



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO

GESTÃO INTEGRADA DE INFRAESTRUTURA CIVIL EM AMBIENTE URBANO:
ÁGUA E TRANSPORTES

FORTALEZA
2019

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO

GESTÃO INTEGRADA DE INFRAESTRUTURA CIVIL EM AMBIENTE URBANO:
ÁGUA E TRANSPORTES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares

FORTALEZA
2019

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

A688g Araújo, Carla Beatriz Costa de.
Gestão Integrada de Infraestrutura Civil em Ambiente Urbano: Água e Transportes / Carla Beatriz Costa de Araújo. – 2019.
235 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho .
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares .

1. Clima. Água. Pavimentos. Modelo Integrado. I. Título.

CDD 627

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO

GESTÃO INTEGRADA DE INFRAESTRUTURA CIVIL EM AMBIENTE URBANO:
ÁGUA E TRANSPORTES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em 20/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A toda minha família, em especial a minha mãe
Sílvia, meu esposo Robson Roger, a minha avó
Socorro e meu avô Pedro (em memória).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu dom da vida, a força e a capacidade para atingir os meus objetivos.

Ao Prof. Assis, que desde o início aceitou me orientar e foi um dos maiores incentivadores e entusiastas da minha caminhada no doutorado. Muito obrigada por sempre acreditar em mim! Obrigada por toda generosidade e pelo compartilhamento de conhecimento!

Ao meu coorientador, Prof. Jorge, que mesmo sem ainda me conhecer, aceitou prontamente desenvolver este trabalho! Muito obrigada, por mesmo em seu tempo corrido e concorrido, sempre estar presente! Obrigada pela receptividade e entusiasmo durante toda a pesquisa!

Com meus orientadores aprendi sobre a “generosidade acadêmica”, os dois não dividem, eles agregam! Não somam forças, eles multiplicam! Não individualizam, eles compartilham! Muito obrigada por tanto me ensinarem!

À minha mãe, Sílvia Costa, que é meu exemplo de força, determinação e dedicação aos estudos, sempre foi minha maior incentivadora e amiga! Nessa vida enfrentamos todas as batalhas sempre juntas! Obrigada por todo amor e dedicação!

Ao meu esposo, Robson Roger, meu melhor amigo e minha base de apoio em todos esses anos de caminhada acadêmica. Nos momentos que eu já não tinha mais forças, ele foi minha energia e minha base de apoio. Muito obrigada por me fazer sorrir até nas horas mais difíceis!

Agradeço ao pai amado e avô adorado, Seu Pedro Rodrigues Costa. O homem mais justo, bom e honrado que conheci. Deus me presenteou com o melhor avô que alguém poderia ter, e agora mesmo não estando mais ao nosso lado, permanece vivo dentro dos corações e nas lembranças.

À minha querida avó, Socorro, por todo amor e dedicação a família; a minha querida Márcia que nos deixou no caminho, mas nos mostrou que sempre há motivos para sorrir em meio as dificuldades e que não há problemas tão grandes na vida que te impeçam de ser feliz; À minha tia Mise Costa, que tem sido um exemplo de força e fé. A todos os meus primos, em especial, Patrícia e Clara, que são mais que primas, são minhas irmãs!

Agradeço a toda minha família que foi tão compreensiva com minha ausência no último ano (o que não é fácil para quem quer estar junto sempre!). Vocês são a base da minha vida!

À Profa. Suelly, que sempre foi tão gentil e atenciosa, desde a época que foi minha professora na graduação. Muito obrigada pelo apoio e generosidade! Mulheres assim tão competentes e dedicadas são exemplos para todas nós!

Ao Prof. Chagas, pelo apoio na minha caminhada acadêmica e no desenvolvimento da pesquisa!

Aos colegas do GRC, por todo auxílio e amizade nos últimos anos! Obrigada por todos momentos divertidos e pelas parcerias nos trabalhos!

Aos Profs. Ticiania Marinho, Carlos Galvão e Juceline Bastos por aceitarem participar da banca e por todas as contribuições no trabalho!

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste sonho, muito obrigada!

“A vida não é fácil para ninguém. Mas... O que importa? É necessário perseverar e, acima de tudo, confiar em nós próprios. Temos de sentir que somos dotados para realizar uma determinada coisa e que temos de a alcançá-la, custe o que custar!”

Marie Curie

RESUMO

O clima e o ciclo da água, nas regiões urbanas, exercem forte poder sobre o desenvolvimento das cidades, inclusive nos projetos de engenharia. No que diz respeito aos projetos de infraestrutura de águas urbanas e transportes, esses têm sido elaborados de forma desassociada, reduzindo a visão de conjunto e interdependências. Por isso, o desenvolvimento de metodologias, como a apresentada neste trabalho, que permitam a gestão integrada nos diferentes subsistemas de infraestrutura civis, é tão significativo. Para a metodologia integrada foram associados os seguintes modelos: modelo climático (clima atual e futuro), modelo hidrológico e hidrodinâmico (infiltração e escoamento), modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado e modelo de rigidez do pavimento. Após a caracterização dos modelos e variáveis de ligação, foi feita a aplicação da proposta para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), diferenciando pavimentos rodoviários e pavimentos urbanos. Nos pavimentos urbanos foram consideradas as estruturas de drenagem urbana e eventos de chuvas intensas, investigando um total de 33 cenários de condições climáticas. Para pavimentos rodoviários, foram estudadas diferentes condições de acostamento (0,0 m; 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m), profundidades de nível d'água (3,0 m; 3,5 m; 4,0 m; 4,5 m), variadas espessuras de revestimentos asfálticos (2,0 cm; 5,0 cm; 10,0 cm) e três períodos chuvosos (acima da média, abaixo da média, média), totalizando 144 cenários. As previsões de mudança climática para o século XXI (2031-2070) na RMF consideraram 5 modelos de mudança do clima baseados nos cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*) 8,5 e 4,5 do CMIP5. Nas modelagens integradas para pavimentos urbanos, mesmo em condições de lâmina d'água sobre o pavimento de até 1,0 m, não ocorreram variações significativas de umidade nas camadas constituintes do pavimento, por isso foram estudados somente os efeitos nas variações de vazões para os cenários de mudança climática, a fim de verificar o desempenho das infraestruturas de drenagem. Nessas condições, os modelos de mudança climática indicam incremento de vazões de até 600%, o que pode levar a ocorrência de mais eventos de alagamentos na região. Para os pavimentos rodoviários, a análise de desempenho apresentou estimativa de vida útil da estrutura de 1,0 a 5,6 anos inferior ao modelo sem considerar a variabilidade climática, indicando que sem a metodologia integrada, o projeto poderia ser subdimensionado. Os modelos de mudança climática apontam que, para RMF, as precipitações médias devem apresentar redução e anos de precipitações acima da média serão menos frequentes. De forma geral, observou-se que a metodologia integrada proporciona ganhos no desenvolvimento de projetos de infraestrutura.

Palavras-chave: Clima. Água. Pavimento. Modelo Integrado.

ABSTRACT

Climate and the water cycle in urban regions have strong power over the development of cities, including engineering projects. With regard to urban water and transport infrastructure projects, these have been disassociated, reducing the overall vision and interdependencies. Therefore, the development of methodologies, as presented here, to enable the integrated management in the various civil infrastructure subsystems, is so significant. For the integrated methodology, the following models were associated: climate model (current and future climate), hydrological and hydrodynamic model (infiltration and runoff), transient flow model in unsaturated porous environment and pavement stiffness model. After the characterization of the models and connection variables, the proposal was made for the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF), differentiating road pavements and urban pavements. In urban pavements, urban drainage structures and heavy rain events were considered, investigating a total of 33 scenarios of climatic conditions. For road pavements, different shoulder conditions (0.0 m; 0.5 m; 1.0 m; 1.5 m), water level depths (3.0 m; 3.5 m; 4.0 m; 4.5 m) were studied, varying thickness of asphalt surface course (2.0 cm; 5.0 cm; 10.0 cm) and three rainy periods (above average, below average, average), composing 144 scenarios. The 21st century climate change forecasts (2031-2070) in the RMF considered 5 climate change models based on the CMIP5 Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios 8.5 and 4.5. In integrated modeling for urban pavements, even under water depth conditions up to 1.0 m, there were no significant variations of moisture in the constituent layers of the pavement, so only the effects on flow variations for the pavements were studied climate change scenarios in order to verify the performance of drainage infrastructures. Under these conditions, climate change models indicate an increase in flows of up to 600%, which may lead to more flooding events in the region. For road pavements, the performance analysis presented an estimated 1.0 to 5.6 years lower service life than the model without considering climate variability, indicating that without the integrated methodology, the project could be undersigned. The climate change models indicate that for RMF, the average rainfall should have reduced and years of above average rainfall will be less frequent. In general, it was observed that the integrated methodology provides gains in the development of infrastructure projects.

Keywords: Climate. Water. Pavements. Integrated model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Climatologia da precipitação anual da Região Nordeste do Brasil.....	26
Figura 2.2	– Ilustração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em sua posição nos meses de janeiro e julho do ano 2000.....	27
Figura 2.3	– Mudança na precipitação média (%) com relação aos cenários RCP.....	30
Figura 2.4	– CMIP e organizações estabelecidas para coordenar atividades de pesquisa climática internacionalmente com o IPCC, os centros de modelagem e a comunidade de pesquisa climática.....	31
Figura 2.5	– Curvas Típicas de Retenção para Diferentes Tipos de Solos.....	35
Figura 2.6	– Curva Típica de Retenção: Solo Siltoso.....	35
Figura 2.7	– Curvas Típicas de Condutividade Hidráulica para Diferentes Tipos de Solos.....	36
Figura 2.8	– Subdivisões da zona de solo não saturado (zona vadosa).....	37
Figura 2.9	– Perfil de sucção mátrica e teor de umidade volumétrica para diferentes condições.....	38
Figura 2.10	– Volume de Controle.....	38
Figura 2.11	– Tensões aplicadas e deformações no ensaio de carga repetida.....	41
Figura 2.12	– Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos.....	42
Figura 2.13	– Fluxograma básico de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos.....	43
Figura 2.14	– Malha para obtenção da média de dano no CAP3D-D.....	46
Figura 2.15	– Comparativo entre a Função de Transferência de Nascimento (2015) e Fritzen (2016).....	46
Figura 3.1	– Região Metropolitana de Fortaleza.....	50
Figura 3.2	– Densidade Demográfica RMF.....	51
Figura 3.3	– Manchas Urbanas e Rodovias.....	52
Figura 3.4	– Clima Região Metropolitana de Fortaleza.....	53
Figura 3.5	– Bacias Hidrográficas Região Metropolitana de Fortaleza.....	54
Figura 3.6	– Mapa da Classificação AASHTO em Grupos da RMF.....	55
Figura 3.7	– Mapa de Materiais Geotécnicos da RMF.....	55
Figura 3.8	– Distribuição dos Sistemas de Aquíferos da RMF.....	56

Figura 3.9 – Alagamentos na cidade de Fortaleza (a) Bairros Centro/Aldeota (b) Bairro Rodolfo Teófilo (c) Bairro Parangaba (d) Bairro Damas.....	57
Figura 3.10 – Bacias Hidrográficas da Cidade de Fortaleza.....	58
Figura 3.11 – Principais Pontos de Alagamento na Cidade de Fortaleza.....	59
Figura 4.1 – Estratégia Geral.....	61
Figura 4.2 – Esquema metodológico para o projeto integrado de pavimentos rodoviários.....	63
Figura 4.3 – Esquema metodológico para o projeto integrado de pavimentos urbanos.....	63
Figura 4.4 – Série Histórica de Precipitações Posto Pluviométrico do Pici.....	65
Figura 4.5 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 1994.....	65
Figura 4.6 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 2013.....	66
Figura 4.7 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 2018.....	66
Figura 4.8 – Correção de Viés: Função Gama.....	67
Figura 4.9 – Modelo de escoamento superficial e infiltração do pavimento.....	70
Figura 4.10 – Geometria estudada (largura do pavimento).....	70
Figura 4.11 – Condições de Acostamento de Rodovias da RMF.....	71
Figura 4.12 – Condições de Acostamento de Rodovias da RMF.....	71
Figura 4.13 – Trecho Modelado no Bairro Damas, Fortaleza/CE.....	72
Figura 4.14 – Estrutura do modelo hidrológico e hidrodinâmico.....	73
Figura 4.15 – Hietograma Equação AUMEF: TR 25 anos.....	74
Figura 4.16 – Onda Cinemática: Software SWMM.....	75
Figura 4.17 – Bacia no Bairro Damas (Fortaleza, CE) – SWMM.....	76
Figura 4.18 – Malha de elementos finitos utilizada na modelagem de fluxo – Software Slide....	77
Figura 4.19 – Curvas Granulométricas dos Solos do Pavimento.....	78
Figura 4.20 – Curva de Retenção Subleito.....	81
Figura 4.21 – Curva de Retenção Sub-base.....	82
Figura 4.22 – Curva de Retenção Base.....	82
Figura 4.23 – Curva Saturação x Sucção Mátrica.....	83
Figura 4.24 – Curva de Condutividade Hidráulica Subleito.....	84
Figura 4.25 – Curva de Condutividade Hidráulica Sub-base.....	84
Figura 4.26 – Curva de Condutividade Hidráulica Base.....	85
Figura 4.27 – Geometria estudada (espessura das camadas) – Dimensões em metros.....	85
Figura 4.28 – Profundidade do Nível Freático.....	86
Figura 4.29 – Condição Inicial.....	87

Figura 4.30 – Função vertical “ <i>infiltration with time</i> ”.....	87
Figura 4.31 – Função “ <i>preassure head with time</i> ”.....	88
Figura 4.32 – Software CAP3D-D.....	91
Figura 5.1 – Infiltração para o Ano com Precipitações Acima da Média: 1994.....	95
Figura 5.2 – Infiltração para o Ano com Precipitações Abaixo da Média: 2013.....	95
Figura 5.3 – Infiltração para o Ano com Precipitações na Média: 2018.....	95
Figura 5.4 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d’água 3,5 m.....	96
Figura 5.5 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Sem Acostamento; Nível de Água 3,5 m.....	97
Figura 5.6 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento.....	99
Figura 5.7 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Abaixo da Média (2013); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento.....	100
Figura 5.8 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações na Média (2018); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento.....	101
Figura 5.9 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Revestimento 5 cm; Nível d’água 3,5 m; (a) Precipitações Acima da Média (b) Abaixo da Média (c) na Média.....	102
Figura 5.10 – Variação percentual das Umidades Máximas em Relação à Umidade Ótima: Revestimento 5 cm; Nível d’água 3,5 m.....	103
Figura 5.11 – Variação percentual das Umidades Máximas em Relação à Umidade Ótima: Revestimento 5 cm; Nível d’água 4,0 m.....	103
Figura 5.12 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para o subleito.....	104
Figura 5.13 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para a camada de sub-base.....	105
Figura 5.14 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para a camada de base.....	105

Figura 5.15 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Sem Acostamento; (a) NA 3,0 m, (b) NA 3,5 m, (c) NA 4,0 m, (d) NA 4,5 m.....	107
Figura 5.16 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Abaixo da Média (2013); Revestimento 5 cm; Sem Acostamento; (a) NA 3,0 m, (b) NA 3,5 m, (c) NA 4,0 m, (d) NA 4,5 m.....	108
Figura 5.17 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d’água 3,5 m; (a) Sem Acostamento, (b) 0,5 m Acostamento, (c) 1,0 m Acostamento, (d) 1,5 m Acostamento.....	109
Figura 5.18 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d’água 4,5 m; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento.....	110
Figura 5.19 – Variabilidade Média Mensal da Umidade Gravimétrica: Cenários Sem Acostamento.....	111
Figura 5.20 – Variabilidade Média Mensal da Umidade Gravimétrica: Cenários Com Acostamento.....	111
Figura 5.21 – Dano Médio.....	112
Figura 5.22 – % de Área Trincada.....	112
Figura 5.23 – Período para Atingir 10% de Área Trincada.....	113
Figura 5.24 – Deformação Permanente do Revestimento.....	114
Figura 5.25 – Frequência Acumulada das Precipitações para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 8.5.....	115
Figura 5.26 – Frequência Acumulada das Precipitações para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 4.5.....	115
Figura 5.27 – Gráfico Bloxpot: Série Histórica e Cenários de Mudança do Clima Século XXI.....	117
Figura 5.28 – Variação da Umidade Volumétrica no Subleito.....	118
Figura 5.29 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 25 anos.....	119
Figura 5.30 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 50 anos.....	120
Figura 5.31 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 100 anos.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos possíveis cenários de RCPs.....	29
Tabela 4.1 – GCMs utilizados.....	64
Tabela 4.2 – Equações IDF derivadas dos dados gerados pelos modelos de circulação global referentes aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para a cidade de Fortaleza.....	69
Tabela 4.3 – Cenários de Cheias Urbanas.....	74
Tabela 4.4 – Caracterização dos Solos.....	77
Tabela 4.5 – Coeficiente de permeabilidade dos materiais das camadas do pavimento.....	79
Tabela 4.6 – Cenários Estudados para Pavimentos Rodoviários.....	86
Tabela 4.7 – Umidade Volumétrica.....	87
Tabela 4.8 – Equações de características do MR para cada umidade.....	89
Tabela 5.1 – Coeficientes da regressão para cálculo do MR.....	104
Tabela 5.2 – Cenário Modelados.....	110
Tabela 5.3 – Anomalias de Precipitações Máxima, Média e Mínima para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 8.5.....	116
Tabela 5.4 – Anomalias de Precipitações Máxima, Média e Mínima para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 4.5.....	116

LISTA ABREVIATURA E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AUMEF	Autarquia Metropolitana de Fortaleza
CA	Concreto Asfáltico
CAP 3D-D	CAP 3D-Dimensionamento
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de Carbono
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FDA	Função de Distribuição de Acumulativa
GCM	<i>General Circulation Models</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
LMP	Laboratório de Mecânica de Pavimentos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	Módulo de Resiliência
MR _{ótimo}	Módulo de Resiliência na Umidade Ótima
POO	Programação Orientada a Objetos
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RF	<i>Radiative Forcing</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEINF	Secretaria de Infraestrutura do Município de Fortaleza
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

TSP	Tratamento Superficial por Penetração
UFC	Universidade Federal do Ceará
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
WGCM	<i>World Climate Research Programme</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%AT$	Percentual de Área Trincada
(u_a-u_w)	Sucção Matricial
A	Anomalia Percentual de Precipitação
C	Coefficiente Adimensional de Escoamento Superficial
D	Dano
ΔH	Varição de Carga Hidráulica
Δu	Varição de Umidade
e	Índice de Vazios
E	Rigidez do Material
ϵ_r	Deformação Recuperável Resiliente
ϵ_τ	Deformação Principal de Tração
f	Infiltração
i	Intensidade da Chuva
K_{sat}	Coefficiente de Permeabilidade Saturado
n	Porosidade
N	Número de Eixos Padrões
N_{fi}	Valor Máximo de Solicitações de Tráfego
P_a	Pressão Atmosférica
θ	Teor de Umidade Volumétrica
θ'	Grau de Saturação
ρ	Densidade
σ_d	Tensão Desvio
T	Temperatura
T_s	Tensão Superficial da Água
π	Sucção Osmótica
Ψ	Sucção Total
V_v	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização.....	20
1.2	Questões da Pesquisa.....	21
1.3	Objetivos.....	22
1.4	Contribuição Técnica e Científica.....	22
1.5	Estrutura do Trabalho	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Clima e Hidrologia.....	25
2.1.1	<i>Aspectos Climáticos da Região Nordeste</i>	<i>25</i>
2.1.2	<i>Variabilidade e Mudanças Climáticas</i>	<i>28</i>
2.1.2.1	<i>Modelagem Climática - CMIP 5.....</i>	<i>30</i>
2.1.3	<i>Modelagem Hidrológica</i>	<i>32</i>
2.2	Fluxo em Meio Poroso Não - Saturado.....	32
2.2.1	<i>Sucção</i>	<i>33</i>
2.2.2	<i>Curvas de Retenção e de Condutividade Hidráulica.....</i>	<i>34</i>
2.2.3	<i>Perfil de sucção.....</i>	<i>36</i>
2.2.4	<i>Equação Geral</i>	<i>38</i>
2.3	Projeto de Pavimentos.....	39
2.3.1	<i>Módulo de Resiliência</i>	<i>40</i>
2.3.2	<i>Dimensionamento Mecânico-Empírico</i>	<i>42</i>
2.3.2.1	<i>Fadiga, Dano e Trincamento.....</i>	<i>44</i>
2.4	Modelos Integrados	47
2.5	Considerações Parciais	49
3	LOCAL DE ESTUDO: REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA .	50
3.1	Demografia, Economia e Infraestrutura de Transportes	50
3.2	Aspectos Climáticos e Hidrológicos	52

3.3	Características Geológico - Geotécnicas.....	54
3.4	Cidade de Fortaleza.....	57
3.5	Considerações Parciais.....	59
4	METODOLOGIA.....	60
4.1	Estratégia Geral.....	60
4.2	Modelos e Variáveis de Integração	61
4.3	Modelo Climático.....	63
4.3.1	<i>Pavimentos Rodoviários</i>	<i>64</i>
4.3.2	<i>Pavimentos Urbanos.....</i>	<i>68</i>
4.4	Modelo Hidrológico – Pavimentos Rodoviários.....	69
4.5	Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico - Pavimentos Urbanos.....	72
4.6	Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não - Saturado	76
4.6.1	<i>Condutividade Hidráulica</i>	<i>78</i>
4.6.2	<i>Curvas de Retenção</i>	<i>79</i>
4.6.3	<i>Curvas de Condutividade Hidráulica.....</i>	<i>83</i>
4.6.4	<i>Pavimentos Rodoviários</i>	<i>85</i>
4.6.5	<i>Pavimentos Urbanos.....</i>	<i>88</i>
4.7	Modelo de Rigidez do Pavimento	88
4.7.1	<i>Análise dos Resíduos</i>	<i>89</i>
4.8	Análise de Desempenho.....	90
4.9	Considerações Parciais.....	92
5	RESULTADOS	94
5.1	Pavimentos Rodoviários.....	94
5.1.1	Modelo Climático e Hidrológico.....	94
5.1.2	Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não – Saturado	96
5.1.2.1	<i>Espessura do Revestimento</i>	<i>97</i>
5.1.2.2	<i>Condições de Nível d’água.....</i>	<i>97</i>

5.1.2.3	<i>Condições de Acostamento</i>	101
5.1.3	Modelo de Rigidez do Pavimento	104
5.1.3.1	<i>Condições de Nível d'água</i>	106
5.1.3.2	<i>Condições de Acostamento</i>	108
5.1.4	Análise de Desempenho	110
5.1.5	Cenários de Mudança Climática	114
5.2	Pavimentos Urbanos	118
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
6.1	Conclusões	121
6.2	Sugestões para Pesquisas Futuras	124
	REFERÊNCIAS	126
	APÊNDICE A - CORREÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS DE MUDANÇA DO CLIMA	136
	APÊNDICE B – HIETOGRAMAS	141
	APÊNDICE C – TESTE DE ADERÊNCIA	158
	APÊNDICE D – VARIAÇÕES DE UMIDADE VOLUMÉTRICA	164
	APÊNDICE E – VARIAÇÕES DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA A CAMADA DE BASE	200

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se: a contextualização e as questões da pesquisa, a descrição dos objetivos gerais e específicos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho, bem como, as contribuições geradas pelo trabalho e a estruturação da tese.

