 e extrai valores
        data = ds['CO2'].values # Ajustar nome da variável conforme NetCDF
        if data.ndim == 3: data = np.nanmean(data, axis=0)
        co2_arrays.append(data * 1e6) # Conversão para ppm
        ds.close()
    except: continue

co2_mean_global = np.nanmean(co2_arrays, axis=0)
lats, lons = ds['lat'].values, ds['lon'].values

# 3. Máscara Espacial (Brasil)
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
brasil_geom = gdf.dissolve().geometry.values[0] # Dissolve para contorno único

# Recorte para Bounding Box do Brasil (Otimização)
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
co2_box = co2_mean_global[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_box, lons_box = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Extração de Pixels Válidos (Point-in-Polygon)
pixels_brasil = []
for i, lat in enumerate(lats_box):
    for j, lon in enumerate(lons_box):
        if not np.isnan(co2_box[i, j]):
            if brasil_geom.contains(Point(lon, lat)):
                pixels_brasil.append(co2_box[i, j])

# 5. Estatística Descritiva e Exportação
pixels_brasil = np.array(pixels_brasil)
percentis = [5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99]
stats = {
    'Média': np.mean(pixels_brasil),
    'Mediana': np.median(pixels_brasil),
    'Desvio Padrão': np.std(pixels_brasil, ddof=1),
    'Mínimo': np.min(pixels_brasil),
    'Máximo': np.max(pixels_brasil)
}
# Adiciona percentis ao dicionário
for p in percentis:
    stats[f'P{p:02d}'] = np.percentile(pixels_brasil, p)

df_stats = pd.DataFrame([stats])
df_stats.to_excel('co2_estatistica_GLOBAL_BRASIL.xlsx', index=False)
print("Processamento concluído.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a variável [Cl^-], o procedimento exigiu uma etapa adicional de pré-processamento, uma vez que os dados brutos do MERRA-2 (*GMAO*, 2015) são

disponibilizados em cinco faixas de tamanho de partícula (*bins*) e em unidades de fluxo de massa (kg/m²/s). O Código 5 detalha o algoritmo implementado para o somatório das componentes de deposição (`SSSD001` a `SSSD005`) e a conversão para a unidade de engenharia adotada (mg/m²/dia), antes da extração das estatísticas globais.

Código 5 – Rotina *Python* para processamento de cloretos: soma de componentes e conversão de unidades

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_merra2_cloretos")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
# Fator: kg/m²/s -> mg/m²/dia (1e6 * 86400)
FATOR_CONVERSAO = 8.64e10
CL_VARS = ['SSSD001', 'SSSD002', 'SSSD003', 'SSSD004', 'SSSD005']

# 2. Leitura e Soma das Componentes (Bins)
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc4")))
cl_sum = None
cl_count = None

for nc_file in nc_files:
    try:
        with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
            # Soma das 5 faixas de tamanho de partícula
            total_dep = np.zeros_like(ds[CL_VARS[0]].values.squeeze(), dtype=np.float64)
            for var in CL_VARS:
                total_dep += ds[var].values.squeeze().astype(np.float64)

            # Inicializa acumuladores na primeira iteração
            if cl_sum is None:
                cl_sum = np.zeros_like(total_dep)
                cl_count = np.zeros_like(total_dep, dtype=int)
                lats, lons = ds.lat.values, ds.lon.values

            valid = (total_dep >= 0) & (~np.isnan(total_dep))
            cl_sum += np.where(valid, total_dep, 0)
            cl_count += valid.astype(int)
    except: continue

# 3. Média Temporal e Conversão
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    cl_mean_kg = np.divide(cl_sum, cl_count, where=cl_count > 0)
    cl_mean_kg[cl_count == 0] = np.nan

cl_mean_mg = cl_mean_kg * FATOR_CONVERSAO # Aplicação do fator de conversão

# 4. Recorte Espacial (Brasil)
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
brasil_geom = gdf.unary_union

# Otimização com Bounding Box
min_lon, min_lat, max_lon, max_lat = brasil_geom.bounds
lat_mask = (lats >= min_lat) & (lats <= max_lat)
lon_mask = (lons >= min_lon) & (lons <= max_lon)
cl_crop = cl_mean_mg[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_crop, lons_crop = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 5. Extração de Pixels e Estatísticas
valores_brasil = []
for i, lat in enumerate(lats_crop):
    for j, lon in enumerate(lons_crop):
        if not np.isnan(cl_crop[i, j]):
            if brasil_geom.contains(Point(lon, lat)):
                valores_brasil.append(cl_crop[i, j])

arr = np.array(valores_brasil)
stats = {
    'Média': np.mean(arr),
    'Mediana': np.median(arr),
    'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
    'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
    'Mínimo': np.min(arr),
    'Máximo': np.max(arr),
    'P90': np.percentile(arr, 90),
    'P95': np.percentile(arr, 95)
}

pd.DataFrame([stats]).to_excel('Estatisticas_Cl_Brasil.xlsx', index=False)
print("Processamento de Cloretos concluído.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as variáveis de concentração de gases ([NOx] e [SOx]), o processamento exigiu a manipulação de arquivos no formato *HDF-EOS5* e a aplicação de fatores de conversão baseados na física da atmosfera. A concentração de coluna (expressa em

moléculas/cm²) deve ser convertida para concentração volumétrica na superfície (µg/m³), adotando-se uma altura de camada de mistura (*PBL*) de 2.000 m para estimar a concentração na zona de exposição das estruturas de concreto.

O Código 6 apresenta o algoritmo desenvolvido especificamente para o dióxido de nitrogênio (NO_2), considerando sua massa molar (46,0055 g/mol) para a conversão de unidades.

Código 6 – Rotina *Python* para processamento de NOx: leitura HDF5 e conversão física (*PBL*)

```
import h5py
import numpy as np
import pandas as pd
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes Físicas
data_dir = Path("dados_nasa_no2")
# Constantes para conversão: molec/cm² -> µg/m³
MASSA_MOLAR_NO2 = 46.0055  # g/mol
AVOGADRO = 6.022e23        # moléculas/mol
ALTURA_PBL = 2000          # metros (Camada de Mistura)

# Fator = (Massa * 1e10 [cm²->m²] * 1e6 [g->µg]) / (Avogadro * Altura)
# Simplificado: (46.0055 * 1e16) / (6.022e23 * 2000)
FATOR_CONVERSAO = (MASSA_MOLAR_NO2 * 1e10 * 1e6) / (AVOGADRO * ALTURA_PBL)

# 2. Leitura HDF-EOS5 e Média Temporal
he5_files = sorted(list(data_dir.glob("*.he5")))
no2_sum = None
no2_count = None

# Grade OMI (0.25 x 0.25 graus)
lats = np.arange(-89.875, 90, 0.25)
lons = np.arange(-179.875, 180, 0.25)

for he5_file in he5_files:
    try:
        with h5py.File(he5_file, 'r') as f:
            # Caminho interno do HDF5 (ajustar conforme estrutura do arquivo)
            grid = f['HDFEOS']['GRIDS']['ColumnAmountNO2']
            data = grid['Data Fields']['ColumnAmountNO2TropCloudScreened'][:]

            # Aplicação de Fatores de Escala e Fill Value
            if 'ScaleFactor' in data.attrs: data *= data.attrs['ScaleFactor']
            if 'Offset' in data.attrs: data += data.attrs['Offset']
            fill_val = data.attrs.get('_FillValue', -1.267651e30)
            data = np.where(data == fill_value, np.nan, data)

            # Inicialização
            if no2_sum is None:
                no2_sum = np.zeros_like(data, dtype=float)
                no2_count = np.zeros_like(data, dtype=int)

            valid = (data >= 0) & (~np.isnan(data))
            no2_sum += np.where(valid, data, 0)
            no2_count += valid.astype(int)
    except: continue

# 3. Cálculo da Média e Conversão
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    no2_mean = np.divide(no2_sum, no2_count, where=no2_count > 0)
    no2_mean[no2_count == 0] = np.nan

no2_ugm3 = no2_mean * FATOR_CONVERSAO

# 4. Recorte Brasil e Estatísticas
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
no2_crop = no2_ugm3[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]

pixels_brasil = no2_crop[~np.isnan(no2_crop)] # Simplificação (Bounding Box)
# Nota: Para maior precisão, usar máscara de shapefile como nos códigos anteriores

stats = {
    'Média (µg/m³)': np.mean(pixels_brasil),
    'Mediana (µg/m³)': np.median(pixels_brasil),
    'P90 (µg/m³)': np.percentile(pixels_brasil, 90),
    'P95 (µg/m³)': np.percentile(pixels_brasil, 95)
}

pd.DataFrame([stats]).to_excel('Estatisticas_NO2_Brasil.xlsx', index=False)
print("Processamento NO2 concluído.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga, mas com parâmetros físicos distintos, o Código 7 detalha o processamento para o dióxido de enxofre (SO_2). Neste caso, o algoritmo ajusta o fator de conversão utilizando a massa molar do SO_2 (64,066 g/mol), mantendo a premissa de altura da camada de mistura.

Código 7 – Rotina *Python* para processamento de SOx: leitura HDF5 e conversão física (*PBL*)