1.1 Contextualização

O ciclo da água e as relações com o clima em ambiente urbano mudaram bruscamente no antropoceno (CRUTZEN; STOERMER, 2000; STEFFEN *et al.*, 2011). Na presente era, a humanidade tem exercido forte poder nos sistemas da Terra, como as mudanças climáticas, além da alteração de cursos de rios, impermeabilização de áreas, desmatamento, barragens, entre outros (STEFFEN *et al.*, 2011; HAMILTON *et al.*, 2015). Porém, o clima e o ciclo água nos ambientes antropizados exercem forte poder sobre o desenvolvimento das cidades, pois podem ser fatores causadores de transtornos à população, citando-se: secas e cheias, inundações urbanas, ilhas de calor, entre outros.

As cidades e os diferentes sistemas que as compõem devem ser pensados de forma a conviver com a água e os fatores climáticos. No que se refere às infraestruturas de transportes e de águas, ao longo do tempo, grande parte dos projetos de engenharia tem sido desenvolvidos de forma independente. Cada parte é subdividida para elaboração por diferentes especialistas, perdendo ou simplificando, muitas vezes, a visão conjunta das inter-relações dos sistemas. Então, é importante desenvolver ferramentas que permitam uma análise integrada das infraestruturas civis em ambiente antropizado, com vistas a identificar as conexões e elaborar planejamentos e projetos mais eficazes e robustos ao reconhecer as interligações entre os diferentes subsistemas (abastecimento de água e esgoto, drenagem, pavimento, tráfego, construção civil, entre outros). Nessa perspectiva, apresenta-se um esforço para explorar essas conexões e a análise do subsistema de drenagem urbana e de pavimentos.

As infraestruturas de transportes, como os pavimentos, estão sujeitas às intempéries, sendo que a precipitação atmosférica e a radiação solar são dois elementos do clima que podem influenciar no desempenho do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2015). Todavia, no Brasil, o dimensionamento de pavimentos ainda não incorpora todas as variáveis climáticas que afetam sua durabilidade, mesmo em suas propostas de versões mais recentes, como nos trabalhos de Santiago *et al.* (2018) e Motta (2018). O desenvolvimento das soluções para os problemas modernos de engenharia de transportes requer projetos robustos que

incorporem a variabilidade climática de forma a atender às demandas para qual foram idealizados.

Para a concepção desses projetos são necessários estudos integrados entre as análises do comportamento hidromecânico dos elementos da estrutura de pavimento e o meio físico, pois este impõe condicionantes espaciais e temporais de relevância para o comportamento da obra ao longo de sua vida útil. Há ainda a grande variabilidade ambiental e, também, de material e de comportamento, que caracteriza muitas obras do sistema viário, sendo imposta a necessidade de simplificações e análises integradas (GHELING *et al.*, 2015).

Mallick *et al.* (2014) ressaltam ainda que para o desenvolvimento sustentável dos projetos de engenharia, as informações devem ser obtidas através de pesquisas mais colaborativas entre climatologistas e engenheiros de pavimentos. Além disso, dados climáticos, de pavimentação e econômicos (bem como ambientais) disponíveis devem ser integrados em modelos dinâmicos do sistema e usados para previsões de desempenho e custo de longo prazo.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia para a conexão das diferentes variáveis e modelos que integram as variáveis climáticas e a infraestrutura de transportes do ambiente urbano, a fim de aprimorar a concepção dos projetos de engenharia e compreender como o clima e as águas, no meio antropizado, afetam o desempenho desses projetos.

1.2 Questões da Pesquisa

Para o desenvolvimento da tese, foram formulados alguns questionamentos que nortearam as pesquisas deste trabalho. A seguir, as questões elencadas:

- É possível desenvolver um modelo integrado entre os subsistemas climáticos, de recursos hídricos e de pavimentos para o projeto de infraestruturas?
- Quais simplificações podem ser adotadas para permitir a implementação da metodologia por técnicos e acadêmicos?
- Quais as variáveis de integração entre os subsistemas?
- Em quais situações a utilização de uma metodologia integrada é possível e necessária?
- Quais os potenciais ganhos do modelo integrado em comparação aos modelos desagregados?
- Como as mudanças climáticas podem afetar o desempenho das infraestruturas hídricas e de transportes?

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo geral: propor uma metodologia que possibilite uma gestão integrada de infraestrutura civil em ambiente urbano, especificamente nos temas de água e infraestrutura de transportes.

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Desenvolver um modelo conceitual de integração entre o clima, a hidrologia e os pavimentos urbanos e rodoviários;
- Caracterizar cada um dos subsistemas (modelo climático, modelo de escoamento e drenagem urbana, modelo de fluxo transiente em meio poroso não-saturado, modelo de rigidez do pavimento) identificados no modelo conceitual;
- Definir as variáveis de integração entre os componentes dos subsistemas do modelo conceitual;
- Desenvolver um modelo de rigidez das camadas do pavimento incorporando variações de umidade geradas pelas precipitações;
- Apresentar um modelo integrado para planejamentos e projetos da infraestrutura para as cidades brasileiras, considerando os efeitos do clima;
- Implementar a aplicação do modelo para a Região Metropolitana de Fortaleza;
- Analisar como as mudanças climáticas podem alterar o desempenho das infraestruturas civis de transportes.

1.4 Contribuição Técnica e Científica

A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia que permite a integração dos subsistemas clima, hidrologia e pavimentos, por meio de modelos e variáveis conhecidas e utilizadas pelo meio técnico e acadêmico. Dessa forma, pode-se prever o desempenho das infraestruturas de forma mais próxima às condições reais a que estarão submetidas.

A pesquisa permitiu também uma visão de conjunto das variáveis e dos subsistemas que integram os projetos de infraestruturas viárias em ambientes urbanos, que, na maior parte dos trabalhos são estudados de forma compartimentada. Dessa forma, foi possível identificar as principais ligações entre os modelos estudados e desenvolver uma metodologia factível.

Durante a elaboração do trabalho também foi desenvolvido um modelo de previsão da rigidez de camadas granulares para condições de variação de umidade, aprimorando os resultados de Bastos (2013) e possibilitando a integração entre os subsistemas.

Foram também utilizados resultados de diferentes pesquisadores do Estado do Ceará e diferentes programas de pós-graduação (Recursos Hídricos, Transportes, Geologia), fortalecendo e ressaltando a importância das pesquisas locais, que puderam auxiliar na caracterização individual dos subsistemas.

Como contribuição são ainda apresentados os efeitos de mudança do clima para as precipitações médias anuais na RMF, considerando 10 modelos climáticos diferentes, permitindo a análise estatística da variabilidade climática futura para a região. Ademais, também são analisadas as projeções de alteração de chuvas intensas na região para o século XXI e seus efeitos nos sistemas de águas urbanas.

Espera-se também ter contribuído para os projetistas e tomadores de decisão, *a priori*, no Estado do Ceará, no desenvolvimento de projetos robustos para os próximos anos, principalmente, nos projetos de engenharia rodoviária. Visa-se manter ou melhorar o desempenho destas estruturas frente às mudanças climáticas.

Ressalta-se ainda que, no decorrer das diferentes fases da pesquisa, não foi encontrado nenhum trabalho em nível nacional ou internacional que apresentasse um modelo de integração conforme o produzido nesta tese.

1.5 Estrutura do Trabalho

A presente tese está estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as principais motivações e contribuições da realização da pesquisa, o escopo do trabalho e a descrição dos objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica que fundamentou as etapas da pesquisa, sendo abordados os seguintes assuntos: clima e hidrologia, fluxo em meio poroso não saturado e o projeto de pavimentos.

Para desenvolvimento e aplicação da pesquisa foi escolhida a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), sendo apresentado no Capítulo 3, para a região, as caracterizações: demográfica, econômica, infraestrutura urbana, climática, hidrológica e geológico-geotécnica.

A metodologia utilizada na pesquisa é descrita no quarto capítulo. São detalhadas todas as etapas de desenvolvimento do trabalho, caracterizados cada um dos modelos adotados, bem como, apresentadas todas as hipóteses empregadas.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos para a metodologia de integração dos subsistemas, e ainda as análises para as mudanças climáticas na RMF.

As conclusões da pesquisa indicando os resultados obtidos e os objetivos alcançados, bem como as sugestões para pesquisas futuras, são apresentadas no sexto capítulo. Por último, as referências bibliográficas citadas no texto e os apêndices são apresentados.

No Apêndice A são apresentadas as correções de viés utilizadas nos modelos de mudança do clima. Os hietogramas para equação de chuva de Fortaleza e os modelos de mudança climática estudados são exibidos no Apêndice B.

No Apêndice C é feito o teste de aderência dos resíduos do modelo de rigidez das camadas do pavimento estudadas. No Apêndice D são mostradas as variações de umidade volumétrica para os cenários analisados. Os resultados da variação do módulo de resiliência da camada de base são comparados no Apêndice E.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os aspectos mais relevantes ao tema da pesquisa, permitindo a consolidação de uma base teórica que possa auxiliar no desenvolvimento da metodologia, na análise dos resultados e nas conclusões finais do trabalho. Dessa forma, foram considerados aspectos relacionados ao clima (variabilidade, mudanças climáticas, entre outros), modelos hidrológicos, modelos de fluxo em meio poroso, projeto de pavimentos e levantamento bibliográfico sobre modelos integrados de águas urbanas e pavimentos.

2.1 Clima e Hidrologia

O clima é o conjunto de condições atmosféricas (precipitação, temperatura, radiação, entre outros) que caracteriza um dado local, devido a influência que exerce sobre a vida na Terra. Para o desenvolvimento dos projetos de engenharia é muito importante a caracterização do clima da região onde serão executados, a fim de garantir que sejam corretamente implementados.

A caracterização climática de uma região não pode ser considerada de forma estacionária, pois, as relações modernas da sociedade e ambiente têm mostrado a capacidade da civilização contemporânea de alterar o meio ambiente na escala global. Isso pode ser evidenciado pelas emissões em larga escala de dióxido de carbono que alteram o balanço energético do planeta, e pelas alterações inegavelmente antropogênicas na camada de ozônio (STEFFEN *et al.*, 2011).

De acordo com Meybeck (2003), em algumas regiões do planeta, o sistema terrestre é atualmente mais controlado por forçantes (variáveis que condicionam o sistema) antropogênicas do que naturais. De tal forma que, as pressões humanas chegaram a um estado em que o ciclo hidrológico continental não pode mais ser considerado como sendo controlado apenas por processos do sistema terrestre, evidenciando assim uma nova época, denominada: Antropoceno.

2.1.1 Aspectos Climáticos da Região Nordeste

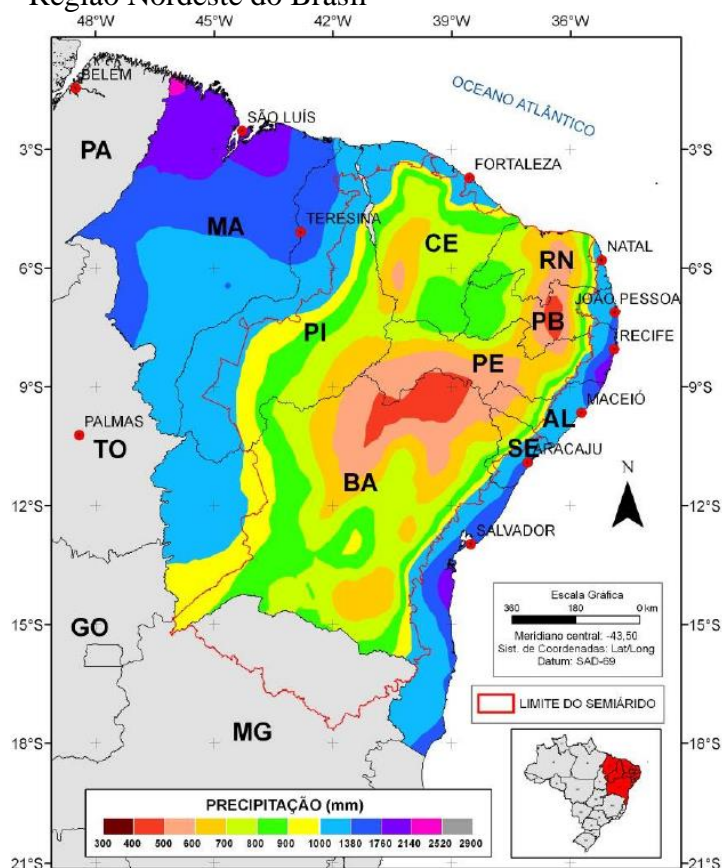
As precipitações, na região Nordeste, são determinadas por movimentos que favorecem ou inibem o processo de formação de nuvens precipitantes. As temperaturas das superfícies dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial estão entre os principais fatores

globais que regem a circulação atmosférica sobre a região. A combinação das condições nesses oceanos é que ocasiona a grande variabilidade interanual das precipitações no Nordeste, gerando a alternância de anos de seca e de cheias (NOBRE, 2012).

O Nordeste brasileiro (Figura 2.1) está numa área de transição entre os elevados totais anuais de precipitação da região amazônica, que chegam a ultrapassar os 3000 mm/ano, e os baixos totais anuais de precipitação da região central do Atlântico Sul sob o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul inferiores a 300 mm/ano (NOBRE, 2012).

O Estado do Ceará apresenta, na maior parte do seu território, índices pluviométricos médios anuais menores que 900 mm/ano e estação chuvosa bem definida e concentrada em poucos meses (janeiro-junho), características do clima da região, semiárido (SOUZA FILHO e LALL, 2003).

Figura 2.1 – Climatologia da precipitação anual da Região Nordeste do Brasil



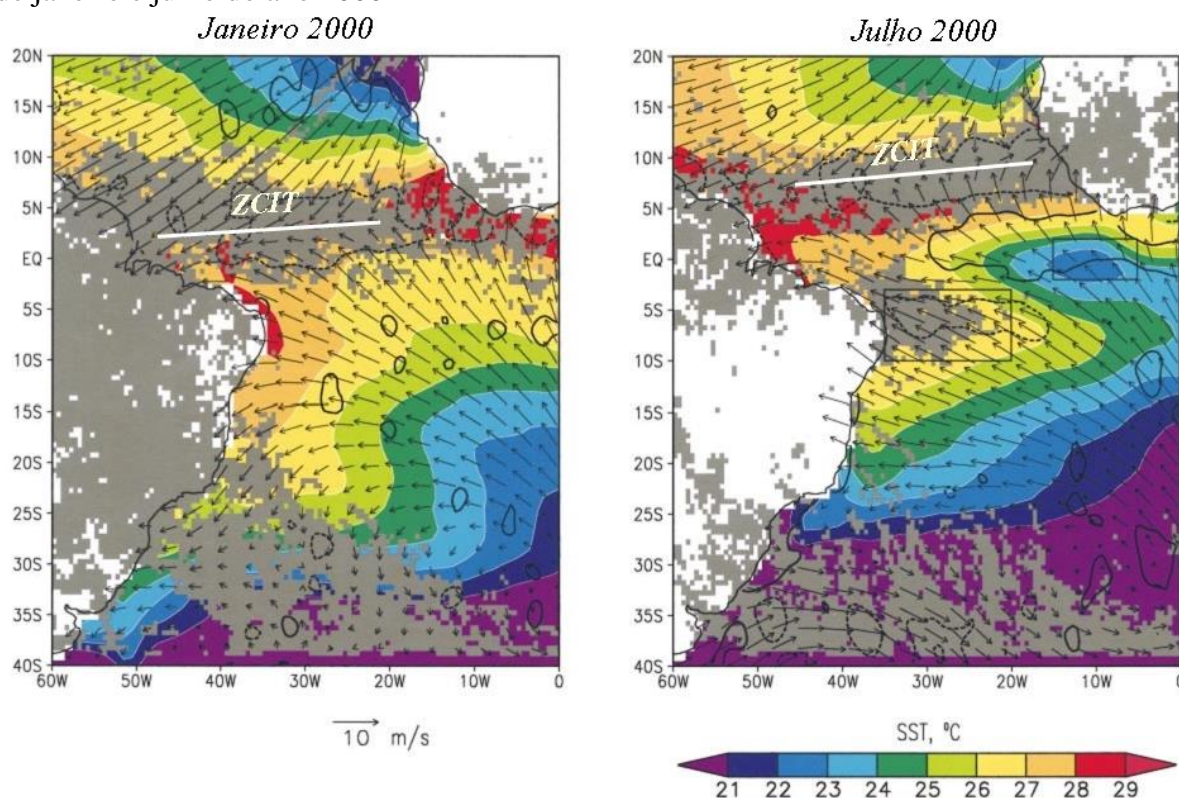
Fonte: Correia *et al.* (2011)

A sazonalidade das chuvas na porção norte da região Nordeste é regida em grande parte pela migração norte/sul da zona de convergência intertropical (ZCIT) (UVO *et al.*, 1998). As precipitações nos meses de janeiro e fevereiro são afetadas por frentes frias ou seus

remanescentes (KOUSKY, 1979). Porém a estação chuvosa principal é iniciada entre os meses de fevereiro e março, quando a ZCIT sobre o Oceano Atlântico Tropical alcança sua posição mais ao sul (HASTENRATH e LAMB, 1977). O que determina o fim do período chuvoso é o retorno da ZCIT para o norte (SOUZA FILHO e LALL, 2003). Em um ano chuvoso, a ZCIT permanece, muitas vezes, ao sul do Equador até o início de maio. Porém, em anos secos, a ZCIT pode ou não chegar a posições ao sul do Equador ou retornar ao norte mais cedo, muitas vezes durante março (UVO *et al.*, 1998).

A Figura 2.2 ilustra a posição da ZCIT antes de iniciar o período chuvoso (janeiro) e logo após o seu término (julho) no ano 2000. As setas indicam o escoamento do vento em cada período. Os contornos das áreas coloridas representam os campos de temperaturas da superfície do mar.

Figura 2.2 – Ilustração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em sua posição nos meses de janeiro e julho do ano 2000



Fonte: Adaptado de Grodsky e Carton (2003)

As variações interanuais das precipitações na porção norte da região Nordeste, que ocasionam extremos climáticos caracterizando anos de secas gravíssimas ou enchentes, estão relacionadas com as variações de temperatura da superfície do mar (TSM) (NOBRE, 2012).

Uvo *et al.* (1998) desenvolveram um trabalho de análise da precipitação no Nordeste e sua relação com a TSM. Os resultados indicam que anomalias quentes de TSM no Atlântico Sul Equatorial associam-se a uma migração mais cedo para o sul, que provocam chuvas abundantes em partes do Nordeste, incluindo o Ceará. De acordo com estudos anteriores, eles encontram a posição da ZCIT em abril e maio e, portanto, o fim da estação chuvosa do Nordeste é determinado, em grande parte por um gradiente norte-sul no Oceano Atlântico Tropical (SOUZA FILHO e LALL, 2003).

Outro aspecto importante na circulação geral da atmosfera global, que também está associado com a variabilidade interanual das precipitações no Nordeste, é a ocorrência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre o Pacífico Equatorial (NOBRE, 2012). Quando ocorre a fase quente do ENOS, ou seja, o aquecimento das TSM no Pacífico Equatorial Leste, na maioria das vezes, associada ao deslocamento das células convectivas atmosféricas da Indonésia para o Pacífico Central e Leste, o que acarreta o aumento do ramo descendente sobre o leste da região da Amazônia e a região Nordeste do Brasil. Com isto, há inibição do processo de formação de nebulosidade local, a ZCIT desloca-se para o norte e ocasiona seca na região Nordeste e leste da região da Amazônia. Já na ocorrência da fase fria do ENOS, também denominada La Niña, ou seja, o resfriamento das TSM no Pacífico Equatorial Leste provoca efeito contrário ao El Niño, favorecendo o aumento da precipitação na região Nordeste e leste da região da Amazônia.

2.1.2 Variabilidade e Mudanças Climáticas

Denomina-se variabilidade climática: a variação do clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações (TUCCI, 2002). Já a modificação climática diz respeito às alterações da variabilidade climática devido às atividades humanas.

Em geral, a avaliação dos processos hidrológicos em diferentes estudos é baseada na homogeneidade das séries hidrológicas (as estatísticas da série hidrológica não modificam ao longo do tempo). Porém, tem-se observado que a dinâmica na realidade é a não-homogeneidade das séries que tem aparecido devido a causas isoladas e combinadas (TUCCI, 2002).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) define as mudanças climáticas como alterações no clima, que podem ser identificadas por mudanças na média e/ou variação das suas propriedades, e que persistem por longos períodos, normalmente por décadas. A mudança climática pode ser proveniente de processos naturais do próprio planeta, por forças

externas, ou das alterações antrópicas que modificam a composição da atmosfera e/ou do uso do solo (UNISDR, 2009).

As mudanças climáticas observadas nas grandes cidades são, em geral, um aumento de temperatura, que tende a aumentar a capacidade da atmosfera de reter água, levando a precipitações mais intensas (PHILLIP, 2011). Ademais, as mudanças na temperatura do ar também influenciam as taxas de evaporação e transpiração, alterando a capacidade de retenção de água dos solos e da vegetação. Essas modificações têm impacto nos sistemas urbanos, principalmente no escoamento das águas pluviais, visto que o amortecimento e infiltração naturais do escoamento se tornam desbalanceados. Efeito similar também pode ser causado por mudanças na precipitação média, o que leva a diferenças na saturação de umidade do solo (SHAW *et al.*, 2005).

As alterações observadas em eventos climáticos extremos refletem a influência das mudanças climáticas causadas por fatores antropogênicos, além da variabilidade climática natural (SABÓIA *et al.*, 2017). De acordo com as projeções climáticas futuras, o aumento na temperatura média da superfície causará grandes mudanças na precipitação média anual de quase todo o planeta. Bates *et al.* (2008) afirmam ainda ser possível que o aumento da temperatura média global, observado nas últimas décadas, cause alterações no ciclo hidrológico, por meio de modificações dos padrões de precipitação e evapotranspiração capazes de impactar diretamente a umidade do solo, a reserva subterrânea e a geração do escoamento superficial.

Vuuren *et al.* (2011) desenvolveram para o IPCC possíveis cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*) para identificar de que forma as mudanças climáticas ocorrerão no futuro. Os cenários estimam valores das RFs (*Radiative Forcing*) até o ano 2100, estes baseiam-se nas possíveis modificações dos agentes promotores das mudanças climáticas (principalmente o CO₂). Na Tabela 2.1 são apresentados os quatro cenários de mudanças climáticas estimados para o futuro, são eles: RCP 2,6; RCP 4,5; RCP 6 e RCP 8,5.

Tabela 2.1 – Resumo dos possíveis cenários de RCPs

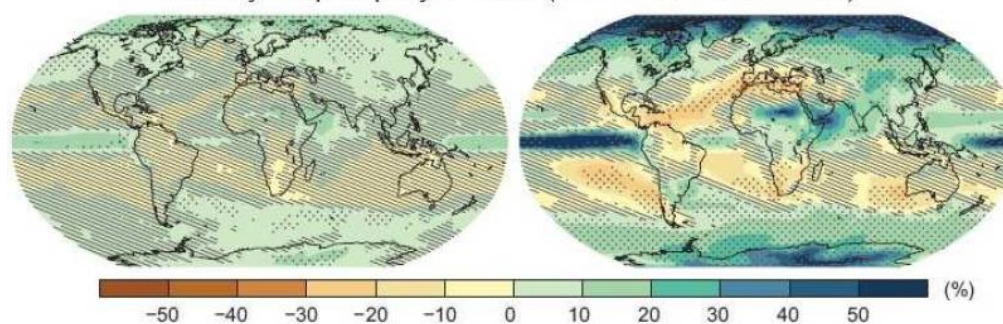
Cenário	Descrição	Concentração equivalente de CO₂
RCP 8,5	Crescimento da RF até 8,5 W/m ² até 2100	1370 ppm
RCP 6,0	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 6 W/m ²	850 ppm
RCP 4,5	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 4,5 W/m ²	650 ppm
RCP 2,6	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 2,6 W/m ²	490 ppm

Fonte: IPCC (2013) *apud* Sabóia (2016)

As análises indicam que o cenário RCP 8,5 é o que possui a maior probabilidade de ocorrência, sendo o mais conservador e pessimista. Nessa condição não existirão medidas políticas voltadas para o desenvolvimento sustentável, mesma tendência apresentada pelo RCP 6. O RCP 4,5 está associado a uma baixa taxa de emissão de gases do efeito estufa e a existência de uma quantidade regular de medidas político-ambiental aplicada nos países. O RCP 2,6 é a perspectiva mais otimista e neste cenário foram consideradas que existirão políticas ambientais mais rigorosas e eficientes, levando a uma diminuição na emissão de poluentes (VUUREN *et al.*, 2011).

Os estudos apontam que as mudanças nos cenários RCPs podem afetar consideravelmente todo o regime de chuvas do planeta. Conforme pode-se observar na Figura 2.3, mesmo no cenário mais otimista, ocorrerão alterações nas médias pluviométricas em todos os locais do globo terrestre. De uma maneira geral, os estudos apontam que, no futuro, as diferenças de precipitações entre regiões secas e úmidas tendem a aumentar, além disso sugerem que eventos de precipitações extremas se tornarão cada vez mais comuns (EMORI e BROWN, 2005; IPCC, 2013).

Figura 2.3 – Mudança na precipitação média (%) com relação aos cenários RCP
RCP 2.6 RCP 8.5
Mudança na precipitação média (1986-2005 a 2081-2100)



Fonte: IPCC (2013) *apud* Sabóia (2016)

2.1.2.1 Modelagem Climática - CMIP 5

Desde setembro de 2008, 20 grupos de modelagem climática de todo o mundo têm desenvolvido conjuntos de experimentos coordenados de modelos climáticos. Essas experiências compreendem a quinta fase do “*Couple Model Intercomparison Project*” (CMIP5). O apoio do CMIP5 seguiu um estágio de planejamento que envolve ampla participação da comunidade (MEEHL e HIBBARD 2007; HIBBARD *et al.* 2007) que levou a uma proposta de consenso para realizar um conjunto de simulações climáticas focadas nas

principais lacunas e compreensão das mudanças climáticas passadas e futuras (TAYLOR *et al.*, 2012).

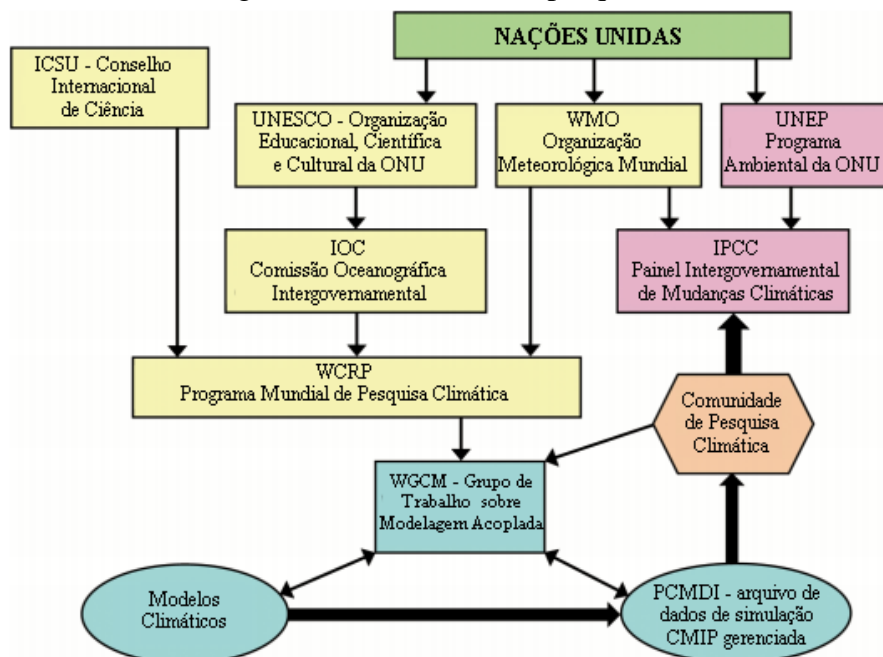
O CMIP5 baseia-se nos sucessos das fases anteriores do CMIP (MEEHL *et al.*, 2000, 2005). Conforme indicado por Taylor *et al.* (2012), o CMIP5 fornece uma variedade de futuros climáticos simulados (caracterizando as próximas décadas a séculos), podendo ser utilizado como base para explorar as mudanças climáticas e seus impactos em questões políticas e problemas de considerável interesse e relevância para a sociedade.

A estratégia CMIP5 inclui dois tipos de experimentos de modelagem de mudanças climáticas (MEEHL *et al.*, 2009):

- 1) integrações de longo prazo (escala de tempo do século);
- 2) integrações de curto prazo (10 a 30 anos), também chamadas de experimentos de previsão decadal.

As atividades do CMIP são organizadas pelo WGCM (*World Climate Research Programme*), que representa os grupos de modelagem. Como parte do processo de planejamento, o WGCM recebeu contribuição substancial de potenciais usuários do modelo, como por exemplo, cientistas que estudam impactos das mudanças climáticas e formuladores de políticas. A Figura 2.4 mostra as organizações internacionais que têm interesse no CMIP e participam do desenvolvimento dos modelos climáticos (TAYLOR *et al.*, 2012).

Figura 2.4 – CMIP e organizações estabelecidas para coordenar atividades de pesquisa climática internacionalmente com o IPCC, os centros de modelagem e a comunidade de pesquisa climática



Fonte: Adaptado de Taylor *et al.* (2012)

2.1.3 Modelagem Hidrológica

Os modelos hidrológicos utilizados nos projetos de infraestruturas civis urbanas são empregados, principalmente, na estimativa das chuvas. Silva *et al.* (2013) afirmam que para bacias urbanas, a equação de intensidade-duração-frequência (IDF), ou curva IDF, é de fundamental importância para a formulação da chuva de projeto. Essas são utilizadas principalmente nos dimensionamentos das obras de microdrenagem urbanas, tais como as sarjetas, as bocas de lobo, as galerias de drenagem pluvial e os bueiros. As IDF's são conhecidas no meio técnico de engenharia como equações de chuva.

As curvas (equações) IDF são obtidas por meio de registros de chuvas intensas para um dado período relevante dos eventos máximos da localidade em estudo (SABÓIA, 2016). De forma geral, as relações entre intensidade, duração e frequência das chuvas podem ser representadas por equações do tipo mostrado na Equação 2.1 (SILVA *et al.*, 2013; SABÓIA, 2016):

$$i = \frac{A}{(t+c)^b} = \frac{B.T^d}{(t+c)^b} \quad (2.1)$$

Onde: i = intensidade média da chuva (mm/h) em uma dada duração t (min), relativa a um período de retorno T (anos); B , d , c e b são parâmetros que devem ser determinados para cada região a ser estudada.

As mudanças climáticas indicam mudanças nos eventos de chuvas máximas, o que causará mudanças nas curvas IDF, por isto, elas podem necessitar de atualização (SCHARDONG *et al.*, 2014). Shaw *et al.* (2005) afirmam que a incorporação de previsões de mudanças climáticas, no projeto de águas pluviais, é importante se a infraestrutura for manter o nível de serviço ao longo de sua vida útil. O mesmo pode ser extrapolado para as outras obras civis de infraestrutura que devem ser usuais durante todo o período para o qual foram projetadas.

2.2 Fluxo em Meio Poroso Não - Saturado

O clima influencia o comportamento das camadas granulares constituintes do pavimento quando a água da chuva as atinge, seja pelos acostamentos, principalmente se esses não são revestidos, ou por infiltração por poros, trincas e juntas existentes na superfície do pavimento. Essas variações de umidade também podem ocorrer devido a oscilação do lençol

freático e gradientes de temperatura, que causam o movimento de água na forma de vapor (TAKEDA, 2006).

Os pavimentos estarão na maior parte da sua vida útil submetidos a condição não-saturada (saturação menor que 100%) e sujeitos às variações impostas, espacialmente, pelas condições climáticas, como temperatura e intensidade e distribuição das precipitações. Segundo Gheling *et al.* (2015), tais peculiaridades, impostas pela espacialidade, tornam o estudo dos solos não saturados, aplicado à construção viária terrestre, complexo e relevante.

2.2.1 Sucção

Um dos principais conceitos da mecânica dos solos não saturados é a sucção, gerada principalmente pela presença de ar nos vazios. A sucção total ψ é composta por dois componentes principais, ou seja, sucção matricial ($u_a - u_w$) e sucção osmótica (π), e pode ser matematicamente representado por (FREDLUND *et al.*, 2012):

$$\Psi = (u_a - u_w) - \pi \quad (2.2)$$

Onde: u_a é a pressão de água e u_w é a pressão de ar

Conforme descrito por Lima *et al.* (2015), os conceitos de sucção matricial e sucção osmótica podem ser definidos como:

- Sucção matricial: parcela referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devido às forças de capilaridade e de adsorção e que depende da matriz do solo;
- Sucção osmótica: parcela relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo.

A sucção matricial varia com o tempo, principalmente como resultado de condições impostas por mudanças ambientais (FREDLUND *et al.*, 2012). Qualquer mudança na sucção afeta o equilíbrio geral da massa do solo. Alterações na sucção do solo podem ser causadas por uma alteração em um ou nos dois componentes da sucção do solo. Porém, conforme Fredlund *et al.* (2012), as alterações de sucção total nos solos são relativas, principalmente, as variações na sucção mátrica. A sucção dos solos pode ser descrita também como a quantidade energética que permite avaliar a sua capacidade de reter água. Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele (LEE e WRAY, 1995).

2.2.2 *Curvas de Retenção e de Condutividade Hidráulica*

Quando o fluxo de água ocorre na zona não saturada, existe uma predominância de fenômenos em que o conhecimento da curva de condutividade hidráulica e da curva de retenção de água pelo solo é fundamental. Para essa situação, o conhecimento da permeabilidade saturada das camadas do subsolo não é o suficiente para o entendimento e a modelagem do fluxo de água (MACHADO e VILLAR, 2015).

A maioria dos processos em solos não saturados pode ser, pelo menos, em parte, compreendida em função da curva de retenção, ressaltam ainda que essa é a propriedade mais importante do solo não saturado (GITIRANA JUNIOR *et al.*, 2015). Fredlund (2002) e Fredlund (2006) se referem à curva de retenção como a propriedade principal para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia.

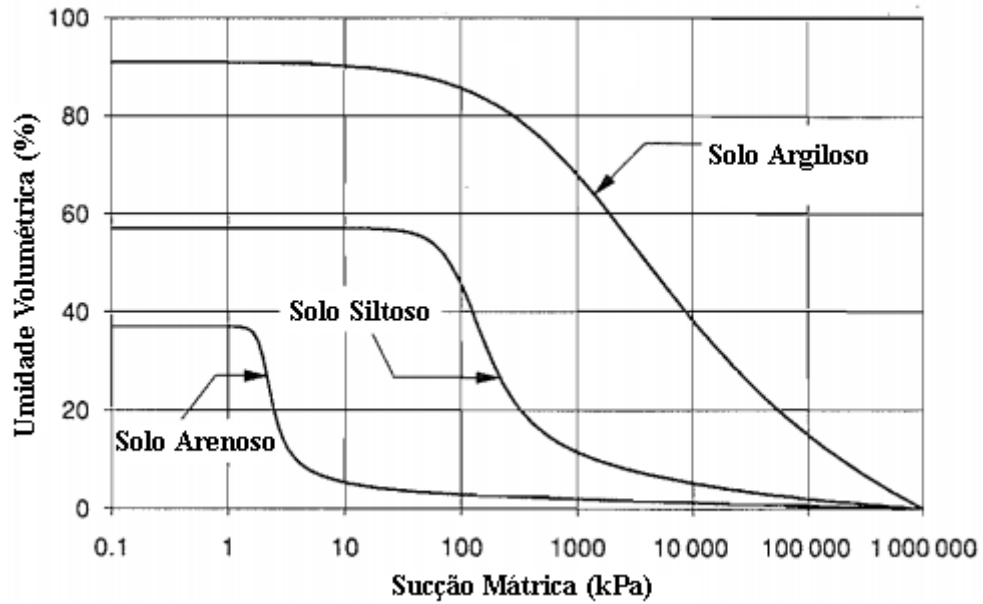
A curva de retenção é a relação entre a sucção mátrica do solo e o conteúdo de água, podendo ser representado pela: umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ), ou grau de saturação (S). Diversos são os fatores que podem influenciar o comportamento da curva retenção, dentre esses, os principais são: condições de compactação (umidade e energia de compactação), história de tensões, estrutura do solo, granulometria, mineralogia, estrutura, conteúdo de matéria orgânica (VANAPALLI *et al.*, 1999; NG e PANG, 2000).

Fredlund e Xing (1994) apresentam curvas típicas de retenção para diferentes tipos de solos, conforme indicado na Figura 2.5. É possível observar que, para solos argilosos, há variação de sucção numa faixa mais ampla para variações volumétricas quando comparados aos solos arenosos.

A Figura 2.6 mostra um gráfico típico de uma curva de retenção de um solo siltoso, juntamente com algumas de suas principais características. O valor de entrada de ar do solo (θ_{ar}) é a sucção matricial em que o ar começa a entrar nos poros do solo. O teor de umidade residual (θ_{ar}) é o teor de água em que é necessária uma grande mudança de sucção para remover água adicional do solo.

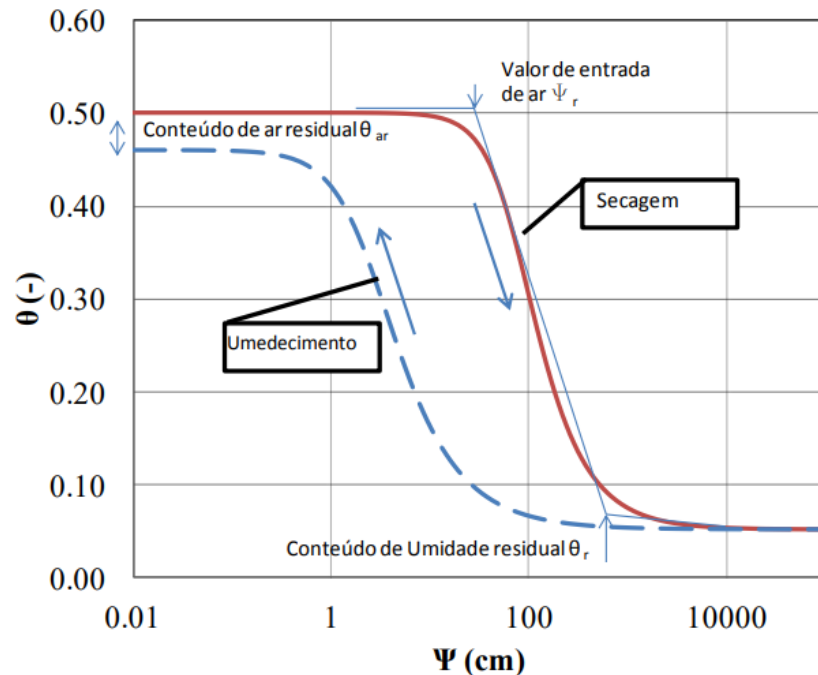
A curva principal mostrada na Figura 2.6 é uma curva de secagem. A curva de umedecimento difere da curva de dessorção como resultado da histerese. O ponto final da curva de adsorção pode diferir do ponto inicial da curva de dessorção devido ao aprisionamento de ar no solo.