```
import h5py
import numpy as np
import pandas as pd
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes Físicas
data_dir = Path("dados_nasa_so2")
MASSA_MOLAR_SO2 = 64.066  # g/mol
AVOGADRO = 6.022e23       # moléculas/mol
ALTURA_PBL = 2000         # metros (Camada de Mistura)

# Fator: Dobson Units (DU) -> µg/m³
# 1 DU = 2.69e16 moléculas/cm²
FATOR_CONVERSAO = (2.69e16 * MASSA_MOLAR_SO2 * 1e10 * 1e6) / (AVOGADRO * ALTURA_PBL)

# 2. Leitura HDF-EOS5 e Acumulação
he5_files = sorted(list(data_dir.glob("*.he5")))
so2_sum = None
so2_count = None

# Grade OMI (0.25 x 0.25 graus)
lats = np.arange(-89.875, 90, 0.25)
lons = np.arange(-179.875, 180, 0.25)

for he5_file in he5_files:
    try:
        with h5py.File(he5_file, 'r') as f:
            # Identificação dinâmica da grid (ajustar conforme arquivo)
            grid_name = list(f['HDFEOS']['GRIDS'].keys())[0]
            # Variável PBL (Planetary Boundary Layer) preferencial
            data_path = f"HDFEOS/GRIDS/{grid_name}/Data Fields/ColumnAmountSO2_PBL"

            data = f[data_path][:].astype(float)
            attrs = f[data_path].attrs

            # Aplicação de Fatores de Escala
            if 'ScaleFactor' in attrs: data *= attrs['ScaleFactor']
            if 'Offset' in attrs: data += attrs['Offset']
            fill_val = attrs.get('_FillValue', -9999)
            data = np.where(data == fill_val, np.nan, data)
            data = np.where(data < 0, np.nan, data)

            # Inicialização na primeira passagem
            if so2_sum is None:
                so2_sum = np.zeros_like(data)
                so2_count = np.zeros_like(data, dtype=int)

            valid = ~np.isnan(data)
            so2_sum += np.where(valid, data, 0)
            so2_count += valid.astype(int)
    except: continue

# 3. Média e Conversão
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    so2_mean_du = np.divide(so2_sum, so2_count, where=so2_count > 0)
    so2_mean_du[so2_count == 0] = np.nan

so2_ugm3 = so2_mean_du * FATOR_CONVERSAO

# 4. Recorte Brasil (Bounding Box)
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
so2_crop = so2_ugm3[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
pixels_brasil = so2_crop[~np.isnan(so2_crop)]

# 5. Estatísticas
stats = {
    'Média (µg/m³)': np.mean(pixels_brasil),
    'Mediana (µg/m³)': np.median(pixels_brasil),
    'Desvio Padrão': np.std(pixels_brasil, ddof=1),
    'P90': np.percentile(pixels_brasil, 90),
    'P95': np.percentile(pixels_brasil, 95),
    'P99': np.percentile(pixels_brasil, 99)
}

pd.DataFrame([stats]).to_excel('Estatisticas_SO2_Brasil.xlsx', index=False)
print("Processamento SO2 concluído.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, para a deposição total de sulfatos ($[SO_4^{2-}]$), o processamento envolveu a agregação de múltiplas componentes físicas. O modelo MERRA-2 (*GMAO*, 2015) disponibiliza separadamente a deposição seca e a deposição úmida, ambas

subdivididas em quatro faixas de tamanho de partícula (*bins*). O Código 8 apresenta o algoritmo que realiza o somatório dessas oito variáveis (`SUDP001` a `SUDP004` e `SUWT001` a `SUWT004`) para obter a deposição total, convertendo o fluxo de massa resultante (kg/m²/s) para a unidade de referência (mg/m²/dia).

Código 8 – Rotina *Python* para processamento de sulfatos: leitura *NetCDF* e estatística global

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_merra2_sulfato")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
# Fator: kg/m²/s -> mg/m²/dia (1e6 * 86400)
FATOR_CONVERSAO = 8.64e10

# Variáveis de Deposição (Seca + Úmida)
VARS_SULFATO = [
    'SUDP001', 'SUDP002', 'SUDP003', 'SUDP004', # Dry Deposition
    'SUWT001', 'SUWT002', 'SUWT003', 'SUWT004'  # Wet Deposition
]

# 2. Leitura e Soma das Componentes
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc4")))
so4_sum = None
so4_count = None

for nc_file in nc_files:
    try:
        with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
            # Soma das 8 variáveis (Deposição Total Instantânea)
            total_dep = np.zeros_like(ds[VARS_SULFATO[0]].values.squeeze(), dtype=float)
            for var in VARS_SULFATO:
                if var in ds:
                    val = ds[var].values.squeeze()
                    total_dep += np.nan_to_num(val, nan=0.0)

            # Inicialização
            if so4_sum is None:
                so4_sum = np.zeros_like(total_dep)
                so4_count = np.zeros_like(total_dep, dtype=int)
                lats, lons = ds.lat.values, ds.lon.values

            valid = (total_dep >= 0)
            so4_sum += np.where(valid, total_dep, 0)
            so4_count += valid.astype(int)
    except: continue

# 3. Média Temporal e Conversão
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    so4_mean_kg = np.divide(so4_sum, so4_count, where=so4_count > 0)
    so4_mean_kg[so4_count == 0] = np.nan

so4_mean_mg = so4_mean_kg * FATOR_CONVERSAO

# 4. Recorte Espacial (Brasil)
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
brasil_geom = gdf.unary_union

# Otimização com Bounding Box
min_lon, min_lat, max_lon, max_lat = brasil_geom.bounds
lat_mask = (lats >= min_lat) & (lats <= max_lat)
lon_mask = (lons >= min_lon) & (lons <= max_lon)
so4_crop = so4_mean_mg[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_c, lons_c = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 5. Extração de Pixels e Estatísticas
valores_brasil = []
for i, lat in enumerate(lats_c):
    for j, lon in enumerate(lons_c):
        if not np.isnan(so4_crop[i, j]):
            if brasil_geom.contains(Point(lon, lat)):
                valores_brasil.append(so4_crop[i, j])

arr = np.array(valores_brasil)
stats = {
    'Média': np.mean(arr),
    'Mediana': np.median(arr),
    'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
    'P90': np.percentile(arr, 90),
    'P95': np.percentile(arr, 95)
}

pd.DataFrame([stats]).to_excel('Estatisticas_SO4_Brasil.xlsx', index=False)
print("Processamento de Sulfatos concluído.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – Caracterização climática regionalizada (por DC)

- NOTA DE ESCLARECIMENTO METODOLÓGICO: os dados referentes à radiação solar (Rs) e à distância da orla marinha ($d_{orla,[Cl^-]}$) apresentados neste Apêndice correspondem a etapas exploratórias de tratamento estatístico e espacial da pesquisa. Contudo, em alinhamento com o refinamento metodológico e para evitar o mascaramento de escala na avaliação macroclimática, essas variáveis foram suprimidas da composição final dos perfis geográficos. O registro de seu processamento é mantido neste documento exclusivamente por rigor científico, reprodutibilidade e transparência quanto ao volume de dados inicialmente investigado.

Esta seção apresenta os procedimentos analíticos focados na variabilidade espacial dos dados, segmentando o território nacional nos 8 Domínios Climáticos (DCs). O objetivo desta etapa distingue-se da análise global (“APÊNDICE D – Análise estatística global e parâmetros de calibração (Brasil)”) ao buscar o comportamento típico e as especificidades de agressividade de cada região.