Figura 2.5 – Curvas Típicas de Retenção para Diferentes Tipos de Solos



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994)

Figura 2.6 – Curva Típica de Retenção: Solo Siltooso

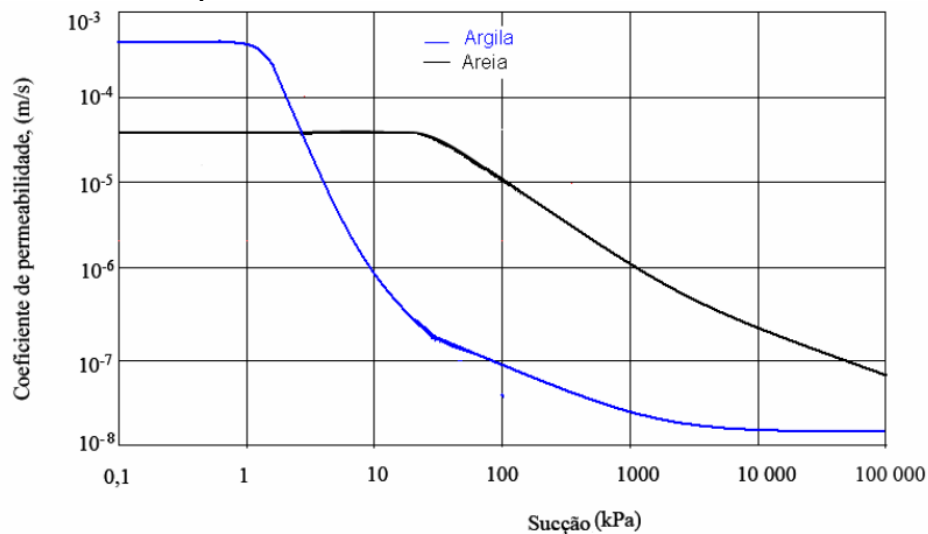


Fonte: Fredlund e Xing (1994) *apud* Pinto (2013)

A curva de condutividade hidráulica é função da sucção e do índice de vazios. Podendo-se desacoplar os parâmetros em duas funções independentes, uma que relaciona K_{sat} (coeficiente de permeabilidade saturado) ao índice de vazios (e) e outra que relaciona a condutividade hidráulica ao grau de saturação (umidade) ou sucção (PINTO, 2013).

Na Figura 2.7 são apresentadas curvas típicas de condutividade hidráulica para um solo arenoso e um solo argiloso. É possível verificar que, mesmo que a condutividade hidráulica saturada do solo arenoso, em geral, seja mais elevada que a de solos com granulometria menor (argilas). As areias, na condição não saturada, apresentam um decréscimo mais abrupto na condutividade hidráulica à medida que aumenta-se a sucção.

Figura 2.7 – Curvas Típicas de Condutividade Hidráulica para Diferentes Tipos de Solos



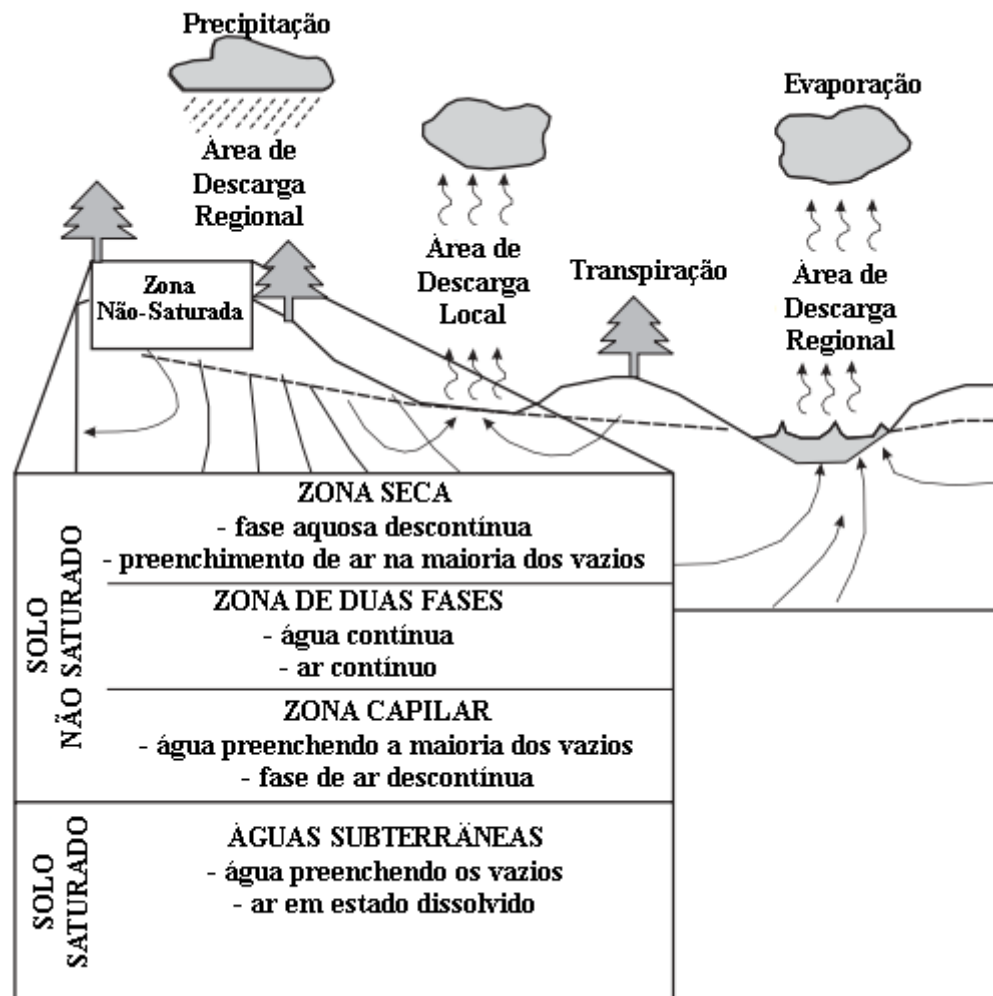
Fonte: Velloso (2000) *apud* Morales (2008)

2.2.3 Perfil de sucção

O clima da superfície do solo é um fator importante que controla a profundidade do lençol freático e, portanto, a espessura da zona do solo não saturada (Figura 2.8). A zona entre a superfície do solo e o lençol freático é referida como zona de solo não saturado, também denominada zona vadosa (FREDLUND *et al.*, 2012).

A zona de solo não saturado forma uma transição entre a água na atmosfera e as águas subterrâneas (ou seja, zona positiva de pressão da água dos poros), e pode ser dividida em três zonas de acordo com o grau de saturação (Figura 2.8). A região imediatamente acima do nível de água, onde o grau de saturação é de quase 100%, é chamada de zona capilar. A espessura desta zona depende do tipo de solo e estrutura dos poros, e geralmente é inferior a 10 m. Já acima da zona capilar, o grau de saturação varia entre 20% e 90%, dependendo do tipo de solo. Quanto mais próximo à superfície, os vazios apresentam-se cada vez mais preenchidos por ar até um valor máximo (FREDLUND *et al.*, 2012).

Figura 2.8 – Subdivisões da zona de solo não saturado (zona vadosa)

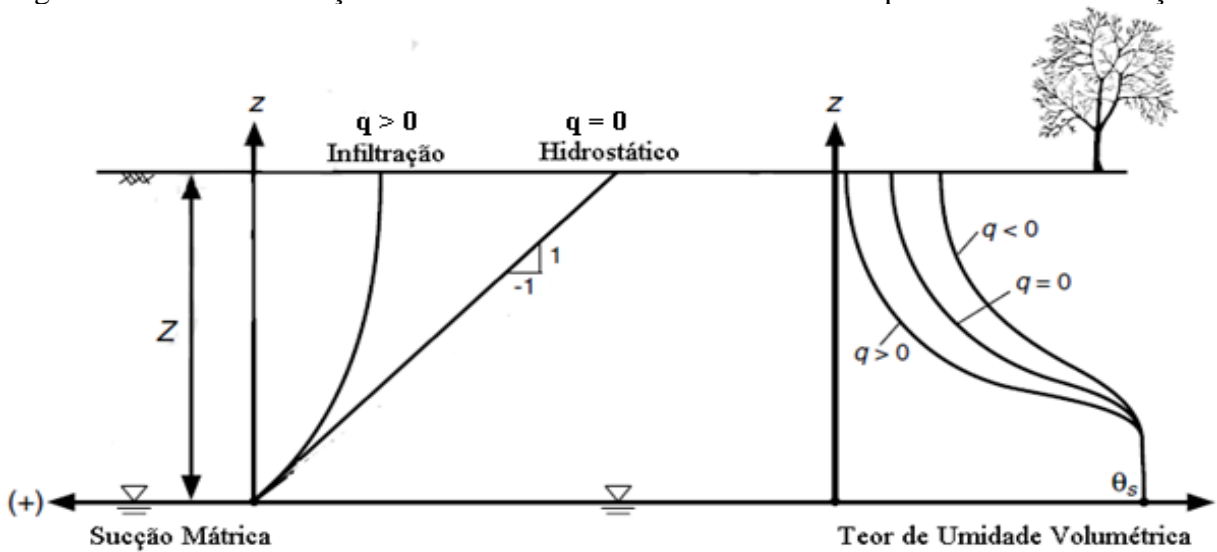


Fonte: Fredlund *et al.* (2012)

A distribuição da sucção mátrica, em um perfil de solo para condições acima do nível de água subterrânea, depende de diferentes fatores: profundidade do lençol freático; propriedades hidrológicas, conforme a curva de retenção e de condutividade hidráulica; fatores ambientais que controlam os fluxos de infiltração e evaporação na superfície; e as fronteiras geométricas ou condições de drenagem. As propriedades dos materiais combinadas às condições ambientais e aos fatores geométricos, acarretam diferentes sucções mátricas de acordo com a profundidade, conforme indicado na Figura 2.9 (LU e LIKOS, 2004).

O fluxo na zona vadosa, conforme descrito por Lu e Likos (2004), é uma função complexa das propriedades do solo e da infiltração transiente, evaporação e processos de armazenamento. Na Figura 2.9 pode-se observar as variações de sucção e umidade volumétrica para condições de infiltração ($q > 0$, ou seja, fluxo descendente) no perfil de solo.

Figura 2.9 – Perfil de sucção mátrica e teor de umidade volumétrica para diferentes condições



Fonte: Adaptado de Lu e Likos (2004).

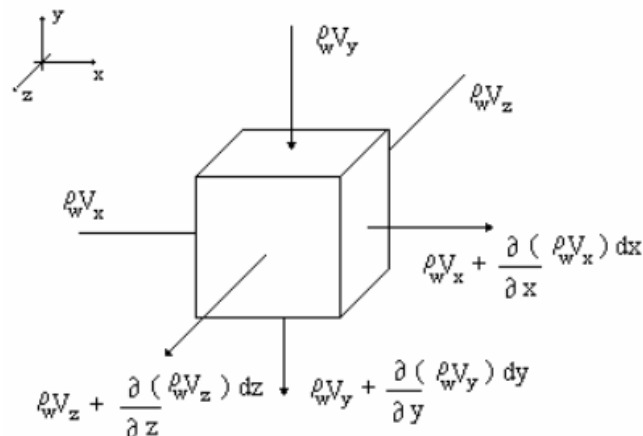
2.2.4 Equação Geral

Para descrição da equação geral de fluxo transiente em um meio poroso saturado, considera-se um volume de controle, como o mostrado na Figura 2.10, e utiliza-se a lei da conservação massa. Nessa condição, a variação de fluxo de massa de fluido para qualquer volume de controle é igual a variação de tempo de alteração do armazenamento de massa de fluido dentro do elemento. Desta forma, a equação de continuidade assume a seguinte forma (FREEZE e CHERRY, 1979):

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.3)$$

Onde: ρ é a densidade da água; v é a velocidade e t é o tempo

Figura 2.10 – Volume de Controle



Fonte: Morales (2008)

Definindo-se o grau de saturação θ' como $\theta' = \theta/n$, onde θ é o teor de umidade volumétrico e n é a porosidade. Para fluxo em um volume de controle elementar que esteja em uma condição parcial de saturação, a equação da continuidade deve considerar a taxa de tempo de alteração do teor de umidade. Dessa forma, a Equação 2.3 torna-se:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n\theta' \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho\theta' \frac{\partial n}{\partial t} + n\rho \frac{\partial \theta'}{\partial t} \quad (2.4)$$

Para fluxo não saturado, os dois primeiros termos no lado direito da Equação 2.4 são muito menores que o terceiro termo. Descartando esses dois termos, cancelando os ρ 's de ambos os lados da equação, inserindo a forma não saturada da lei de Darcy, e reconhecendo que $n \cdot d\theta' = d\theta$, chega-se a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.5)$$

Onde: Ψ é a carga de pressão e $k(\Psi)$ é a função condutividade hidráulica

É usual colocar a Equação 2.5 de forma que a variável independente seja θ ou Ψ . Para o último caso, é necessário multiplicar os termos da equação por $\partial\Psi$. Depois, sabendo que $C(\Psi) = \partial\theta/\partial\Psi$, e notando que h (carga total) = Ψ (carga piezométrica) + z (carga altimétrica), obtemos (FREEZE e CHERRY, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 é a equação de fluxo em regime transiente através de um meio poroso não saturado. É frequentemente chamada de equação de Richards, em homenagem ao pesquisador que primeiro a desenvolveu (FREEZE e CHERRY, 1979). Para resolução da Equação de Richards são necessárias as funções constitutivas hidráulicas dos materiais: função condutividade hidráulica $k(\Psi)$ e a curva de retenção $\theta(\Psi)$.

As soluções analíticas para essa equação são obtidas para poucos casos e condições restritas. Observa-se que a não linearidade da equação de Richards torna o problema de difícil resolução. Como alternativa, têm-se os métodos numéricos e computacionais que são geralmente utilizados a fim de tornar menos complicada e possível essa tarefa (QUEIRÓZ, 2017).

2.3 Projeto de Pavimentos

O dimensionamento de estruturas de pavimentos no Brasil por muitos anos tem sido realizado utilizando métodos empíricos baseados no ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*).

Porém, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo um método brasileiro empírico-mecanístico que busca representar melhor as condições ao qual o pavimento estará submetido ao longo de sua vida útil. Segundo Santiago *et al.* (2018), esse desenvolvimento foi possível no âmbito da Rede Temática de Asfalto, com o apoio da Petrobras e o envolvimento de diversas universidades e do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), para um método de dimensionamento de pavimentos asfálticos baseado em princípios mecânicos e com o suporte de uma base de dados de campo.

2.3.1 Módulo de Resiliência

Nos métodos mecânicos-empíricos utiliza-se o módulo de resiliência (MR) para caracterização mecânica dos materiais, principalmente dos solos que compõem a maior parte da estrutura, pois a deterioração dos pavimentos asfálticos está associada à deformação plástica e/ou às deflexões elásticas repetidas. Conforme descrito por Bastos (2016), a deflexão recuperável em um pavimento depende das propriedades elásticas de suas camadas e do subleito. A determinação do MR pode ser feita por meio de ensaios triaxiais cíclicos em laboratório, utilizando algum dos seguintes métodos: AASHTO T 307-99 (2007) e DNIT-ME 134/2018.

O termo resiliência foi classicamente definido por Hveem (1955) como “energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam tensões causadoras das deformações”. O autor atribuiu, na época, o trincamento dos revestimentos asfálticos à deformação elástica das camadas granulares e, principalmente, do subleito.

As tensões que causam deformações nos pavimentos são ocasionadas pelas cargas de veículos. Essas deformações podem ser divididas em duas: recuperável e não recuperável. Após encerrada a ação das cargas, a deformação elástica do pavimento, parcela resiliente, é recuperada rapidamente. Porém, parte dessa deformação é permanente, não recuperável, denominada deformação plástica (Figura 2.11).

Por definição, o MR é a relação entre a tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação recuperável, conforme apresentado na Equação 2.7.

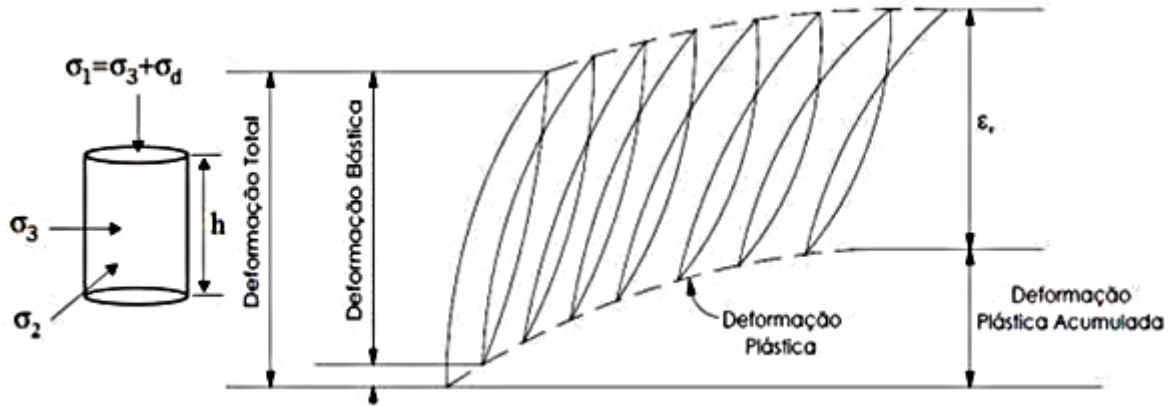
$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.7)$$

Onde: σ_d é a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$); σ_1 é a tensão axial cíclica; σ_3 é a tensão de confinamento; ε_r é a deformação recuperável resiliente que pode ser calculada conforme Equação 2.8.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.8)$$

Onde: Δh é o deslocamento axial recuperável resiliente; h_0 é a altura inicial do corpo de prova.

Figura 2.11 – Tensões aplicadas e deformações no ensaio de carga repetida



Fonte: Huang (2004) *apud* Bastos (2016)

Após a realização do ensaio, é necessário definir um modelo que represente o MR em função das tensões aplicadas, indicando um comportamento resiliente único para qualquer tipo de solo (FERREIRA e MOTTA, 2002). Alguns modelos foram propostos, entre esses estão o Pezo (1993), que foi trazido para o Brasil por Macêdo (1996), sendo representado pela Equação 2.9, e ainda o modelo universal não linear adotado no guia de dimensionamento da AASHTO (NCHRP 1-37A, 2004), conforme indicado na Equação 2.10:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \Delta\sigma^{k_3} \quad (2.9)$$

$$MR = k_1 \cdot P_a \cdot \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \cdot \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (2.10)$$

Onde: k_1 , k_2 , k_3 são parâmetros de regressão obtidos com base nos ensaios de laboratório; P_a é a pressão atmosférica; θ é o primeiro invariante de tensões ($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$) e τ_{oct} é a tensão cisalhante octaédrica ($\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$)

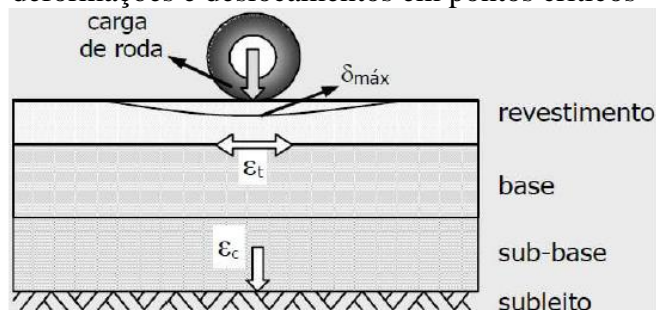
Para o dimensionamento, a caracterização mecânica das camadas, principalmente o módulo de resiliência, representa parte relevante do projeto. Segundo Takeda (2006), a análise mecanística e o projeto de pavimentos asfálticos dependem do conhecimento do carregamento imposto pelo tráfego, dos materiais, mas também dos fatores climáticos. As variações sazonais de fatores climáticos (temperatura e precipitação) afetam as condições das camadas do pavimento, incluindo o teor de umidade *in situ*. Essas condições apresentam uma relação direta com a resistência e rigidez do pavimento, causando variações da resistência e dos módulos das camadas.

Trabalhos como os de Fredlund *et al.* (1975), Elliott e Thornton (1988), Li e Selig (1994), Mohammad *et al.* (1995), Thadkamalla e George (1995), Drumm *et al.* (1997), Rodrigues (1997), Gonçalves (1999), Takeda (2006), Takeda *et al.* (2006), Zaman e Khoury (2007), Kim e Kim (2007) e Bastos (2013) mostraram que alterações na umidade pós-compactação do solo (que em campo pode ser ocasionada por precipitações) promovem variações significativas no módulo de resiliência e, conseqüentemente, mudanças nas características mecânicas dos solos.

2.3.2 Dimensionamento Mecânico-Empírico

Nos métodos mecânicos-empírico, os valores de tensão-deformação nos pavimentos são determinados a partir de simulações analíticas ou numéricas que têm como dados de entrada as propriedades dos materiais obtidas em ensaios laboratoriais (BASTOS, 2016). No dimensionamento mecânico-empírico, em geral, os pavimentos são considerados como um sistema de várias camadas elásticas, projetando a estrutura de forma que a repetição de esforços não cause, em curto prazo, a ruptura por fadiga dos materiais. Cada camada (revestimento, base, sub-base e subleito) é composta por um material diferente. Quanto maior for a resistência do material, convencionalmente, mais próximos à superfície, a fim de distribuir os esforços gerados pelo tráfego dos veículos de maneira uniforme e diminuindo as tensões e deflexões no subleito, como mostra a Figura 2.12 (FRANCO, 2007; SOARES *et al.*, 2009; BASTOS, 2016).