E.1 SEGMENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO INMET (2025) (*SPSS (IBM, 2022)*)

A análise regionalizada das variáveis diretas (T, UR, i_{prec} e, em caráter exploratório, Rs) e a subvariável ΔT foi executada no *software IBM SPSS Statistics* (IBM, 2022) através da interface gráfica, utilizando a função de processamento particionado (*Split File*). O conjunto de dados foi ordenado e segmentado pela variável categórica representativa dos Domínios Climáticos de Novais (`DomínioClimáticodeNovais`), permitindo a geração de estatísticas descritivas independentes para cada um dos oito domínios.

A radiação solar (Rs), embora processada em etapa exploratória da pesquisa, foi excluída da composição final dos perfis geográficos e, por essa razão, não integra a análise regionalizada final apresentada neste Apêndice.

Para cada variável, foram calculados os seguintes indicadores estatísticos, visando tanto a caracterização do comportamento típico quanto a identificação de eventos extremos de agressividade:

- Medidas de tendência central: média e mediana.
- Medidas de dispersão: desvio padrão, mínimo e máximo.

- Percentis de referência: 25º, 75º, 90º, 95º e 99º.

Essa abordagem permitiu traçar o perfil geográfico específico de cada Domínio Climático, isolando o efeito da localização geográfica e fornecendo os subsídios quantitativos para a comparação entre as regiões, conforme apresentado nos resultados do capítulo “5. RESULTADOS E DISCUSSÕES”.

E.2 SEGMENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SATÉLITE (*PYTHON* (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2025))

Para as variáveis de satélite ([CO_2], [NOx], [SOx], [SO_4^{2-}] e [Cl^-]), as estatísticas descritivas são calculadas diretamente a partir dos dados processados em *Python* (Python Software Foundation, 2025), no ambiente Miniconda 3 (Anaconda, Inc., 2024), com uso das bibliotecas `numpy` e `pandas`. Para cada variável, calculam-se número de *pixels* válidos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), valor mínimo, valor máximo, amplitude, percentis e amplitude interquartil (AIQ), conforme a natureza dos dados e os critérios metodológicos definidos para cada caso.

Os procedimentos de agregação temporal (média climatológica 2002-2024 para [CO_2]; média climatológica 2004-2025 para [NOx] e [SOx]; média climatológica 2000-2024 para [SO_4^{2-}] e [Cl^-]) são realizados e os resultados são tabulados por DC para facilitar a comparação com os perfis geográficos.

Para a deposição de cloretos ([Cl^-]), as estatísticas descritivas são calculadas a partir dos dados processados em Python, utilizando os mesmos indicadores estatísticos: número de pixels válidos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), valor mínimo, valor máximo, amplitude, percentis (P25, P75, P90, P95, P99) e amplitude interquartil (AIQ). Os percentis P90, P95 e P99 são utilizados internamente para calibração dos perfis, enquanto P25 e P75 são incluídos nos resultados apresentados ao leitor para caracterização da distribuição de dados por DC.

Para a concentração de dióxido de carbono ([CO_2]), a rotina computacional segue a lógica de estatística zonal, porém adaptada para a leitura de arquivos *NetCDF* e conversão direta para ppm, conforme apresentado no Código 9.

Código 9 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de CO_2 por DC

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração
data_dir = Path("dados_nasa_co2")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
coluna_nome_dc = "Dominio"

# 2. Processamento Global (Média Temporal 2002-2024)
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc")))
co2_arrays = []

# Identificação automática da variável CO2
ds_test = xr.open_dataset(nc_files[0])
co2_var = next(v for v in ds_test.data_vars if 'co2' in str(v).lower())
lats, lons = ds_test.lat.values, ds_test.lon.values
ds_test.close()

for nc_file in nc_files:
    try:
        with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
            data = ds[co2_var].values
            # Redução de dimensão se necessário (tempo -> média)
            if data.ndim == 3: data = np.nanmean(data, axis=0)
            co2_arrays.append(data)
    except: continue

# Média de todos os arquivos e conversão para ppm (x 1e6)
co2_mean_global = np.nanmean(np.array(co2_arrays), axis=0) * 1_000_000

# 3. Recorte Brasil
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
co2_brasil = co2_mean_global[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_b, lons_b = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Estatística Zonal
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
dominios = gdf.dissolve(by=coluna_nome_dc)
resultados = []

for nome_dc, row in dominios.iterrows():
    geom = row.geometry
    valores_dc = []

    # Varredura de pixels
    for i, lat in enumerate(lats_b):
        for j, lon in enumerate(lons_b):
            if not np.isnan(co2_brasil[i, j]):
                if geom.contains(Point(lon, lat)):
                    valores_dc.append(co2_brasil[i, j])

    if valores_dc:
        arr = np.array(valores_dc)
        resultados.append({
            'Domínio': nome_dc,
            'Média (ppm)': np.mean(arr),
            'Mediana (ppm)': np.median(arr),
            'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
            'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
            'Amplitude': np.ptp(arr),
            'AIQ': np.percentile(arr, 75) - np.percentile(arr, 25)
        })

pd.DataFrame(resultados).to_excel('Estatisticas_CO2_por_DC.xlsx', index=False)
print("Análise de CO2 concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Código 10 apresenta a rotina computacional desenvolvida para a extração das estatísticas zonais (*Zonal Statistics*) da deposição de cloretos, iterando sobre os polígonos dos domínios climáticos.

Código 10 – Rotina *Python* para estatística zonal de deposição de cloretos por DC

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_merra2_cloretos")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
coluna_nome_dc = "Dominio"
# Fator de conversão: kg/m²/s -> mg/m²/dia (1e6 * 86400)
FATOR_CONVERSAO = 8.64e10
# Variáveis de deposição de sal marinho (bins de tamanho)
CL_VARS = ['SSSD001', 'SSSD002', 'SSSD003', 'SSSD004', 'SSSD005']

# 2. Processamento Global (Soma de Bins e Média Temporal)
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc4")))
cl_sum = None
cl_count = None

for nc_file in nc_files:
    try:
        with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
            # Soma das 5 variáveis (Deposição Total Instantânea)
            total_dep = np.zeros_like(ds[CL_VARS[0]].values.squeeze(), dtype=float)
            for var in CL_VARS:
                total_dep += ds[var].values.squeeze()

            # Inicialização dos arrays acumuladores
            if cl_sum is None:
                cl_sum = np.zeros_like(total_dep)
                cl_count = np.zeros_like(total_dep, dtype=int)
                lats, lons = ds.lat.values, ds.lon.values

            # Acumulação incremental (apenas valores válidos)
            valid = (total_dep >= 0) & (~np.isnan(total_dep))
            cl_sum += np.where(valid, total_dep, 0)
            cl_count += valid.astype(int)
    except: continue

# Cálculo da média e conversão de unidade
with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    cl_mean = np.divide(cl_sum, cl_count, where=cl_count > 0)
    cl_mean[cl_count == 0] = np.nan

cl_mg = cl_mean * FATOR_CONVERSAO

# 3. Recorte Espacial (Brasil)
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
cl_brasil = cl_mg[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_b, lons_b = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Estatística Zonal (Iteração por Domínio)
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
dominios = gdf.dissolve(by=coluna_nome_dc)
resultados = []

for nome_dc, row in dominios.iterrows():
    geom = row.geometry
    valores_dc = []

    # Extração de pixels contidos na geometria do domínio
    for i, lat in enumerate(lats_b):
        for j, lon in enumerate(lons_b):
            if geom.contains(Point(lon, lat)):
                val = cl_brasil[i, j]
                if not np.isnan(val):
                    valores_dc.append(val)

    # Cálculo das estatísticas descritivas
    if valores_dc:
        arr = np.array(valores_dc)
        resultados.append({
            'Domínio': nome_dc,
            'Média': np.mean(arr),
            'Mediana': np.median(arr),
            'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
            'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
            'P25': np.percentile(arr, 25),
            'P75': np.percentile(arr, 75),
            'AIQ': np.percentile(arr, 75) - np.percentile(arr, 25)
        })

pd.DataFrame(resultados).to_excel('Estatisticas_Cl_por_DC.xlsx', index=False)
print("Análise Zonal concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a concentração de óxidos de nitrogênio ([NO_x]), o processamento envolve a leitura de arquivos *HDF-EOS5*, com a aplicação de fatores de conversão baseados na altura da *PBL* de 2.000 m, transformando a densidade de coluna (molec/cm²) em concentração superficial (µg/m³), conforme detalhado no Código 11.

Código 11 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de NOx por DC

```
import h5py
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_nasa_no2")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
coluna_nome_dc = "Dominio"
# Conversão: molec/cm² -> µg/m³ (PBL 2000m)
MASSA_MOLAR_NO2 = 46.0055
AVOGADRO = 6.022e23
ALTURA_PBL = 2000
FATOR_CONVERSAO = (MASSA_MOLAR_NO2 * 1e10) / (AVOGADRO * ALTURA_PBL)

# 2. Processamento Global (Média Temporal 2004-2025)
he5_files = sorted(list(data_dir.glob("*.he5")))
lats = np.arange(-89.875, 90, 0.25)
lons = np.arange(-179.875, 180, 0.25)
no2_sum = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=float)
no2_count = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=int)

# Identificação da variável (prioridade de nomes)
with h5py.File(he5_files[0], 'r') as f:
    grid = list(f['HDFEOS']['GRIDS'].keys())[0]
    vars_avail = list(f[f"HDFEOS/GRIDS/{grid}/Data Fields"].keys())
    var_name = next(v for v in ['ColumnAmountNO2TropCloudScreened', 'ColumnAmountNO2Trop'] if v in vars_avail)
    data_path = f"HDFEOS/GRIDS/{grid}/Data Fields/{var_name}"

for he5_file in he5_files:
    try:
        with h5py.File(he5_file, 'r') as f:
            data = f[data_path][:].astype(float)
            # Aplicação de ScaleFactor, Offset e FillValue
            attrs = f[data_path].attrs
            if 'ScaleFactor' in attrs: data *= attrs['ScaleFactor']
            if 'Offset' in attrs: data += attrs['Offset']
            if '_FillValue' in attrs: data[data == attrs['_FillValue']] = np.nan

            valid = (data >= 0) & (~np.isnan(data))
            no2_sum += np.where(valid, data, 0)
            no2_count += valid.astype(int)
    except: continue

with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    no2_mean = np.divide(no2_sum, no2_count, where=no2_count > 0)
    no2_mean[no2_count == 0] = np.nan

no2_ugm3 = no2_mean * FATOR_CONVERSAO

# 3. Recorte Brasil
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
no2_brasil = no2_ugm3[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_b, lons_b = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Estatística Zonal
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
dominios = gdf.dissolve(by=coluna_nome_dc)
resultados = []

for nome_dc, row in dominios.iterrows():
    geom = row.geometry
    valores_dc = []

    for i, lat in enumerate(lats_b):
        for j, lon in enumerate(lons_b):
            if not np.isnan(no2_brasil[i, j]):
                if geom.contains(Point(lon, lat)):
                    valores_dc.append(no2_brasil[i, j])

    if valores_dc:
        arr = np.array(valores_dc)
        resultados.append({
            'Domínio': nome_dc,
            'Média (µg/m³)': np.mean(arr),
            'Mediana (µg/m³)': np.median(arr),
            'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
            'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
            'AIQ': np.percentile(arr, 75) - np.percentile(arr, 25)
        })

pd.DataFrame(resultados).to_excel('Estatisticas_NO2_por_DC.xlsx', index=False)
print("Análise de NO2 concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira análoga, a concentração de óxidos de enxofre ([SOx]) requer a conversão de Unidades Dobson (*DU*) para μg/m³, considerando a mesma altura de camada limite (*PBL* = 2.000 m) e a massa molar do SO_2, conforme o Código 12.

Código 12 – Rotina *Python* para estatística zonal de concentração de SOx por DC

```
import h5py
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_nasa_so2")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
coluna_nome_dc = "Dominio"
# Conversão: DU -> µg/m³ (PBL 2000m)
MASSA_MOLAR_SO2 = 64.066
AVOGADRO = 6.022e23
ALTURA_PBL = 2000
# 1 DU = 2.69e16 molec/cm²
FATOR_CONVERSAO = (2.69e16 * MASSA_MOLAR_SO2 * 1e10) / (AVOGADRO * ALTURA_PBL)

# 2. Processamento Global (Média Temporal 2004-2025)
he5_files = sorted(list(data_dir.glob("*.he5")))
lats = np.arange(-89.875, 90, 0.25)
lons = np.arange(-179.875, 180, 0.25)
so2_sum = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=float)
so2_count = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=int)

# Identificação da variável (prioridade: PBL -> Total)
with h5py.File(he5_files[0], 'r') as f:
    grid = list(f['HDFEOS']['GRIDS'].keys())[0]
    vars_avail = list(f[f"HDFEOS/GRIDS/{grid}/Data Fields"].keys())
    var_name = next(v for v in ['ColumnAmountSO2_PBL', 'ColumnAmountSO2'] if v in vars_avail)
    data_path = f"HDFEOS/GRIDS/{grid}/Data Fields/{var_name}"

for he5_file in he5_files:
    try:
        with h5py.File(he5_file, 'r') as f:
            data = f[data_path][:].astype(float)
            attrs = f[data_path].attrs
            if 'ScaleFactor' in attrs: data *= attrs['ScaleFactor']
            if 'Offset' in attrs: data += attrs['Offset']
            if '_FillValue' in attrs: data[data == attrs['_FillValue']] = np.nan

            valid = (data >= 0) & (~np.isnan(data))
            so2_sum += np.where(valid, data, 0)
            so2_count += valid.astype(int)
    except: continue

with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    so2_mean = np.divide(so2_sum, so2_count, where=so2_count > 0)
    so2_mean[so2_count == 0] = np.nan

so2_ugm3 = so2_mean * FATOR_CONVERSAO

# 3. Recorte Brasil
lat_mask = (lats >= -35) & (lats &lt;= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons &lt;= -30)
so2_brasil = so2_ugm3[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_b, lons_b = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Estatística Zonal
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
dominios = gdf.dissolve(by=coluna_nome_dc)
resultados = []

for nome_dc, row in dominios.iterrows():
    geom = row.geometry
    valores_dc = []

    for i, lat in enumerate(lats_b):
        for j, lon in enumerate(lons_b):
            if not np.isnan(so2_brasil[i, j]):
                if geom.contains(Point(lon, lat)):
                    valores_dc.append(so2_brasil[i, j])

    # Tratamento para domínios vazios ou com dados
    stats = {'Domínio': nome_dc}
    if valores_dc:
        arr = np.array(valores_dc)
        stats.update({
            'Média (µg/m³)': np.mean(arr),
            'Mediana (µg/m³)': np.median(arr),
            'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
            'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
            'AIQ': np.percentile(arr, 75) - np.percentile(arr, 25)
        })
    else:
        stats.update({'Média (µg/m³)': None, 'CV (%)': None})
    resultados.append(stats)

pd.DataFrame(resultados).to_excel('Estatisticas_SO2_por_DC.xlsx', index=False)
print("Análise de SO2 concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, para a deposição de sulfatos ([SO_4^{2-}]), o procedimento computacional realiza a soma das oito variáveis de deposição (seca e úmida), converte a taxa de fluxo de massa de kg/m²/s para mg/m²/dia e extrai as estatísticas zonais, incluindo o enquadramento percentual nas faixas de classificação, conforme demonstrado no Código 13.

Código 13 – Rotina *Python* para estatística zonal de deposição de sulfatos por DC

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import Point
from pathlib import Path

# 1. Configuração e Constantes
data_dir = Path("dados_merra2_sulfato")
shapefile_path = "Classificacao_tipo_climatico.shp"
coluna_nome_dc = "Dominio"
# Fator: kg/m²/s -> mg/m²/dia (1e6 * 86400)
FATOR_CONVERSAO = 8.64e10
# Variáveis de deposição (Seca + Úmida)
VARS_SULFATO = [
    'SUDP001', 'SUDP002', 'SUDP003', 'SUDP004', # Dry Deposition
    'SUWT001', 'SUWT002', 'SUWT003', 'SUWT004'  # Wet Deposition
]