Figura 2.12 – Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos



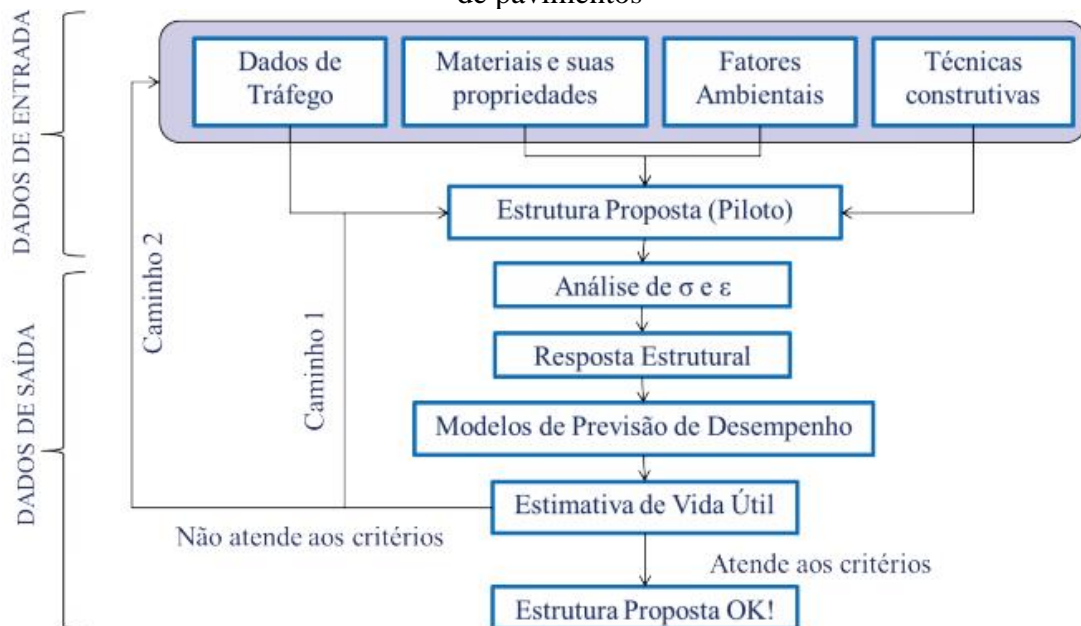
Fonte: Franco (2007)

Conforme descrito por Santiago *et al.* (2018), “a análise estrutural e os modelos de previsão de desempenho são centrais nos métodos mecânico-empíricos, que são constituídos por três subgrupos principais: dados de entrada, análise (estrutural e de desempenho) e dados

de saída”. Os dados de entrada necessários são: tráfego, ao qual o pavimento é submetido, condições ambientais da região, informações das camadas e seus materiais constituintes (módulo de resiliência, espessura, coeficiente de Poisson, curva de fadiga do material, entre outros) (FRANCO, 2007; SANTIAGO *et al.*, 2018).

Na Figura 2.13 apresenta-se um fluxograma básico de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos. Observa-se que após a inserção dos dados de entrada faz-se a análise estrutural do sistema de camadas (elástica-linear, não linear, viscoelástica, entre outras). Essa análise pode ser feita utilizando métodos analíticos ou numéricos, cada um com vantagens e restrições. A metodologia de análise pode ser em dois passos, quando tem-se uma resposta estrutural (tensões e deformações) e esta serve de dado de entrada para a análise de previsão de desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil (dano sofrido ao longo do tempo). A partir dos resultados de simulação do comportamento do material em campo, é possível avaliar a previsão de vida útil do pavimento, quanto aos defeitos considerados (% de área trincada, afundamento da trilha de roda, entre outros), de acordo com critérios admissíveis previamente estabelecidos. Esse processo é cíclico, ou seja, caso esses critérios não sejam atendidos, deverá ser redefinida uma nova estrutura de camadas, que será então submetida a um novo processo de análise (FRANCO, 2007; SOARES *et al.*, 2009; SANTIAGO e SOARES, 2015; SANTIAGO *et al.*, 2018).

Figura 2.13 – Fluxograma básico de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos



Fonte: Santiago e Soares (2015)

Nesta pesquisa, os resultados de desempenho de pavimentos asfálticos analisados são principalmente relacionados à fadiga. Por isso, a seguir apresentam-se alguns conceitos e equações relacionados a dano por fadiga e previsão de % de área trincada (%AT).

2.3.2.1 *Fadiga, Dano e Trincamento*

A fadiga pode ser definida como o processo de mudança estrutural permanente, que ocorre de forma progressiva e localizada, em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que, por sua vez, após determinado número de ciclos se transformam na falha (ASTM E1823, 2013). Já o dano por fadiga das misturas asfálticas, pode ser descrito como uma perda progressiva de resistência do material quando submetido a um número de repetições de carga. A fadiga de misturas asfálticas vem sendo estudada por diversos pesquisadores (KIM *et al.*, 2009; BABADOPULOS, 2014; NASCIMENTO, 2015; ALMEIDA, 2019) sob a ótica da teoria da Mecânica do Dano Contínuo Viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*). Esta teoria assume algumas simplificações, porém não reduz a sua capacidade de previsões de desempenho.

O conceito de dano é apresentado de diferentes formas. Para Lemaitre (1996), trata-se da deterioração que acontece no material antes da sua falha. Já para Kim (2009), dano pode ser descrito como a perda de resistência de um material que ocorre por algum mecanismo de falha (ex.: deformação permanente e trincamento por fadiga). Na mecânica do contínuo, o dano relativo aos trincamentos é dado por (LEMAITRE, 1996):

$$D = SD/S \quad (2.11)$$

Onde: D é o dano; SD é a área trincada; e S é a área estudada

Segundo Shah *et al.* (1995), a mecânica do dano é direcionada para a obtenção de índices que representam a diminuição da capacidade funcional das estruturas, onde a equação básica é dada da seguinte forma (SANTIAGO, 2017):

$$E_{dan} = E_{orig}(1 - D) \quad (2.12)$$

Onde: E_{dan} é a rigidez do material danificado; E_{orig} é a rigidez do material original (não danificado); D é o dano (variando entre 0 e 1, onde D=0 indica que o material não está danificado e D=1 está danificado).

Santiago *et al.* (2018) descrevem que na pavimentação, o dano por fadiga é normalmente representado como uma taxa que é descrita pela relação entre o número de

repetições de carga acumulada e o número de repetições de carga admissível, conforme apresentado na Equação 2.13 (NCHRP, 2004):

$$\sum_{i=1}^T D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (2.13)$$

Onde: T é o número total de períodos analisados; N_{fi} é o valor máximo de solicitações de tráfego que determinado material resiste em campo sem sofrer ruptura; e n_i é tráfego atual para o período i , dado pela seguinte equação (SANTIAGO *et al.*, 2018):

$$n_i = \frac{N \left(1 - \left(1 + \frac{t}{100} \right)^P \right)}{1 - \left(1 + \frac{t}{100} \right)} \quad (2.14)$$

Onde: N é definido como o número de eixos padrões, considerado no projeto da via no ano inicial de abertura ao tráfego; t é a taxa de crescimento anual do tráfego; P é o período correspondente a análise, em meses.

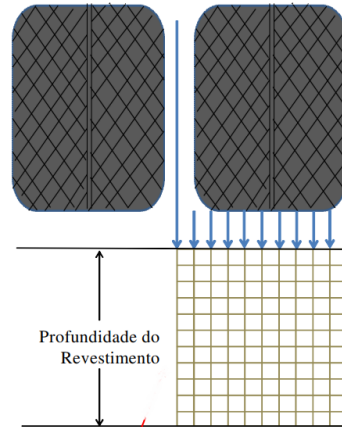
Para calcular o valor de N_f podem ser utilizadas diferentes funções, porém, conforme ressaltado por Santiago *et al.* (2018), a mais usada atualmente é a Equação 2.15, do *Asphalt Institute*.

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{K_2} E^{K_3} \quad (2.15)$$

Onde: ε_t é a deformação principal de tração (Figura 2.12), em geral, estimada na fibra inferior do revestimento; E é a rigidez do revestimento; K_1 , K_2 e K_3 são coeficientes de regressão laboratorial, inerentes a mistura asfáltica.

A ocorrência da fadiga do ponto de vista matemático se dá por acúmulo de dano quantificável. As análises computacionais consideram o chamado de “consumo de vida de fadiga” para a determinação do dano em um ponto da seção estudada. A seção é o conjunto dos pontos de interesse para análises de tensões e deformações sob o carregamento. A malha utilizada para análise é uma decisão que depende da análise e do software empregado. No software CAP3D-D, a malha utilizada é dada por 110 pontos distribuídos, conforme indicado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Malha para obtenção da média de dano no CAP3D-D



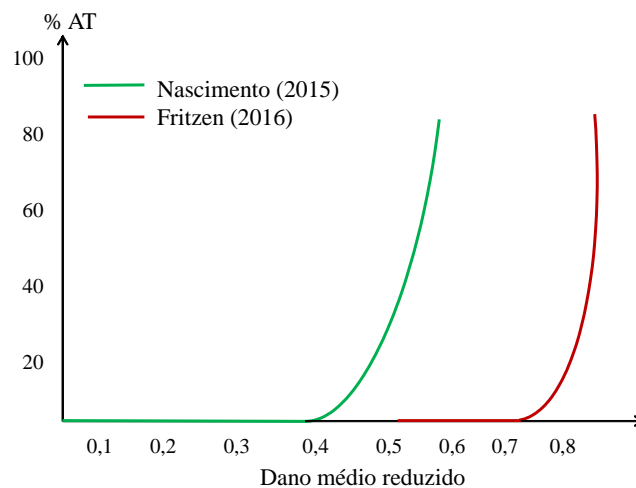
Fonte: Santiago *et al.* (2018)

Para estimar a área trincada em campo (%AT), são necessárias funções de transferência que convertem o dano simulado (D) em %AT. Santiago *et al.* (2018) ressaltam que a nível nacional, destacam-se os trabalhos de Nascimento (2015) (Equação 2.16) e Fritzen (2016), que desenvolveram funções de transferência relacionando dano por fadiga e %AT. As pesquisas diferenciam-se na abordagem (viscoelástica e elástica, respectivamente) e nos ensaios mecânicos. Na Figura 2.15 é apresentado um comparativo entre os resultados das funções de transferência desenvolvidas por Nascimento (2015) e Fritzen (2016).

$$\%AT = C_1 \left(\frac{N}{N_f} red_s \right)^{C_2} \quad (2.16)$$

Onde: $N/N_f red_s$ é definido como dano médio reduzido; C_1 e C_2 são coeficientes de regressão.

Figura 2.15 – Comparativo entre a Função de Transferência de Nascimento (2015) e Fritzen (2016)



Fonte: Santiago *et al.* (2018)

2.4 Modelos Integrados

Com objetivo de identificar os modelos integrados já desenvolvidos foi realizado levantamento na literatura nacional e internacional relacionados as águas urbanas e aos pavimentos. No trabalho de Elliott e Thornton (1988) fizeram a análise do módulo de resiliência devido a efeitos de saturação. Nesse trabalho, os efeitos das variações no módulo resiliente do subleito, em vários parâmetros de projeto e na espessura do projeto AASHTO, são examinados. Foram estudadas as variações sazonais do MR do subleito resiliente com flutuação de umidade, geradas também por processos de congelamento e descongelamento. Os autores observaram que a estimativa de sazonalidade variação de umidade ainda era incerta e a quantidade testes exigiram muito tempo.

Uma integração entre dados climáticos de temperatura e precipitação e pavimentos foi desenvolvido por Ongel e Harvey (2004). Os autores afirmam que os fatores externos que afetam o desempenho estrutural dos pavimentos são o tráfego, a ambiente e a interação dos dois. Ressaltam ainda que, incorporação de fatores climáticos no projeto de pavimentos é importante para o desenvolvimento de um procedimento de projeto mecanicista-empírico. Foram estudados os efeitos das temperaturas do pavimento e das chuvas nas estruturas de pavimentos rígidos, flexíveis e compostos. Foram comparadas seis regiões climáticas da Califórnia, definidas com base nas chuvas, e temperaturas máximas e mínimas. O relatório concluiu que as regiões climáticas deveriam ser consideradas no projeto de pavimentos. No entanto, os dados climáticos incluídos na análise tiveram uma média de 30 anos devido ao tempo limitado e à quantidade massiva de dados e cálculos.

Hansson *et al.* (2005) realizaram uma modelagem de padrões de fluxo de água em pavimentos flexíveis. Segundo os autores, a maioria dos modelos de projeto de estradas não explica explicitamente o transporte de umidade nos pavimentos, embora seja sabido que o teor de umidade desempenha um papel importante na deterioração das estradas. A aplicabilidade das teorias e métodos hidrológicos no pavimento foi estudada, sendo dada especial atenção à padrões de fluxo internos no pavimento, afetados por barreiras capilares e gerados por mecanismos de escoamento superficial, seguidos de infiltração em rachaduras e aterro. Mudanças na intensidade da chuva tiveram um pequeno efeito sobre padrões de fluxo, mas as velocidades foram maiores para intensidades de chuva maiores. As alterações nas precipitações e na condutividade de trincas e fraturas controlaram os padrões de fluxo, mas os efeitos da barreira capilar foram limitados. As análises numéricas utilizadas mostraram-se apropriadas para o estudo.

Shaw *et al.* (2005) apresentam um documento que descreve as informações disponíveis para os projetistas de infraestrutura de águas pluviais e discute maneiras simples e mais complexas de incorporar os efeitos das mudanças climáticas no projeto das águas pluviais, ilustrando o processo com um estudo de caso realizado na cidade de North Shore (Nova Zelândia) e vários cenários de mudanças climáticas.

Um sistema dinâmico para entender o impacto a longo prazo das mudanças climáticas no desempenho do pavimento e no seu custo de manutenção foi desenvolvido por Mallick *et al.* (2014). O objetivo desse trabalho foi apresentar uma estrutura dinâmica do sistema para entender o impacto a longo prazo das mudanças climáticas no desempenho do pavimento e atividade de manutenção. Resultados preliminares mostram que a longo prazo efeitos das mudanças na temperatura do ar, precipitação, aumento do nível da água do mar e número de furacões no desempenho do pavimento são significativos e espera-se que os custos aumentem significativamente (> 160% em 100 anos) e não linearmente. A partir dessas descobertas, foram feitas recomendações para obter dados mais precisos e confiáveis sobre mudanças climáticas relevantes fatores e pelo uso de uma abordagem de dinâmica de sistemas para integrar os tópicos de mudança climática, projeto e desempenho de pavimentos, e economia em estudos abrangentes.

Guedes (2015) avaliou o desempenho de pavimentos permeáveis com revestimentos do tipo Paver, Poroso e Concregrama sob diferentes condições de base, com vista no controle de escoamento superficial na fonte. Nesse trabalho, foram estudados eventos de chuva através de um simulador e analisados nove pavimentos permeáveis avaliados. Os resultados indicaram uma redução de mais de 50% do escoamento superficial e o retardo em média de 17 minutos do escoamento superficial, bem como o armazenamento temporário das águas pluviais.

Sabóia (2016) avaliou o impacto dos possíveis cenários de mudanças climáticas nos sistemas de drenagem urbana, além disso, foram estimados os custos de implantação desses sistemas baseados nos vários cenários de mudanças climáticas estudados e proposto uma solução robusta para o problema de otimização de custos. Os resultados mostraram que devem ocorrer grandes aumentos nas vazões e volumes escoados no sistema de drenagem analisado, sendo que o cenário RCP 8,5 apresentou valores ainda mais acentuados do que o gerado pelo cenário RCP 4,5.

Conforme citado por Stoner *et al.* (2019) o projeto de pavimentos flexíveis exige a consideração de vários fatores, incluindo os materiais utilizados, variações nos lençóis freáticos, níveis de tráfego e as condições climáticas que a estrada experimentará ao longo de sua vida

útil. Os autores afirmam que a maioria dos projetos de pavimentos é baseada em variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, que já estão mudando em grande parte dos Estados Unidos e não reflete as tendências projetadas. Como os pavimentos geralmente são projetados para durar 20 anos ou mais, os projetos que não representam tendências atuais e futuras podem resultar em desempenho reduzido. Contudo, incorporar projeções climáticas nos projetos de pavimentos não é um exercício trivial. Desacoplamentos significativos em escala espacial e temporal desafiam a integração das últimas simulações de modelo climático global em modelos de pavimentos. O impacto de três diferentes climas futuros no desempenho do pavimento e tempo para atingir os limites de falha em 24 locais nos Estados Unidos foram quantificados. As alterações no desempenho projetado do pavimento diferem de acordo com o local, mas quase todas resultam em menor desempenho nos padrões atuais de projeto. Os maiores aumentos de falha são observados para medidas de deformação permanentes, especialmente no final do século, sob maiores aumentos de temperatura.

2.5 Considerações Parciais

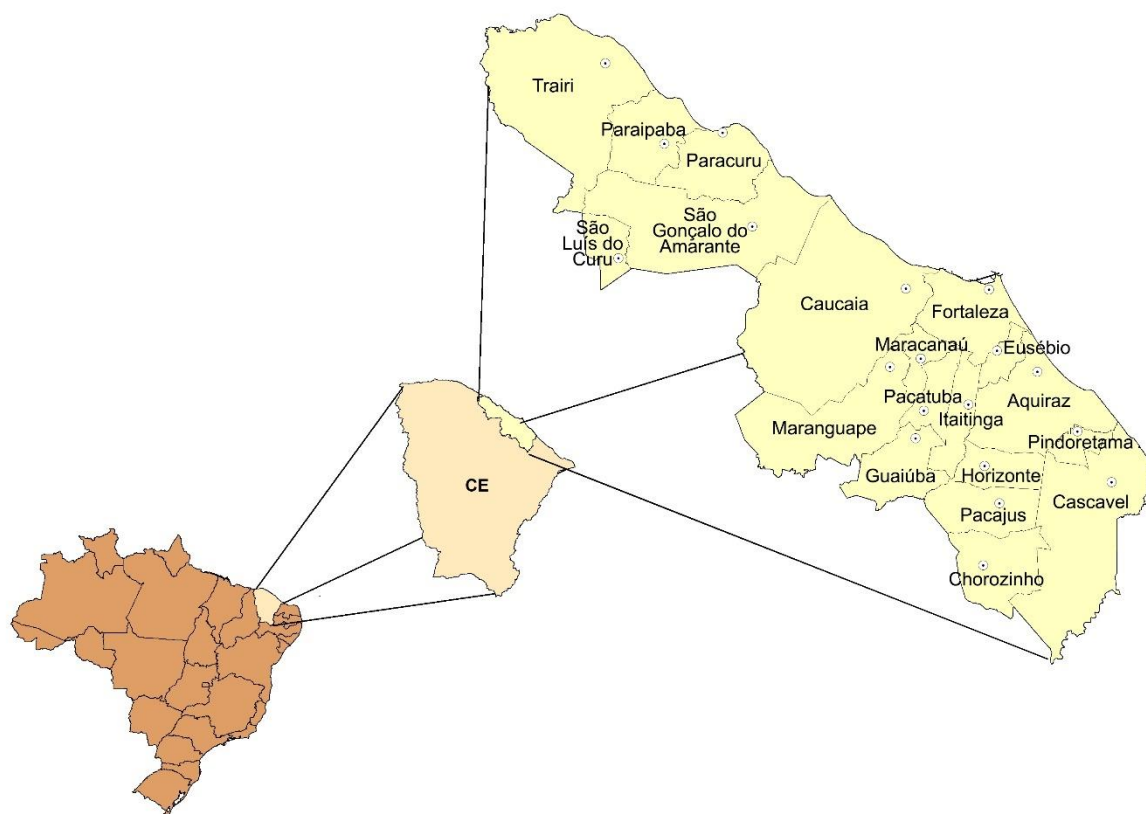
O estudo dos subsistemas clima, hidrologia, fluxo em meio poroso e pavimentos permitiu caracterizar e identificar as variáveis de ligação mais importantes entre cada um destes, a fim de desenvolver a metodologia integrada. Ademais, os levantamentos de outros trabalhos de modelagem integrada agregaram a visão de conjunto necessária para a aplicação da metodologia.

Dessa forma, foi possível definir quais os principais aspectos a serem caracterizados na região de aplicação da metodologia: infraestrutura local, caracterização geológico-geotécnica e aspectos climáticos e hidrológicos.

3 LOCAL DE ESTUDO: REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

O local escolhido para a aplicação da metodologia foi a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), localizada no nordeste do Estado do Ceará (Figura 3.1), ocupando uma área de 7.440,1 km². Atualmente, a região é composta por 19 municípios: Fortaleza, Caucaia, Maranguape, Pacatuba, Aquiraz, Maracanaú, Eusébio, Guaiúba, Itaitinga, Chorozinho, Pacajus, Horizonte, São Gonçalo do Amarante, Pindoretama, Cascavel, Trairi, Paraipaba, São Luís do Curu e São Gonçalo do Amarante (IPECE, 2017).

Figura 3.1 – Região Metropolitana de Fortaleza



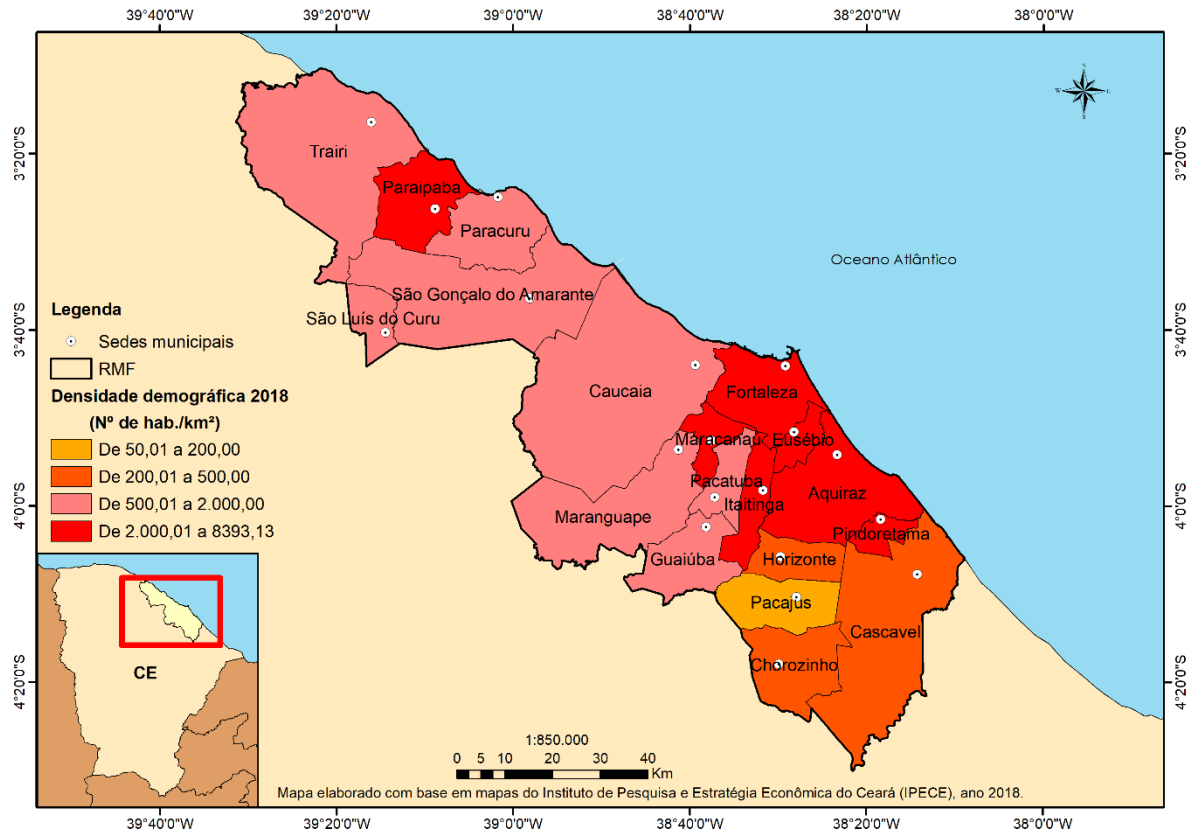
Fonte: Elaboração própria (Dados IPECE, 2017)

3.1 Demografia, Economia e Infraestrutura de Transportes

A RMF é 6^a região metropolitana mais populosa do Brasil e a mais populosa do Nordeste, com 4.074.730 milhões de habitantes (IBGE, 2018), com densidade demográfica média de 544,58 hab/km² (Figura 3.2). Quanto às características econômicas da região, nos limites dos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia está inserido o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), além de polos industriais de Maracanaú e Horizonte-

Pacajus. A indústria da RMF é diversificada em vários setores (vestuário, alimentos, metalurgia, têxtil e químico). Além disso, o turismo é outra atividade que impacta fortemente na economia da RMF (IPECE, 2017).

Figura 3.2 – Densidade Demográfica RMF

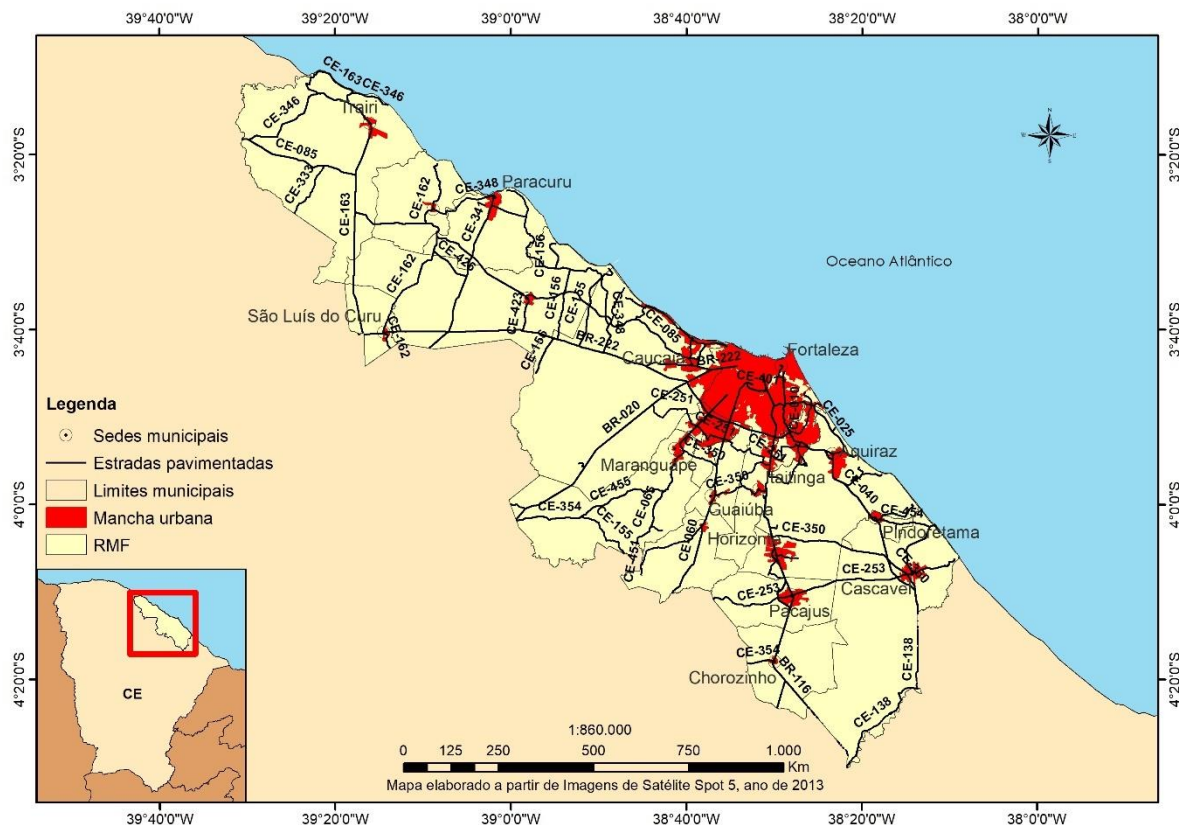


Fonte: Elaboração Própria (Dados IPECE, 2017)

A RMF possui uma malha viária constituída por ++, sendo 3 federais (BR-222, BR-020, BR-116) e 13 estaduais (CE-025, CE-040, CE-060, CE-065, CE-085, CE-090, CE-138, CE-156, CE-163, CE-253, CE-341, CE-350, CE-348). Existem ainda 20 rodovias estaduais pavimentadas de ligação que se estendem pelos municípios adjacentes a RMF (RIBEIRO, 2013).

O processo de urbanização e crescimento da região tem aumentado ao longo dos anos, sendo que os municípios com maiores taxas de urbanização no ano 2010, no Estado do Ceará, foram Fortaleza (100,00%), Eusébio (100,00%), Maracanaú (99,57%) e Itaitinga (99,30%) (IPECE, 2017), todos pertencentes a RMF. É possível observar através da Figura 3.3 que diferentes zonas urbanas são conectadas por rodovias que permitem o transporte de produtos e pessoas na região.

Figura 3.3 – Manchas Urbanas e Rodovias



Fonte: Elaboração Própria (Dados IPECE, 2017)

3.2 Aspectos Climáticos e Hidrológicos

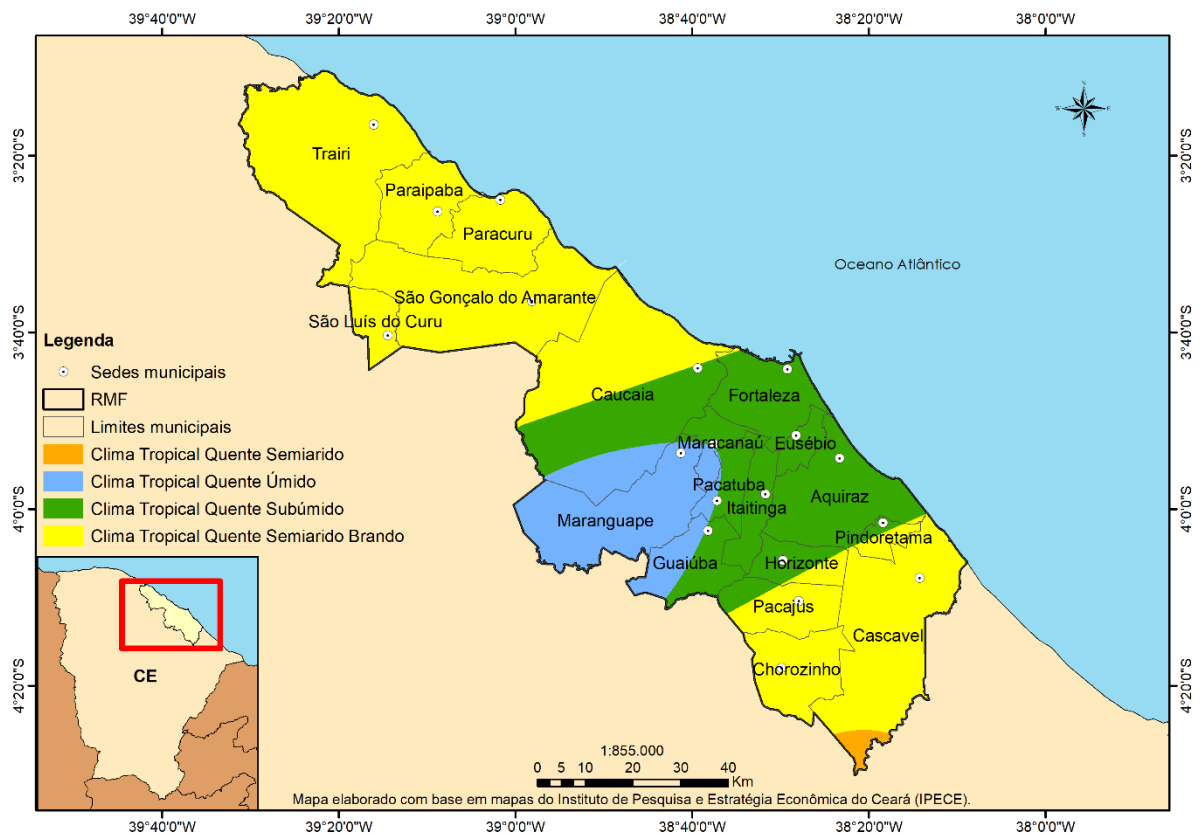
As características climáticas da RMF, assim como o Nordeste brasileiro, são representadas pela sazonalidade das chuvas e por elevadas temperaturas o ano todo. Conforme Magalhães *et al.* (2011) ressaltam, a RMF se encontra mais próxima ao oceano, sofrendo influência marítima e, conseqüentemente, apresenta temperaturas mais amenas do que outras regiões do interior do Estado. A região apresenta, ainda, um índice de pluviosidade média anual de aproximadamente 1500 mm, com período chuvoso predominante entre os meses de janeiro a maio.

Magalhães (2011) explica que a baixa altimetria da região favorece a entrada dos sistemas atmosféricos provenientes do oceano, principalmente os apresentados no Capítulo 2. As regiões das serras de Maranguape e Pacatuba formam barreiras topográficas que são capazes de gerar chuvas orográficas apenas em condições de contato com nuvens de baixa altitude. O mesmo autor afirma também que as atividades humanas, sobretudo a partir de meados do século XX, são responsáveis por muitas mudanças na paisagem da região metropolitana através do

desmatamento, agricultura, urbanização e industrialização que refletem diretamente na configuração climática em escala local.

Conforme apresentado na Figura 3.4, as regiões climáticas da RMF podem ser divididas em: Clima Tropical Quente Semiárido, Clima Tropical Quente Úmido, Clima Tropical Quente Subúmido e Clima Tropical Quente Semiárido Brando (IPECE, 2017).

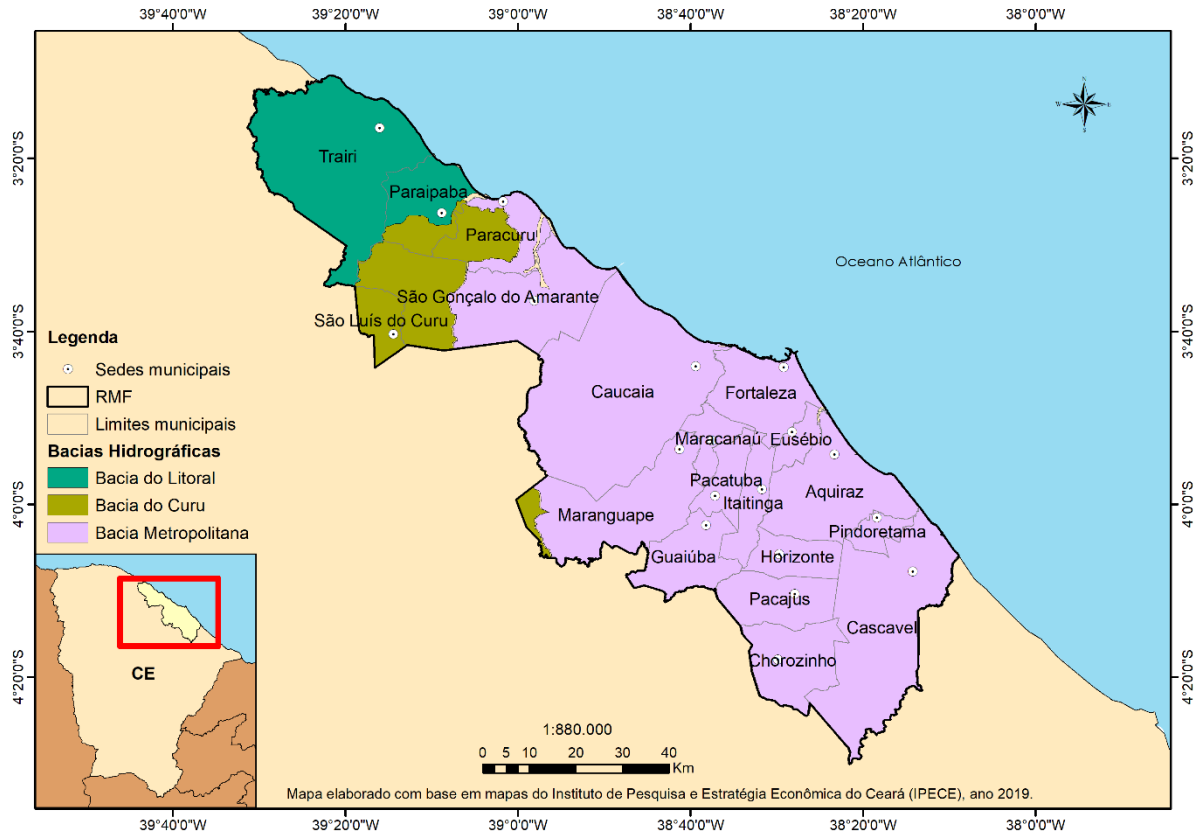
Figura 3.4 – Clima Região Metropolitana de Fortaleza



Fonte: Elaboração Própria (Dados IPECE, 2017)

Na Figura 3.5 é possível observar as bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Fortaleza, estas podem ser divididas em: Bacia do Litoral, Bacia do Curu e Bacia Metropolitana.

Figura 3.5 – Bacias Hidrográficas Região Metropolitana de Fortaleza



Fonte: Elaboração Própria (Dados IPECE, 2017)

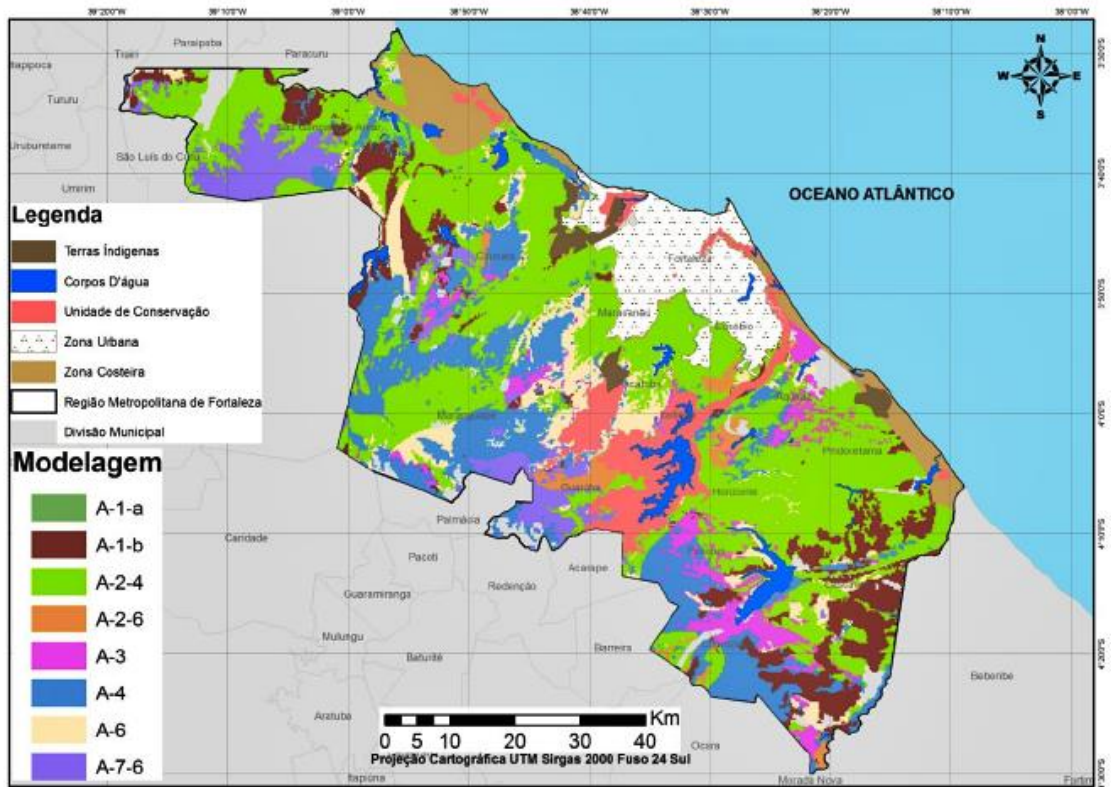
3.3 Características Geológico - Geotécnicas

A Região Metropolitana de Fortaleza é caracterizada geologicamente pela presença de terrenos cristalinos (rochas ígneas e metamórficas), sedimentos cenozoicos e coberturas recentes residuais e transportados (elúvio, colúvio e alúvio) (CAVALCANTE, 1998).

Quanto às características geotécnicas da região para fins de pavimentação, destaque-se o modelo desenvolvido por Ribeiro (2013). No citado trabalho, a Classificação AASHTO foi generalizada para toda a RMF com índice de acerto superior a 90%. Conforme pode ser observado na Figura 3.6, os solos do tipo A-2-4 têm maior predominância, ocupando cerca de 48% da área total da região. É possível observar, também, que os solos A-1-a representam áreas muito pequenas (menos de 0,5%), ficando imperceptíveis no mapa.

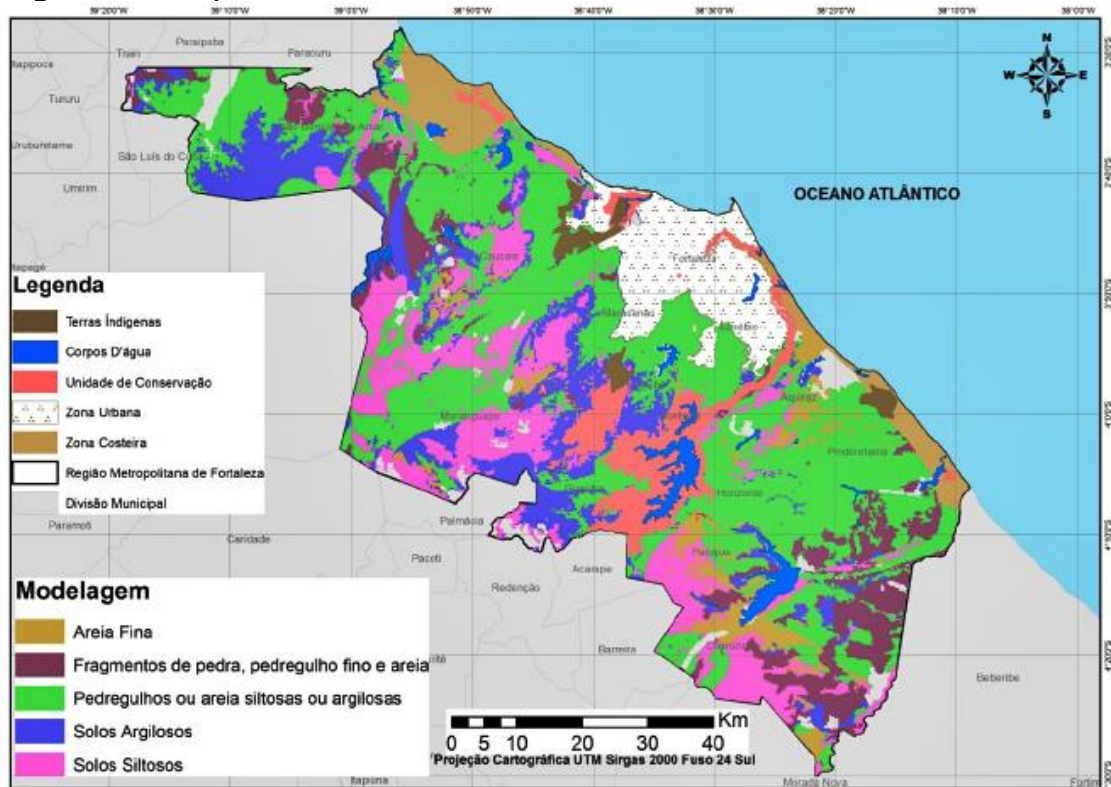
Analisando a Figura 3.7 é possível verificar que cerca de 50% dos solos presentes da RMF são constituídos de pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas; solos siltosos representam 19,80% e solos argilosos 15,15%; os solos que menos aparecem são areias finas (5%).