# 2. Processamento Global (Soma de Componentes e Média Temporal)
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc4")))
so4_sum = None
so4_count = None

for nc_file in nc_files:
    try:
        with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
            # Soma das 8 variáveis para o arquivo atual
            monthly_sum = np.zeros_like(ds[VARS_SULFATO[0]].values.squeeze(), dtype=float)
            found_vars = [v for v in VARS_SULFATO if v in ds]

            for var in found_vars:
                val = ds[var].values.squeeze()
                monthly_sum += np.nan_to_num(val, nan=0.0)

            if so4_sum is None:
                so4_sum = np.zeros_like(monthly_sum)
                so4_count = np.zeros_like(monthly_sum, dtype=int)
                lats, lons = ds.lat.values, ds.lon.values

            so4_sum += monthly_sum
            so4_count += 1
    except: continue

with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
    so4_mean = np.divide(so4_sum, so4_count, where=so4_count > 0)

so4_mg = so4_mean * FATOR_CONVERSAO

# 3. Recorte Brasil
lat_mask = (lats >= -35) & (lats &lt;= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons &lt;= -30)
so4_brasil = so4_mg[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_b, lons_b = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# 4. Estatística Zonal e Faixas de Classificação
gdf = gpd.read_file(shapefile_path)
dominios = gdf.dissolve(by=coluna_nome_dc)
resultados = []

for nome_dc, row in dominios.iterrows():
    geom = row.geometry
    valores_dc = []

    for i, lat in enumerate(lats_b):
        for j, lon in enumerate(lons_b):
            if geom.contains(Point(lon, lat)):
                val = so4_brasil[i, j]
                if not np.isnan(val):
                    valores_dc.append(val)

    if valores_dc:
        arr = np.array(valores_dc)
        n = len(arr)
        resultados.append({
            'Domínio': nome_dc,
            'Média (mg/m²/dia)': np.mean(arr),
            'Mediana': np.median(arr),
            'Desvio Padrão': np.std(arr, ddof=1),
            'CV (%)': (np.std(arr, ddof=1) / np.mean(arr)) * 100,
            'Verde (<=4) %': (np.sum(arr &lt;= 4) / n) * 100,
            'Amarela (4-24) %': (np.sum((arr > 4) & (arr &lt;= 24)) / n) * 100,
            'Laranja (24-80) %': (np.sum((arr > 24) & (arr &lt;= 80)) / n) * 100,
            'Vermelha (>80) %': (np.sum(arr > 80) / n) * 100
        })

pd.DataFrame(resultados).to_excel('Estatisticas_SO4_por_DC.xlsx', index=False)
print("Análise de Sulfatos concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

E.3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA

Para a Distância da orla marinha ($d_{orla,[Cl^-]}$), a análise descritiva espacializada foi desenvolvida em caráter exploratório, com foco na caracterização da exposição territorial de cada DC. Para cada um, foram calculadas as porcentagens de sua área total enquadradas nas diferentes faixas de distância da orla. Esse procedimento permitiu quantificar a litoralidade relativa de cada domínio e documentar uma etapa de processamento espacial posteriormente excluída da composição final dos perfis geográficos, permanecendo neste Apêndice por rigor científico, transparência metodológica e reprodutibilidade computacional.

O Código 14 apresenta a rotina computacional desenvolvida para automatizar essa classificação espacial exploratória, a partir da quantificação das faixas de distância da orla ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$) em cada DC. Embora essa rotina tenha sido efetivamente processada durante a pesquisa, seus resultados não integram os produtos da dissertação.

Código 14 – Rotina *Python* para quantificação espacial das faixas de distância da orla marinha por DC

```
import geopandas as gpd
import pandas as pd
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

# 1. Configuração
input_shp_path = "Faixas_Dominio.shp"
output_excel = 'Classificacao_Risco_Dorla_FINAL.xlsx'
output_shp = 'Dominios_Risco_Dorla_FINAL.shp'

# Mapeamento de Risco Base (Faixa -> Risco)
RISCO_BASE = {
    '00 - 01 km': 'Vermelha',
    '01 - 03 km': 'Laranja',
    '03 - 05 km': 'Laranja',
    '05 - 10 km': 'Amarela',
    '10 - 20 km': 'Amarela',
    '20 - 50 km': 'Verde',
    '> 50 km':    'Verde'
}
CODIGO_RISCO = {'Vermelha': 4, 'Laranja': 3, 'Amarela': 2, 'Verde': 1}

# 2. Cálculo de Áreas
gdf = gpd.read_file(input_shp_path)
# Conversão para projeção métrica (SIRGAS 2000 Brazil Polyconic) para cálculo de área
gdf_area = gdf.to_crs(epsg=5880)
gdf_area['area_km2'] = gdf_area.geometry.area / 1e6
gdf_area['Risco_Base'] = gdf_area['faixa_dist'].map(RISCO_BASE)

# 3. Aplicação dos Gatilhos (Calibração MAUP)
resultados = []
dominios_unicos = gdf_area['Dominio'].unique()

for dc in sorted(dominios_unicos):
    dados_dc = gdf_area[gdf_area['Dominio'] == dc]
    area_total = dados_dc['area_km2'].sum()

    # Área na faixa crítica (Vermelha: 0-1 km)
    area_Vermelha = dados_dc[dados_dc['Risco_Base'] == 'Vermelha']['area_km2'].sum()
    pct_Vermelha = (area_Vermelha / area_total) * 100

    # Lógica dos Gatilhos
    if pct_Vermelha >= 0.1:
        classificacao = "Vermelha" # Gatilho de Criticidade
    elif pct_Vermelha > 0.0:
        classificacao = "Laranja"  # Gatilho de Interface Costeira
    else:
        classificacao = "Verde"    # Interior Puro

    resultados.append({
        'Dominio': dc,
        'Risco_Final': classificacao,
        'Cod_Risco': CODIGO_RISCO[classificacao],
        'Pct_Area_Critica': pct_Vermelha
    })

# 4. Exportação
df_res = pd.DataFrame(resultados)
gdf_final = gdf.dissolve(by='Dominio', as_index=False).merge(df_res, on='Dominio')
gdf_final.to_file(output_shp)
df_res.to_excel(output_excel, index=False)

print("Classificação de Risco Costeiro concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 40 apresenta as estatísticas descritivas da deposição de $[Cl^-]$ por faixa de distância da orla marinha $\Delta d_{orla,[Cl^-]}$ ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$ – complementa e auxilia na compreensão de $d_{orla,[Cl^-]}$, não sendo tratado como uma variável isolada).

Quadro 40 – Estatísticas descritivas das variáveis-amostras do Brasil para [Cl^-] por faixa de distância da orla marinha ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$)

Faixa de distância da orla marítima ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$, em km)	**Unidade de [Cl^-]**	**Nº de Válidos**	**Média**	**Mediana**	**Desvio padrão**	**Mínimo**	**Máximo**	**Amplitude [(VIII) - (VII)]**	**P25**	**P75**	**P90**	**P95**	**P99**	**CV (%)**
(I)	**(II)**	**(III)**	**(IV)**	**(V)**	**(VI)**	**(VII)**	**(VIII)**	**(IX)**	**(X)**	**(XI)**	**(XII)**	**(XIII)**	**(XIV)**	**(XV)**
0 - 1	mg/m²/dia	3	38,2	48,2	17,8	17,7	48,8	31,0	33,0	48,5	48,7	48,7	48,8	46,44
1 - 3	mg/m²/dia	1	45,6	45,6	-	45,6	45,6	0,0	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	-
3 - 5	mg/m²/dia	7	33,8	29,5	12,5	18,9	55,3	36,4	26,1	40,3	47,8	51,6	54,5	36,86
5 - 10	mg/m²/dia	5	40,4	40,6	8,6	30,3	50,9	20,6	33,7	46,6	49,2	50,1	50,8	21,26
10 - 20	mg/m²/dia	24	27,7	28,5	11,5	10,7	48,0	37,3	16,6	38,2	41,5	43,6	47,1	41,71
20 - 50	mg/m²/dia	62	24,5	25,0	10,6	6,9	53,3	46,4	14,7	30,5	36,8	42,5	50,2	43,24
$d_{orla,[Cl^-]} > 50$	mg/m²/dia	2167	3,3	1,8	4,4	0,3	50,3	50,0	1,0	3,7	7,6	11,9	22,8	132,42

Notas:

1. Os dados das colunas de (II) a (XV) se referem a [Cl^-] na $\Delta d_{orla,[Cl^-]}$ da coluna (I). Portanto, exemplifica-se a interpretação das informações com o seguinte: a coluna (IV) indica a Média de [Cl^-] na $\Delta d_{orla,[Cl^-]}$ da coluna (I) e não Média de $\Delta d_{orla,[Cl^-]}$ da coluna (I).
2. Os dados das colunas de (IV) a (XIV) possuem a unidade da coluna (II). As unidades dos dados de (I) e (XV) estão indicados nas respectivas colunas. Os dados das demais colunas são adimensionais ou não se aplicam qualquer unidade de medida.
3. Os dados das colunas (X) a (XIV) são os percentis, onde P25 indica o 25º percentil, P75 indica o 75º percentil e assim por diante.

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE F – Rotinas em *Python* para processamento espacial e geração cartográfica

- NOTA DE ESCLARECIMENTO METODOLÓGICO: as rotinas referentes à distância da orla marinha ($d_{orla,[Cl^-]}$) apresentadas neste Apêndice correspondem a etapas exploratórias de processamento espacial e representação cartográfica desenvolvidas durante a pesquisa. Contudo, em alinhamento com o refinamento metodológico e para evitar o mascaramento de escala na avaliação macroclimática, essa variável foi suprimida da composição final dos perfis geográficos. O registro de seu processamento é mantido neste documento exclusivamente por rigor científico, reprodutibilidade computacional e transparência metodológica.

Este Apêndice documenta os códigos-fonte desenvolvidos em linguagem *Python* para a automação do processamento espacial e da representação cartográfica da pesquisa. A utilização de rotinas programadas garante a reprodutibilidade do método, a precisão geométrica das operações espaciais e a padronização visual dos mapas temáticos coropléticos em alta resolução (600 dpi). As rotinas utilizam, primariamente, as bibliotecas *GeoPandas* para manipulação de dados geoespaciais e *Matplotlib* para a plotagem gráfica.

F.1 GERAÇÃO VETORIAL DAS FAIXAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($d_{orla,[Cl^-]}$)

A subvariável distância da orla marinha ($d_{orla,[Cl^-]}$) foi processada, em caráter exploratório, por meio de um procedimento de análise de proximidade vetorial em linguagem *Python*. O objetivo foi quantificar a exposição territorial à influência direta do ambiente marinho e gerar a base geométrica necessária para análises espaciais complementares envolvendo a deposição de cloretos em direção ao interior do continente.

Para garantir a precisão matemática e a reprodutibilidade da análise, o processamento geométrico da base territorial foi automatizado (Código 15). A partir da interseção espacial entre a malha de unidades federativas (IBGE, 2024) e o sistema costeiro-marinho (IBGE, 2019), a linha de costa brasileira é isolada. A

geometria é então reprojetada para um sistema de coordenadas métricas (Projeção Policônica, EPSG:5880) para a geração exata de polígonos de contorno (*buffers*) correspondentes às faixas de distância euclidiana: 0-1 km, 1-3 km, 3-5 km, 5-10 km, 10-20 km, 20-50 km e >50 km. O produto desta etapa é o arquivo vetorial `Faixas_Distancia.shp`.

Código 15 – Geração vetorial das faixas de distância da orla marinha (*buffers*)

```
import geopandas as gpd
from tqdm import tqdm
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

# 1. Configuração
terra_shp_path = "BR_UF_2023.shp"
mar_shp_path = "Sistema_Costeiro_Marinho.shp"
PROJ_METRICA_EPSG = 5880
FAIXAS_DISTANCIA_KM = [(0, 1), (1, 3), (3, 5), (5, 10), (10, 20), (20, 50)]
output_shapefile = 'Faixas_Distancia.shp'

print("Iniciando processamento vetorial das faixas de distância...")

# 2. Isolamento da Linha de Costa
print("Carregando shapefiles e isolando a linha da costa...")
gdf_terra = gpd.read_file(terra_shp_path).dissolve()
gdf_mar = gpd.read_file(mar_shp_path).to_crs(gdf_terra.crs).dissolve()
coastline = gdf_terra.boundary.iloc[0].intersection(gdf_mar.geometry.iloc[0])

# 3. Reprojeção para Sistema Métrico (EPSG:5880)
print("Reprojetando geometrias para o sistema métrico (EPSG:5880)...")
coastline_proj = gpd.GeoDataFrame([{'geometry': coastline}], crs=gdf_terra.crs).to_crs(epsg=PROJ_METRICA_EPSG).geometry.iloc[0]
br_proj = gdf_terra.to_crs(epsg=PROJ_METRICA_EPSG).geometry.iloc[0]

# 4. Geração dos Buffers e Faixas
faixas = []
for d_min, d_max in tqdm(FAIXAS_DISTANCIA_KM, desc="Gerando faixas de distância"):
    buffer_externo = coastline_proj.buffer(d_max * 1000)
    buffer_interno = coastline_proj.buffer(d_min * 1000)
    faixa = buffer_externo.difference(buffer_interno)
    faixa_terr = faixa.intersection(br_proj)

    if not faixa_terr.is_empty:
        faixas.append({'faixa_dist': f"{d_min:02d} - {d_max:02d} km", 'geometry': faixa_terr})

# 5. Faixa > 50 km e Exportação
print("Processando faixa > 50 km e exportando shapefile final...")
faixa_50 = br_proj.difference(coastline_proj.buffer(50000))
if not faixa_50.is_empty:
    faixas.append({'faixa_dist': '> 50 km', 'geometry': faixa_50})

gdf_faixas = gpd.GeoDataFrame(faixas, crs=f"EPSG:{PROJ_METRICA_EPSG}")
gdf_faixas.to_crs(epsg=4326).to_file(output_shapefile)
print(f"Shapefile '{output_shapefile}' gerado com sucesso.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O arquivo vetorial resultante (`Faixas_Distancia.shp`) atua como máscara de interseção espacial (`Spatial Join` [30]) para a extração e sumarização dos dados matriciais do satélite *MERRA-2* (*GMAO*, 2015). Os detalhes computacionais da etapa subsequente de análise espacial exploratória encontram-se descritos na seção “F.2

[30] `Spatial Join`: operação de geoprocessamento que combina atributos de duas camadas vetoriais com base na relação espacial entre suas feições, transferindo campos da tabela de atributos de uma camada (*join features*) para a tabela de outra camada (target features) segundo critérios de localização (interseção, contenção, proximidade etc.), gerando uma nova camada com geometria preservada da camada alvo e atributos integrados (Esri, 2025c).

ANÁLISE ESPACIAL EXPLORATÓRIA DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS POR FAIXAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$)" deste Apêndice.

Adicionalmente, para a caracterização regional, a variável $d_{orla,[Cl^-]}$ foi processada em uma abordagem complementar. Para cada DC, calculou-se a porcentagem de sua área total enquadrada em cada faixa de distância da orla. Esse processamento permitiu caracterizar a exposição territorial relativa de cada domínio, permanecendo neste apêndice como registro exploratório desenvolvido durante a pesquisa.

Ressalta-se uma limitação inerente à escala de análise: embora a geometria vetorial permita a discretização em faixas de distância refinadas (por exemplo, 0-1 km, 1-3 km), a variável de deposição de cloretos proveniente do produto *MERRA-2* (*GMAO*, 2015) possui uma resolução espacial nativa de 0,5° × 0,625° (aproximadamente 55 km × 69 km no equador). Esta resolução impede uma discretização precisa de faixas inferiores a 5 km para a variável de deposição, pois a incerteza de interpolação excederia a variabilidade do fenômeno. Assim, a faixa de 0-5 km representa a zona de influência costeira direta resolúvel pelo modelo para a deposição de cloretos, enquanto a geometria vetorial de $d_{orla,[Cl^-]}$ permite uma análise mais granular da exposição territorial.

F.2 ANÁLISE ESPACIAL EXPLORATÓRIA DA DEPOSIÇÃO DE CLORETOS POR FAIXAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($\Delta d_{orla,[Cl^-]}$)

Para a subvariável de deposição de cloretos em função da distância da orla marinha ($d_{orla,[Cl^-]}$), desenvolveu-se um algoritmo específico de análise espacial vetorial, mantido em caráter exploratório. Diferentemente da abordagem matricial global, este procedimento utiliza um arquivo *shapefile* contendo as faixas de distância pré-calculadas (*buffers*) para realizar uma operação de `Spatial Join` (junção espacial) com a grade de *pixels* do MERRA-2 (*GMAO*, 2015). O Código 16 apresenta a rotina que itera sobre cada polígono de distância, identifica os pixels correspondentes e calcula as estatísticas descritivas localizadas.