Figura 3.6 – Mapa da Classificação AASHTO em Grupos da RMF



Fonte: Ribeiro (2013)

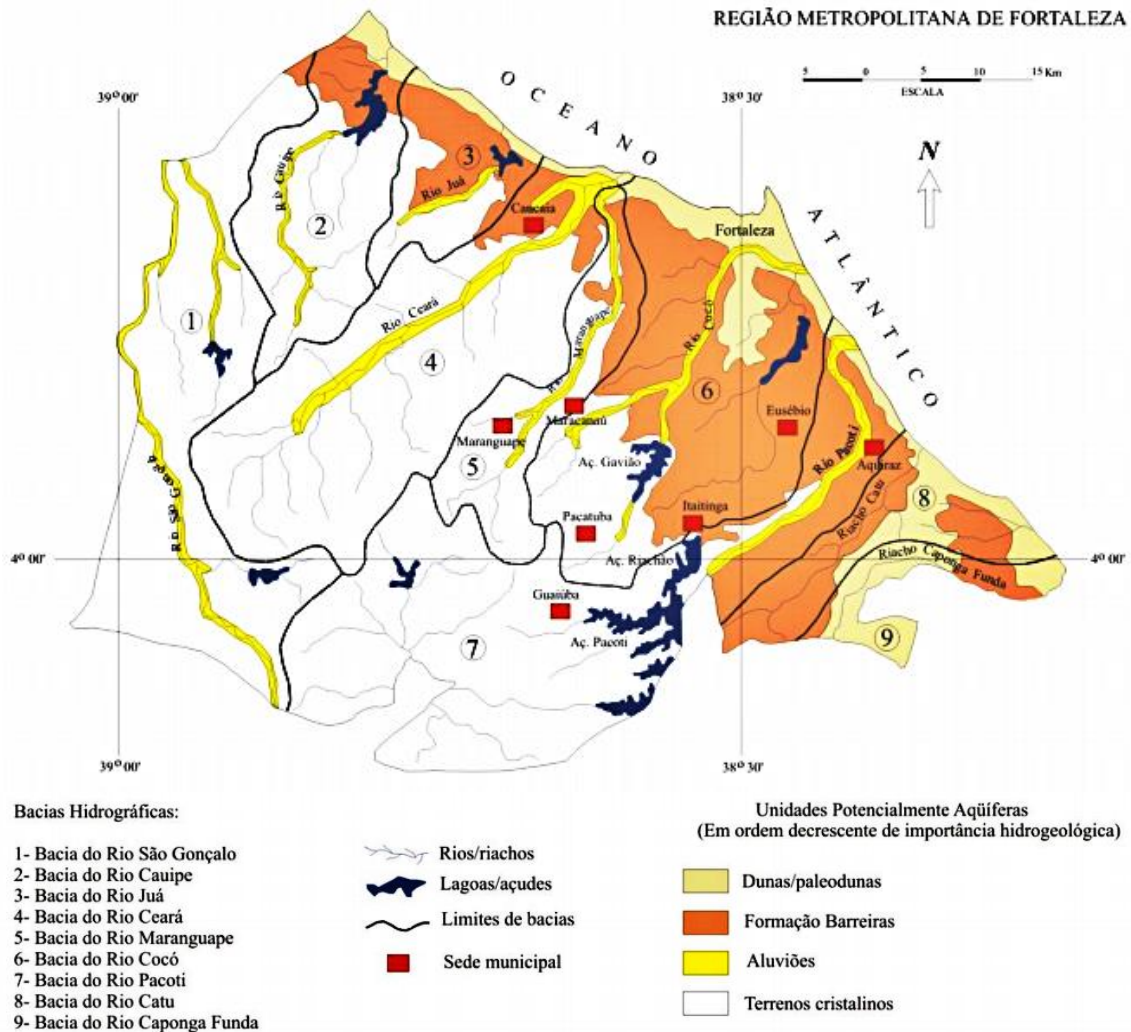
Figura 3.7 – Mapa de Materiais Geotécnicos da RMF



Fonte: Ribeiro (2013)

Cavalcante (1998) afirma que quanto aos sistemas hidrogeológicos, a RMF apresenta quatro sistemas de aquíferos: dunas/paleodunas, barreiras, aluviões e rochas do embasamento cristalino (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Distribuição dos Sistemas de Aquíferos da RMF



Fonte: Cavalcante, 1998

Cavalcante (1998) mapeou os dados de 4.465 poços em toda a RMF, identificando as características das águas subterrâneas da região, dentre as características dos níveis de água estático estão:

- Embasamento cristalino: 40% com nível freático até 5 m, 41% de 5 a 10 m e 19% superior a 10 m;
- Barreiras: 27% com nível freático até 5 m, 41% de 5 a 10 m e 32% superior a 10 m;

- Dunas e Paleodunas: região com profundidade máxima do nível freático até 10 m. Nível freático médio oscilando entre 3,0 m a 5,0 m;
- Aluviões: região com nível freático inferior a 2 m.

3.4 Cidade de Fortaleza

A ocupação das áreas da cidade de Fortaleza, assim como na maioria dos grandes centros urbanos, ocorreu de forma desordenada e sem que existisse planejamento, com isso, as margens dos rios foram ocupadas, os cursos naturais dos rios e riachos foram sendo alterados e algumas lagoas foram aterradas. Tais mudanças no escoamento natural das águas das chuvas, intensificam a magnitude dos picos de cheias e aumentam a velocidade de escoamento, ocasionando alagamentos, conforme observado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Alagamentos na cidade de Fortaleza (a) Bairros Centro/Aldeota (b) Bairro Rodolfo Teófilo (c) Bairro Parangaba (d) Bairro Damas



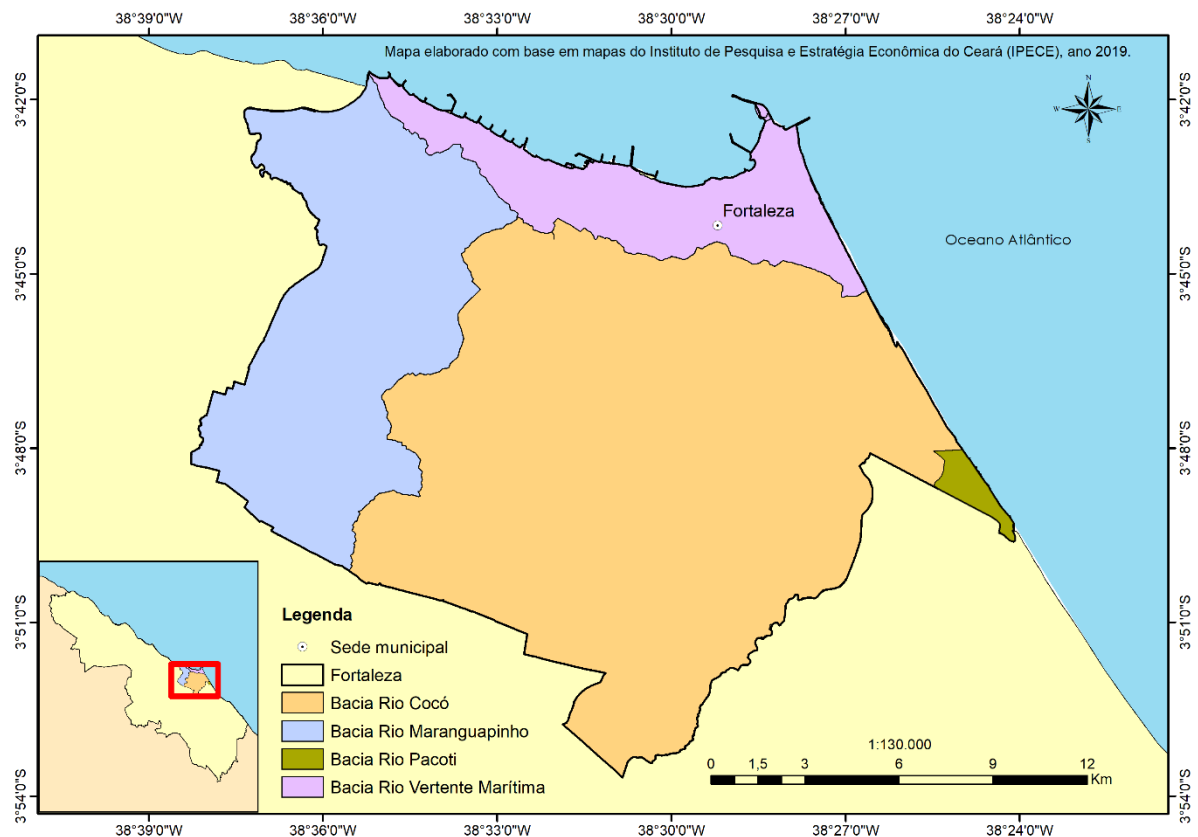
Fonte: Jornal Diário do Nordeste (2019), Tribuna do Ceará (2019)

Em áreas com alta taxa de urbanização, como a cidade de Fortaleza, grande parte da superfície terrestre encontra-se impermeabilizada, por isso, infiltrações laterais dificilmente

ocorrem nos pavimentos. Nesse caso, conforme apresentado na Figura 3.9, sobre o pavimento atuará uma carga hidráulica durante o evento de uma chuva intensa.

A partir da caracterização da bacia hidrográfica é possível realizar as estimativas de vazão para condições de chuvas intensas. As bacias hidrográficas da cidade de Fortaleza podem ser divididas em: Bacia Vertente Marítima, Bacia do Rio Maranguapinho, Bacia do Rio Cocó e Bacia do Rio Pacoti, conforme observado na Figura 3.10.

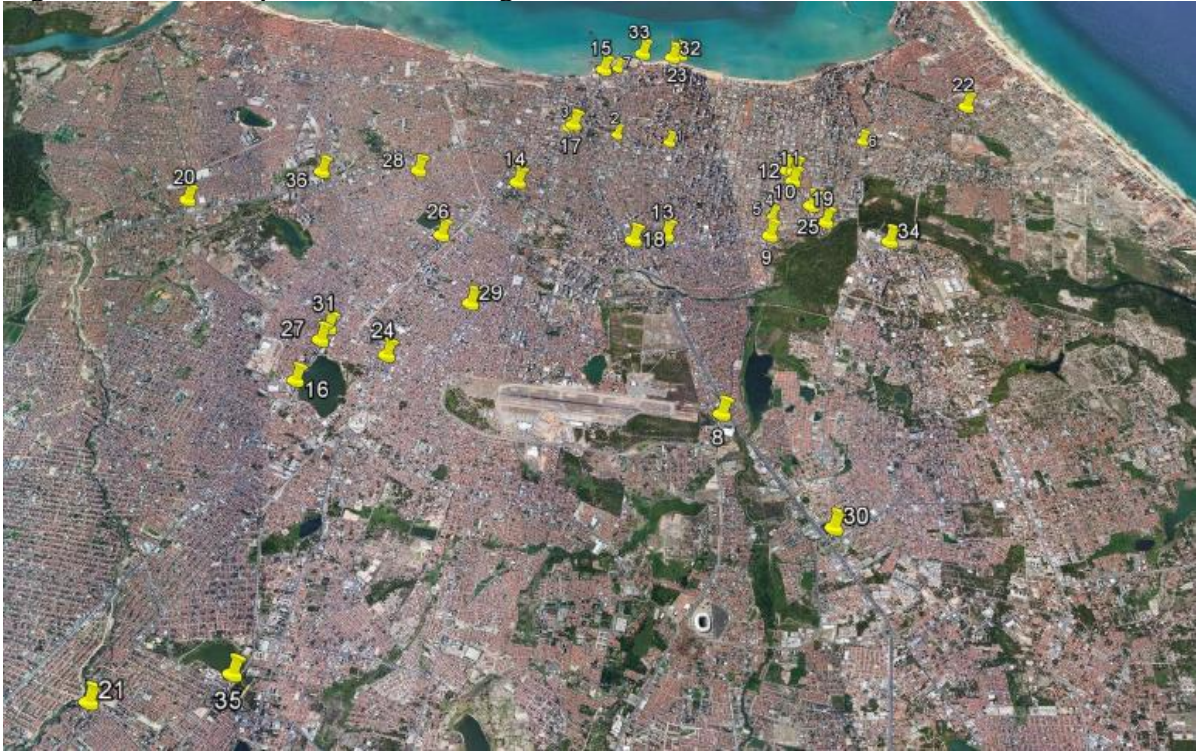
Figura 3.10 – Bacias Hidrográficas da Cidade de Fortaleza



Fonte: Elaboração própria (Dados IPECE, 2017)

Sabóia (2016) fez um levantamento na cidade de Fortaleza, a respeito dos principais e recorrentes pontos de alagamentos no período de 2010 a 2016. Na Figura 3.11 é possível observar um total de 36 locais de alagamentos, com pontos em todas as bacias hidrográficas da região e, conforme citado por Sabóia (2016), são trechos que possuem deficiências em seu sistema de drenagem urbana.

Figura 3.11 – Principais Pontos de Alagamento na Cidade de Fortaleza



Fonte: Sabóia (2016)

3.5 Considerações Parciais

Após a caracterização da região de estudo e com a base de informações levantadas no Capítulo 2, foi possível desenvolver a metodologia integrada para o projeto de infraestruturas em ambiente urbano. A definição das características de cada um dos subsistemas estudados permitiu a escolha e desenvolvimento de modelos que melhor se adequaram as condições locais da Região Metropolitana de Fortaleza.

4 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia que permita a integração de variáveis climáticas, hidrológicas e o projeto de pavimentos. De tal forma que seja possível analisar o seu desempenho frente às características climáticas atuais e futuras. A metodologia desenvolvida pode ser empregada em diversas regiões, sendo aqui apresentada a aplicação da pesquisa para a RMF. Neste capítulo são apresentadas todas as etapas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa, detalhando as hipóteses e as simplificações adotadas.

4.1 Estratégia Geral

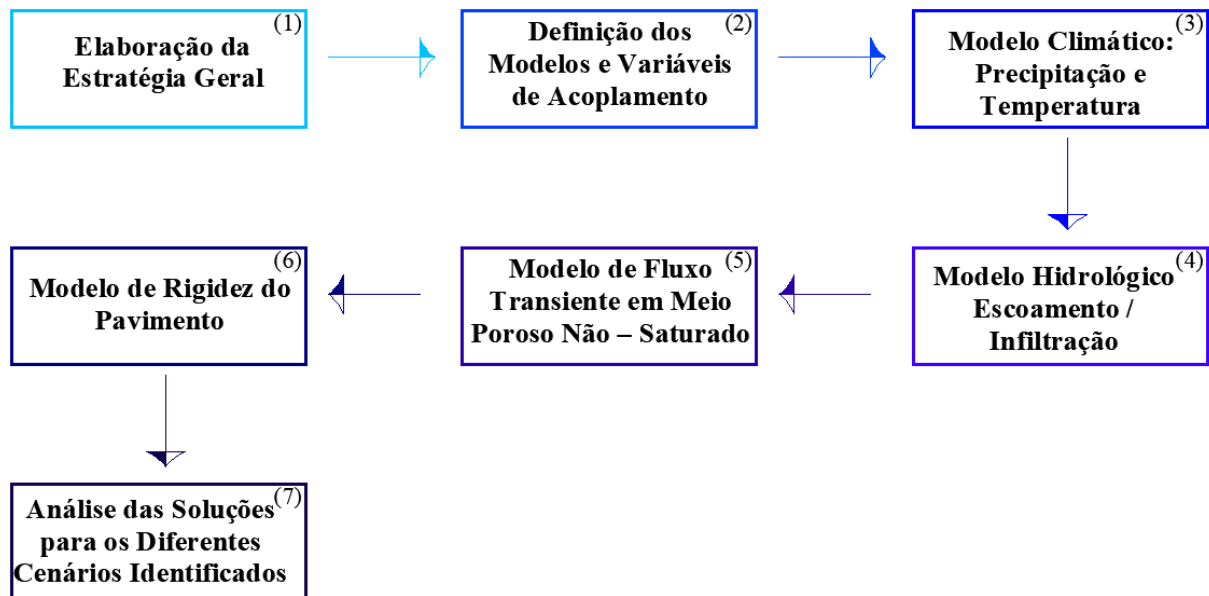
Uma das principais etapas do trabalho foi a definição da estratégia geral, visto que as estruturas dos sistemas viário, hidrológico e de drenagem urbana são compostas por uma grande variabilidade de materiais, além de diferentes condições ambientais (clima, nível freático, entre outros), o que implica na necessidade de simplificações para a realização de análises integradas.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário produzir um método robusto, de forma que possibilitasse conectar os diferentes sistemas que compõem o clima, os sistemas de águas urbanas e os pavimentos, mas que representasse um modelo simplificado das condições reais e com variáveis já conhecidas e disponíveis no meio técnico e acadêmico, permitindo assim sua aplicação. Para tal, seguiu-se as seguintes fases (Figura 4.1):

- 1ª Etapa: Elaboração da estratégia geral para acoplamento dos diferentes modelos;
- 2ª Etapa: Definição e caracterização dos modelos e variáveis que serão utilizadas no acoplamento;
- 3ª Etapa: Modelo climático: condições de precipitação para o clima atual e clima futuro;
- 4ª Etapa: Definição das condições de escoamento e infiltração do modelo hidrológico;
- 5ª Etapa: Modelagem de fluxo transiente em meio poroso não saturado;
- 6ª Etapa: Desenvolvimento de modelo de rigidez do pavimento, incorporando as variáveis de integração;

- 7ª Etapa: Análise das variações climáticas e consequências no desempenho de pavimentos asfálticos para diferentes cenários analisados.

Figura 4.1 – Estratégia Geral



Fonte: Elaboração própria

4.2 Modelos e Variáveis de Integração

Inicialmente, foram identificados e caracterizados cada um dos modelos para desenvolvimento da metodologia (cada um desses modelos é detalhado nos tópicos seguintes deste capítulo):

- *Modelo climático*: precipitação para o clima atual e o clima futuro e temperatura;
- *Modelo hidrológico*: condições de escoamento e infiltração na bacia hidrográfica e sobre os pavimentos;
- *Modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado*: caracterização do fluxo nas camadas do pavimento;
- *Modelo de rigidez do pavimento*: variações de rigidez das camadas do pavimento, devido às variações climáticas.

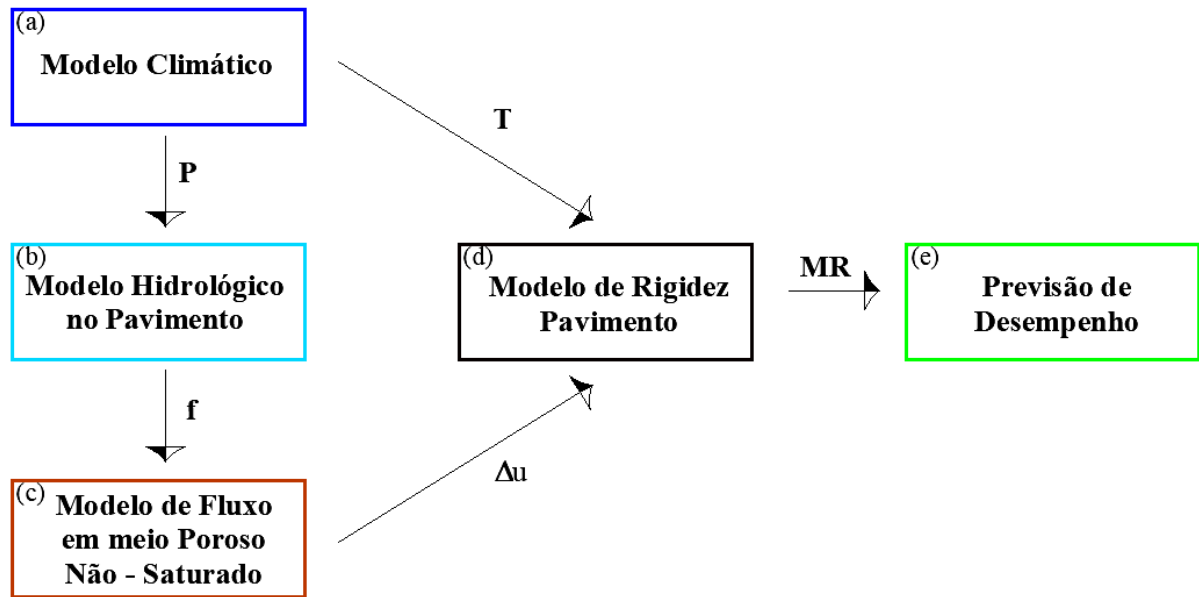
Identificados os modelos, foi necessária a compreensão de como esses diferentes sistemas se relacionam e quais as variáveis mais importantes de ligação entre si. Nessa etapa, verificou-se a necessidade de se diferenciar os pavimentos rodoviários e urbanos, uma vez que as condições hidrológicas (escoamento e infiltração) a que esses estão submetidos são específicas em cada caso.