Código 16 – Rotina *Python* para análise espacial exploratória de cloretos por faixas de distância da orla marinha

```
import xarray as xr
import numpy as np
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from pathlib import Path
from tqdm import tqdm
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

# 1. Configuração
data_dir = Path("dados_merra2_cloretos")
faixas_shp_path = "Faixas_Distancia.shp"
FATOR_CONVERSAO = 8.64e10 # kg/m²/s -> mg/m²/dia
CL_VARS = ['SSSD001', 'SSSD002', 'SSSD003', 'SSSD004', 'SSSD005']

# 2. Processamento NetCDF (Soma e Média Temporal)
nc_files = sorted(list(data_dir.glob("*.nc4")))
with xr.open_dataset(nc_files[0]) as ds:
    lats, lons = ds.lat.values, ds.lon.values
    cl_sum = np.zeros((len(lats), len(lons)))
    cl_count = np.zeros((len(lats), len(lons)), dtype=int)

for nc_file in tqdm(nc_files, desc="Lendo NetCDF"):
    with xr.open_dataset(nc_file) as ds:
        # Soma das 5 componentes de deposição
        total_dep = sum(ds[var].values.squeeze() for var in CL_VARS)
        valid = (total_dep >= 0) & (~np.isnan(total_dep))
        cl_sum += np.where(valid, total_dep, 0)
        cl_count += valid.astype(int)

# Cálculo da média e conversão de unidade
cl_mean = np.divide(cl_sum, cl_count, where=cl_count > 0)
cl_mean_mg = cl_mean * FATOR_CONVERSAO

# 3. Preparação Geoespacial (Grid de Pontos)
# Recorte para Bounding Box do Brasil
lat_mask = (lats >= -35) & (lats <= 5)
lon_mask = (lons >= -75) & (lons <= -30)
cl_crop = cl_mean_mg[np.ix_(lat_mask, lon_mask)]
lats_c, lons_c = lats[lat_mask], lons[lon_mask]

# Criação de GeoDataFrame com centroides dos pixels
pixels_data = []
for i, lat in enumerate(lats_c):
    for j, lon in enumerate(lons_c):
        if not np.isnan(cl_crop[i, j]):
            pixels_data.append({'geometry': Point(lon, lat), 'val': cl_crop[i, j]})

gdf_pixels = gpd.GeoDataFrame(pixels_data, crs='EPSG:4326')

# 4. Análise por Faixa de Distância (Spatial Join)
gdf_faixas = gpd.read_file(faixas_shp_path).to_crs('EPSG:4326')
stats_list = []

for idx, row in gdf_faixas.iterrows():
    # Cria GDF temporário da faixa atual
    gdf_faixa_atual = gpd.GeoDataFrame([row], crs=gdf_pixels.crs)

    # Interseção espacial: Pixels DENTRO da Faixa
    pixels_in = gpd.sjoin(gdf_pixels, gdf_faixa_atual, predicate='intersects')

    if not pixels_in.empty:
        vals = pixels_in['val'].values
        stats = {
            'Faixa': row['faixa_dist'],
            'N_Pixels': len(vals),
            'Média': np.mean(vals),
            'Mediana': np.median(vals),
            'Desvio': np.std(vals, ddof=1),
            'P25': np.percentile(vals, 25),
            'P75': np.percentile(vals, 75),
            'P95': np.percentile(vals, 95)
        }
        stats_list.append(stats)

# 5. Exportação
df_stats = pd.DataFrame(stats_list)
df_stats.to_excel('Estatisticas_Cl_Distancia.xlsx', index=False)
print("Análise por distância concluída.")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

F.3 GERAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS (PERFIS GEOGRÁFICOS)

O Código 17 apresenta a rotina responsável pela espacialização dos perfis geográficos das variáveis termodinâmicas e químicas. O algoritmo realiza a união relacional (*Attribute Join*) entre a matriz de resultados tabulares e a malha vetorial dos Domínios Climáticos, gerando os cartogramas individuais.

Código 17 – Rotina *Python* para geração dos mapas temáticos (perfis geográficos)

```
import geopandas as gpd, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as mpatches
from pathlib import Path
import warnings; warnings.filterwarnings('ignore')

# Caminhos e configuração
SHP_DOM = r"C:\Users\thale\OneDrive\Documentos\DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PROAC\0. DADOS\Shape
files\Classificacao_tipo_climatico\Classificacao_tipo_climatico.shp"
SHP_FUNDO = r"C:\Users\thale\OneDrive\Documentos\DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PROAC\0. DADOS\Shape
files\10m_cultural\10m_cultural\ne_10m_admin_0_map_units.shp"
SHP_UF = r"C:\Users\thale\OneDrive\Documentos\DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PROAC\0. DADOS\Shape files\BR_UF_2023\BR_UF_2023.shp"
EXCEL = "Matriz_Risco.xlsx"
COL_DOM = "Dominio"

VARS = ['T', 'ΔT', 'UR', 'iprec', '[CO2]', '[Cl-]', '[NOx]', '[SOx]', '[SO42-]']
TITULOS = {'T':'T','ΔT':r'$\Delta$T','UR':'UR','iprec':r'$i_{prec}$','[CO2]':r'[CO$_2$]',
           '[NOx]':'[NOx]','[SOx]':'[SOx]','[SO42-]':r'[SO$_4^{2-}$]','[Cl-]':r'[Cl$^-$]'}
CORES = {'Verde':'#00B050','Amarela':'#FFC000','Vermelha':'#FF0000'}
NORM = {'Laranja':'Amarela','Amarelo':'Amarela','Vermelho':'Vermelha'}

def escala(ax, b):
    x, y, t = b[0]+2.0, b[1]+2.0, 9.34
    ax.plot([x,x+t],[y,y],color='black',lw=1.5)
    for p in (x, x+t/2, x+t):
        ax.plot([p,p],[y,y+0.5],color='black',lw=1.5)
    for lbl, p in (('0',x),('500',x+t/2),('1000 km',x+t)):
        ax.text(p,y+0.8,lbl,ha='center',va='bottom',fontsize=9,fontweight='bold',color='#333333')

print("Carregando bases...")
gdf_dom = gpd.read_file(SHP_DOM)
gdf_fundo = gpd.read_file(SHP_FUNDO)
gdf_uf = gpd.read_file(SHP_UF)
df = pd.read_excel(EXCEL)

gdf_dom[COL_DOM] = gdf_dom[COL_DOM].replace('Subtropical Frio','Temperado')
gdf_dom = gdf_dom.dissolve(by=COL_DOM).reset_index()
gdf = gdf_dom.merge(df, on=COL_DOM, how='left')
for v in VARS:
    if v in gdf.columns:
        gdf[v] = gdf[v].replace(NORM)

out = Path("Mapas_Finais"); out.mkdir(exist_ok=True)

# Exporta shapefile consolidado
cols = [COL_DOM] + [v for v in VARS if v in gdf.columns] + ['geometry']
gdf[cols].rename(columns={'ΔT':'DeltaT','[CO2]':'CO2','[NOx]':'NOx','[SOx]':'SOx',
                          '[SO42-]':'SO4','[Cl-]':'Cl'}).to_file(out/"Dominios_Perfis_Geograficos.shp", encoding='utf-8')

# Gera mapas
for v in VARS:
    if v not in gdf.columns:
        print(f"AVISO: '{v}' não encontrada. Pulando."); continue
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10,10), dpi=600)
    gdf_fundo.plot(ax=ax, color='#E0E0E0', edgecolor='white', lw=0.5)
    for classe, cor in CORES.items():
        sub = gdf[gdf[v]==classe]
        if not sub.empty:
            sub.plot(ax=ax, color=cor, edgecolor='#333333', lw=0.05)
    gdf_uf.boundary.plot(ax=ax, color='white', lw=0.4, alpha=0.7)
    ax.set_axis_off()
    b = gdf.total_bounds
    ax.set_xlim([b[0]-2, b[2]+2]); ax.set_ylim([b[1]-2, b[3]+2])
    ax.annotate('N', xy=(b[2]+0.5, b[3]-1.0), xytext=(b[2]+0.5, b[3]-3.0),
                arrowprops=dict(facecolor='black', width=2, headwidth=8, headlength=10),
                ha='center', va='center', fontsize=14, fontweight='bold')
    escala(ax, b)
    ax.legend(handles=[mpatches.Patch(color=cor, label=f"Classe {c}") for c,cor in CORES.items()],
              loc='lower right', title="Classe interpretativa", frameon=True, fontsize=12, title_fontsize=13)
    nome = v.replace('[','').replace(']','').replace('Δ','Delta')
    plt.savefig(out/f"Mapa_Perfil_{nome}_SemTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
    ax.set_title(f"Perfil geográfico de {TITULOS.get(v,v)}", fontsize=16, fontweight='bold', pad=15)
    plt.savefig(out/f"Mapa_Perfil_{nome}_ComTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
    plt.close()

print("✅ Mapas dos perfis geográficos gerados em 600 DPI!")
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

F.4 GERAÇÃO EXPLORATÓRIA DOS MAPAS DE DISTÂNCIA DA ORLA MARINHA ($d_{orla,[Cl^-]}$)

O Código 18 detalha o algoritmo desenvolvido para a espacialização exploratória da distância da orla marinha. A rotina isola a linha de costa brasileira, gera os polígonos de contorno (*buffers*) para as faixas de distância e produz a representação cartográfica da exposição territorial associada à interface costeira. Embora essa rotina tenha sido efetivamente desenvolvida e processada durante a pesquisa, seus produtos não integram o conjunto final de mapas da dissertação.

Código 18 – Rotina *Python* para geração exploratória dos mapas de distância da orla marinha

```
import geopandas as gpd, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt, matplotlib.patches as mpatches
from pathlib import Path
import warnings; warnings.filterwarnings('ignore')

out_dir = Path("Mapas_Finais"); out_dir.mkdir(exist_ok=True)

# 1. DICIONÁRIOS E CONFIGURAÇÕES
c_faixas = {'00 - 01 km':'#FF0000', '01 - 03 km':'#ED7D31', '03 - 05 km':'#ED7D31', '05 - 10 km':'#FFC000', '10 - 20 km':'#FFC000', '20 - 50 km':'#00B050', '>
50 km':'#00B050'}
t_leg = {'00 - 01 km':'00 - 01 km (Vermelha)', '01 - 03 km':'01 - 03 km (Laranja)', '03 - 05 km':'03 - 05 km (Laranja)', '05 - 10 km':'05 - 10 km (Amarela)',
'10 - 20 km':'10 - 20 km (Amarela)', '20 - 50 km':'20 - 50 km (Verde)', '> 50 km':'> 50 km (Verde)'}
r_final = {'Árido':'Verde', 'Equatorial':'Laranja', 'Equatorial Ameno':'Verde', 'Semiárido':'Laranja', 'Subtropical':'Vermelha', 'Temperado':'Verde',
'Tropical':'Vermelha', 'Tropical Ameno':'Vermelha'}
c_risco = {'Verde':'#00B050', 'Amarela':'#FFC000', 'Laranja':'#ED7D31', 'Vermelha':'#FF0000'}

# 2. CARREGAMENTO ESPACIAL
gdf_dom = gpd.read_file("dados/Classificacao_tipo_climatico.shp")
gdf_dom['Dominio'] = gdf_dom['Dominio'].replace('Subtropical Frio', 'Temperado')
gdf_dom = gdf_dom.dissolve(by='Dominio').reset_index()
gdf_fundo, gdf_est = gpd.read_file("dados/ne_10m_admin_0_map_units.shp"), gpd.read_file("dados/BR_UF_2023.shp")
gdf_faixas, gdf_off = gpd.read_file("dados/Faixas_Dominio.shp"), gpd.read_file("dados/Sistema_Costeiro_Marinho.shp")

b_br, b_nne, b_ls = gdf_dom.total_bounds, [-52.0, -10.0, -34.0, 6.0], [-54.0, -34.0, -38.0, -10.0]

# FUNÇÃO DA ESCALA GRÁFICA ADAPTATIVA
def add_escala(ax, b):
    w, h = b[2]-b[0], b[3]-b[1]
    tam, lbls = (4.67, ['0','250','500 km']) if w < 25 else (9.34, ['0','500','1000 km'])
    x, y, ht, ot = b[0]+w*0.05, b[1]+h*0.05, h*0.015, h*0.025
    ax.plot([x, x+tam], [y, y], color='black', lw=1.5)
    for dx, txt in zip([0, tam/2, tam], lbls):
        ax.plot([x+dx, x+dx], [y, y+ht], color='black', lw=1.5)
        ax.text(x+dx, y+ot, txt, ha='center', va='bottom', fontsize=9, weight='bold')

# 3. FUNÇÃO GERADORA DE MAPAS
def gerar_mapa(tipo, nome, bnds, com_dom, sub="", loc='lower right', p_norte='upper right'):
    fig, ax = plt.subplots(1, 1, figsize=(10, 10), dpi=600)
    gdf_fundo.plot(ax=ax, color='#E0E0E0', edgecolor='white', lw=0.5)
    gdf_est.boundary.plot(ax=ax, color='white', lw=0.4, alpha=0.7)
    ax.set_axis_off(); ax.set_xlim([bnds[0]-2, bnds[2]+2]); ax.set_ylim([bnds[1]-2, bnds[3]+2])

    xn = bnds[2]+0.5 if p_norte == 'upper right' else bnds[0]-0.5
    ax.annotate('N', xy=(xn, bnds[3]-1), xytext=(xn, bnds[3]-3), arrowprops=dict(fc='black', width=2, headwidth=8), ha='center', va='center', fontsize=14,
fontweight='bold')

    add_escala(ax, bnds) # Chamada da escala adaptativa

    gdf_off.plot(ax=ax, fc='none', ec='#FF0000', hatch='///', lw=0.5)
    for f in list(c_faixas.keys())[::-1]:
        sub_f = gdf_faixas[gdf_faixas['faixa_dist'] == f]
        if not sub_f.empty: sub_f.plot(ax=ax, color=c_faixas[f], ec='none')
    if com_dom: gdf_dom.boundary.plot(ax=ax, color='#333333', lw=0.05)

    legs = [mpatches.Patch(fc='none', ec='#FF0000', hatch='///', label='< 0 km Offshore (Vermelha)')] + [mpatches.Patch(color=c, label=t_leg[f]) for f, c in
c_faixas.items()]
    ax.legend(handles=legs, loc=loc, title="Distância da Orla", frameon=True, fontsize=10)

    plt.savefig(out_dir / f"Mapa_Orla_{tipo}_{nome}_SemTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
    ax.set_title(r"Risco de Deterioração - Variável: $d_{orla,[Cl^-]}$" + (f"\n({sub})" if sub else ""), fontsize=16, fontweight='bold', pad=15)
    plt.savefig(out_dir / f"Mapa_Orla_{tipo}_{nome}_ComTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
    plt.close()

# 4. EXECUÇÃO EM LOTE (MAPAS 1 E 2)
configs = [
    ("1", "Fisico_Nacional", b_br, False, "", 'lower right', 'upper right'),
    ("1.1", "Fisico_Recorte_NNE", b_nne, False, "Detalhe N/NE", 'upper right', 'upper left'),
    ("1.2", "Fisico_Recorte_LS", b_ls, False, "Detalhe Leste/Sul", 'lower right', 'upper right'),
    ("2", "Intersecao_Nacional", b_br, True, "", 'lower right', 'upper right'),
    ("2.1", "Intersecao_Recorte_NNE", b_nne, True, "Detalhe N/NE", 'upper right', 'upper left'),
    ("2.2", "Intersecao_Recorte_LS", b_ls, True, "Detalhe Leste/Sul", 'lower right', 'upper right')
]
for cfg in configs: gerar_mapa(*cfg)

# 5. MAPA 3 (CONSOLIDADO) E EXPORTAÇÃO SHP
fig, ax = plt.subplots(1, 1, figsize=(10, 10), dpi=600)
gdf_fundo.plot(ax=ax, color='#E0E0E0', ec='white', lw=0.5); gdf_est.boundary.plot(ax=ax, color='white', lw=0.4, alpha=0.7)
ax.set_axis_off(); ax.set_xlim([b_br[0]-2, b_br[2]+2]); ax.set_ylim([b_br[1]-2, b_br[3]+2])
ax.annotate('N', xy=(b_br[2]+0.5, b_br[3]-1), xytext=(b_br[2]+0.5, b_br[3]-3), arrowprops=dict(fc='black', width=2, headwidth=8), ha='center', va='center',
fontsize=14, fontweight='bold')

add_escala(ax, b_br) # Chamada da escala no mapa consolidado

gdf_dom['Risco'] = gdf_dom['Dominio'].map(r_final)
gdf_dom.plot(ax=ax, color=gdf_dom['Risco'].map(c_risco), ec='#333333', lw=0.05)
ax.legend(handles=[mpatches.Patch(color=c, label=f"Risco {n}") for n, c in c_risco.items()], loc='lower right', title="Risco Final", frameon=True)

plt.savefig(out_dir / "Mapa_Orla_3_Final_SemTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
ax.set_title(r"Risco Consolidado - Variável: $d_{orla,[Cl^-]}$", fontsize=16, fontweight='bold', pad=15)
plt.savefig(out_dir / "Mapa_Orla_3_Final_ComTitulo.png", bbox_inches='tight', pad_inches=0.1)
plt.close()

gdf_dom[['Dominio', 'Risco', 'geometry']].to_file(out_dir / "Dominios_Risco_Orla_Final.shp", encoding='utf-8')
```

Fonte: Elaborado pelo autor.