Para pavimentos rodoviários, o esquema metodológico para o projeto integrado da infraestrutura viária é apresentado na Figura 4.2. Nessa concepção, a partir do modelo climático, são extraídas informações de precipitação (P) e temperatura (T) da região de estudo. A partir da definição do modelo hidrológico, são caracterizadas as condições de escoamento e infiltração (f) utilizando dados de chuva (P) como entrada. A resposta do modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado é a variação da umidade (Δu) nas diferentes camadas do pavimento, que ocorre devido a infiltração (f). A alteração da umidade (Δu) provoca mudanças na rigidez (MR) dos materiais granulares. Por fim, essas alterações levam a variação do desempenho das infraestruturas que podem ser estimadas através de modelos matemáticos.

Os pavimentos urbanos, conforme apresentado no Tópico 3.1.4, em geral, encontram-se em áreas com altos níveis de impermeabilização (além da impermeabilização gerada pelo revestimento asfáltico), por isso dificilmente ocorrem condições de infiltração lateral. Nesse caso, o que ocorre é a formação de lâminas de água sobre o pavimento durante eventos de chuvas intensas, conforme observado na Figura 3.9.

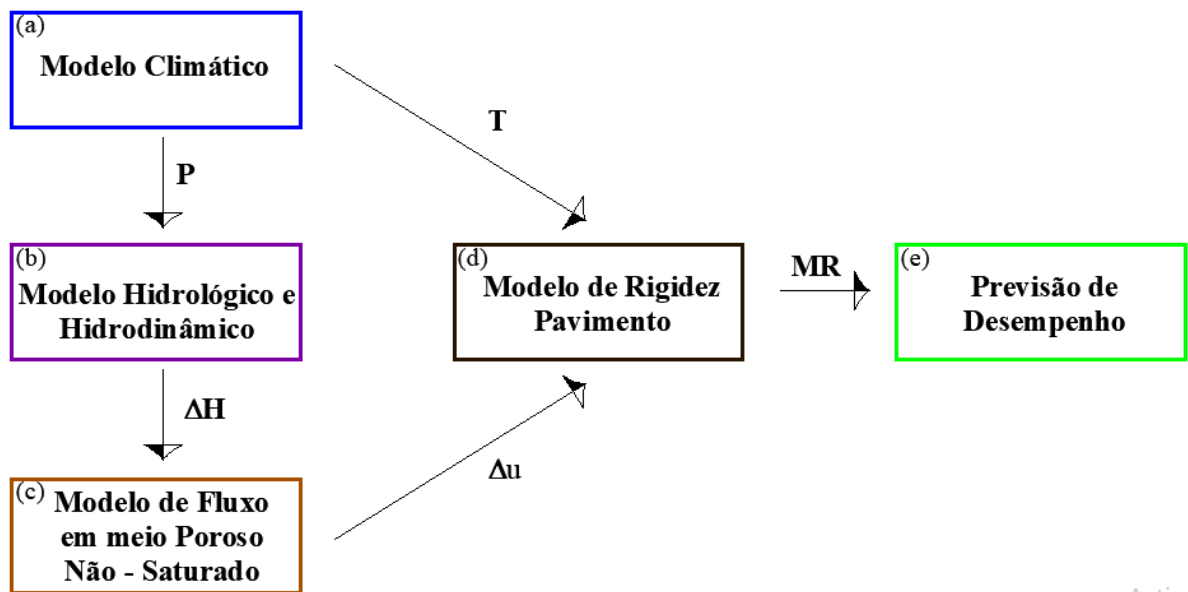
O esquema metodológico utilizado nesta pesquisa para pavimentos urbanos é apresentado na Figura 4.3, que em muito se assemelha à Figura 4.2. A sequência geral da metodologia para esse tipo de pavimento é praticamente a mesma dos pavimentos rodoviários. Onde, a partir do modelo climático, são obtidas informações de precipitação (P) e temperatura (T). Porém, a etapa seguinte requer um modelo hidrológico e hidrodinâmico para simular as condições de vazões na bacia analisada e estimar as cargas hidráulicas (ΔH), acima do pavimento, geradas pelo excesso de escoamento. Nessas condições, o dado de entrada para o modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado é a variação da carga hidráulica (ΔH), como dado de saída tem-se a variação da umidade (Δu) no período analisado. As fases subsequentes do esquema metodológico prosseguem na mesma ordem que para os pavimentos rodoviários (Modelo de Rigidez do Pavimento \rightarrow Previsão de Desempenho).

Figura 4.2 – Esquema metodológico para o projeto integrado de pavimentos rodoviários



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.3 – Esquema metodológico para o projeto integrado de pavimentos urbanos



Fonte: Elaboração própria

Activz

4.3 Modelo Climático

Para o modelo climático, as principais condições analisadas foram as precipitações, considerando o clima atual e o clima futuro. A escolha de estudar as projeções climáticas futuras foi feita, uma vez que ao utilizar apenas dados climáticos históricos, assume-se que o clima é estacionário com o tempo, porém, as mudanças climáticas desafiam essa suposição de

estacionariedade. Desta forma, o uso de dados históricos é insuficiente para a previsão das condições climáticas em projetos robustos.

No entanto, incorporar projeções climáticas ao projeto de pavimentos não é um exercício trivial. A integração das mais recentes simulações de modelos climáticos globais em modelos de pavimento é uma tarefa complexa (STONER *et al.*, 2019). Para os modelos de mudanças climáticas foram utilizados de 5 *General Circulation Models* (GCMs) para a região estudada (Tabela 4.1), considerando as projeções RCPs 4.5 e 8.5 (Tabela 2.1) do CMIP5. Esses modelos foram escolhidos por terem sido avaliados por Silveira *et al.* (2013) quanto à sua capacidade de representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre o nordeste setentrional do Brasil. Silveira *et al.* (2016) também estudaram projeções das precipitações futuras na bacia do Rio São Francisco, além de terem sido utilizadas por Sabóia *et al.* (2017) para aplicações na cidade de Fortaleza.

Tabela 4.1 – GCMs utilizados

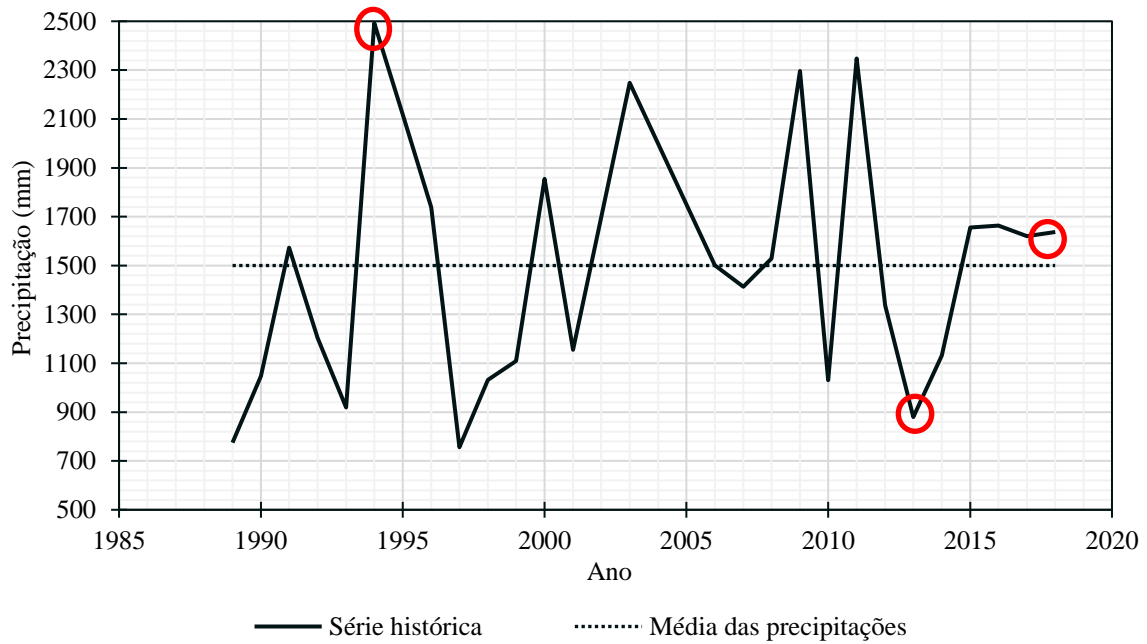
Designação do Modelo	País	Instituição ou Agência
BCC-CM1	China	<i>Beijing Climate Center</i>
CanESM2	Canadá	<i>Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis</i>
CESM1-CAM4	USA	<i>National Center of Atmospheric Research</i>
inmcm4	Rússia	<i>Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4</i>
MIROC5	Japan	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>

Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Pavimentos Rodoviários

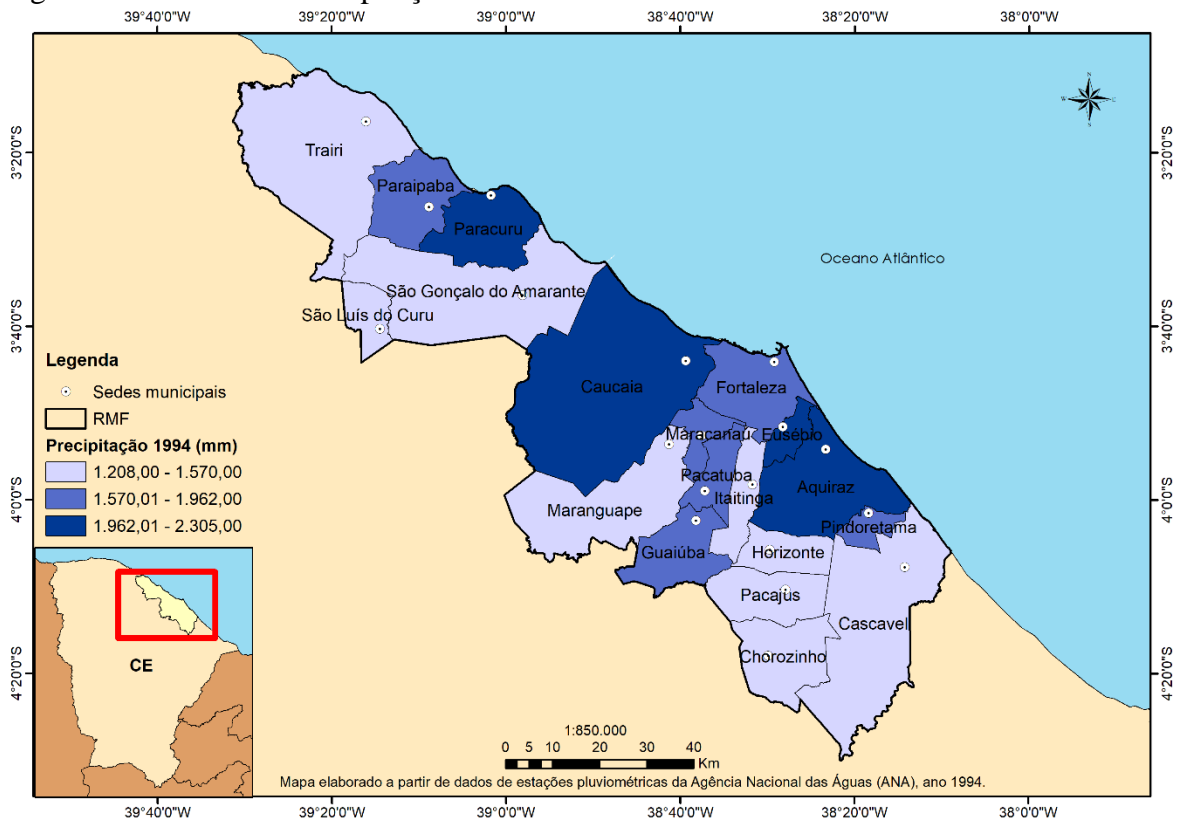
Para a condição de clima atual, ao considerar a análise do clima associada aos pavimentos rodoviários, foram escolhidos três anos da série histórica de precipitações do posto pluviométrico do Pici. Conforme observado na Figura 4.4, escolheu-se um ano com precipitações acima da média, um ano abaixo da média e, por fim, um ano próximo à média, sendo esses respectivamente, 1994, 2013 e 2018. Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 podem ser observadas as precipitações médias em cada uma das cidades da RMF, nos anos estudados na série histórica.

Figura 4.4 – Série Histórica de Precipitações Posto Pluviométrico do Pici



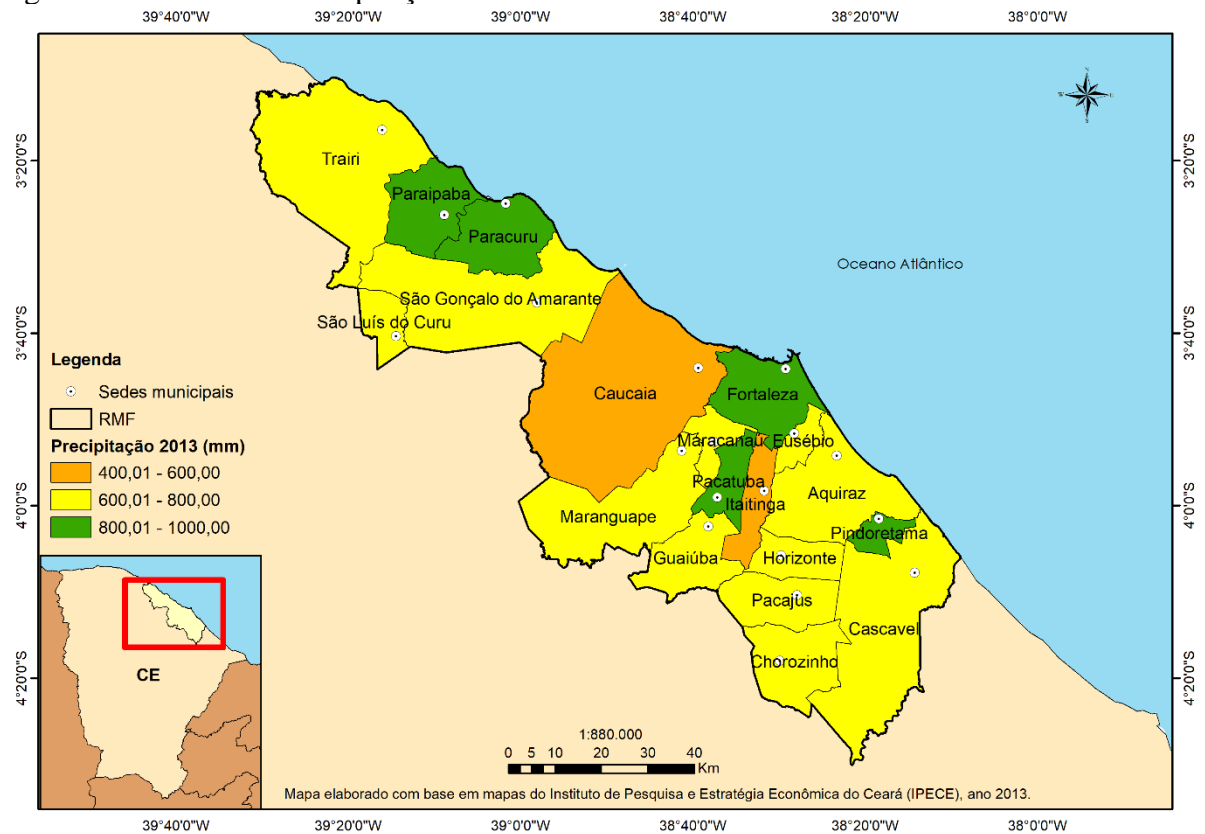
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.5 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 1994



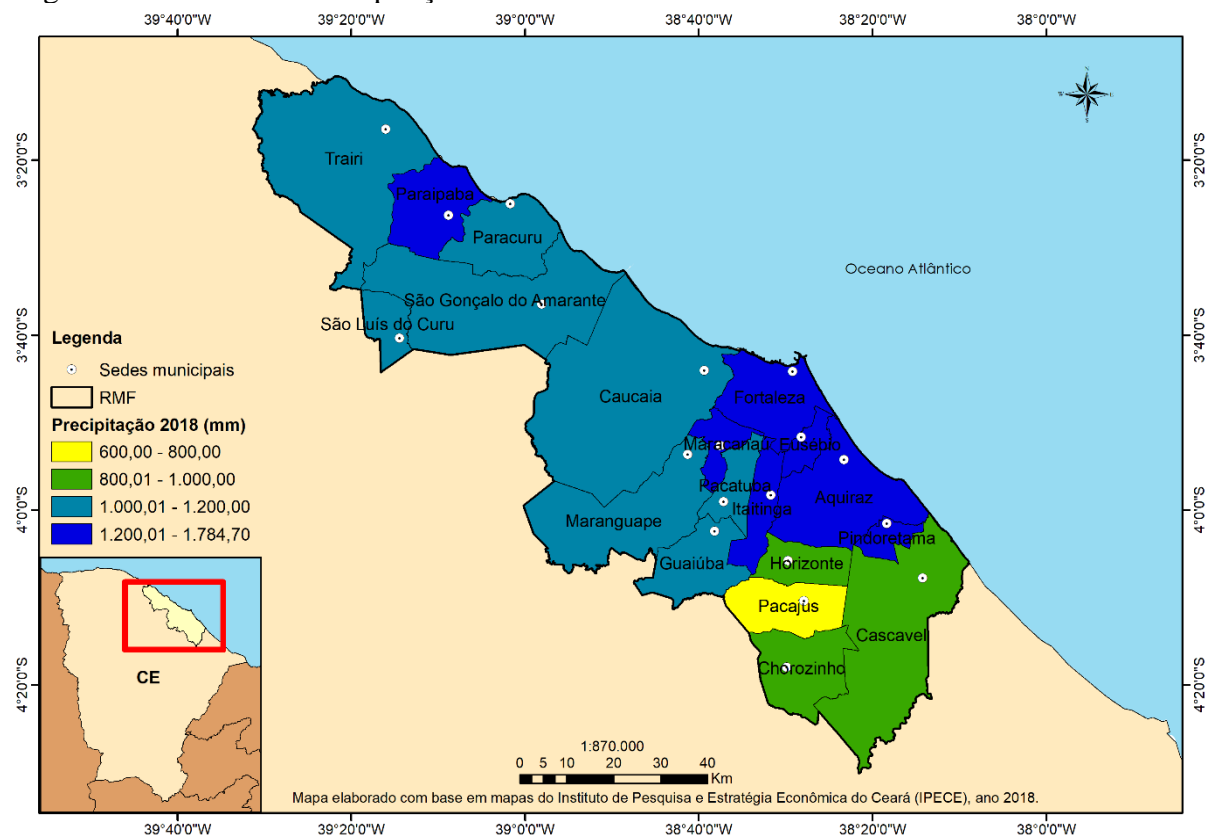
Fonte: Elaboração própria (Dados IPECE, 2017)

Figura 4.6 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 2013



Fonte: Elaboração própria (Dados IPECE, 2017)

Figura 4.7 – Média de Precipitações nas Cidades da RMF: Ano de 2018



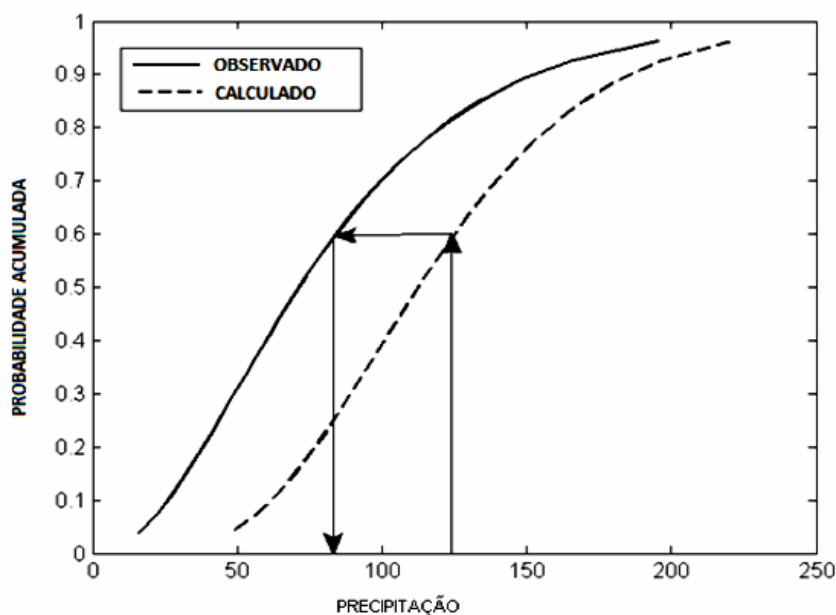
Fonte: Elaboração própria (Dados IPECE, 2017)

Para as projeções de clima futuro, os dados foram extraídos no sítio eletrônico do CMIP5 (<http://cmippcmdi.llnl.gov/cmip5/>). Foram coletados dados de precipitação mensal para a região, porém esses dados precisam ser corrigidos. Conforme citado por Fernandes (2012) e Silveira *et al.* (2015), um modelo probabilístico muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas é a distribuição gama, pois apresenta versatilidade de formas e coeficientes de assimetria das variáveis. Para a correção, utilizando a distribuição gama, foi utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1º Passo – Realizar o ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2º Passo – Ajustar a distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para o século XX, a fim de identificar o problema no ajuste do viés;
- 3º Passo – Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos do século XXI;
- 4º Passo – Corrigir as precipitações do século XX e XXI;

Na Figura 4.8 é possível observar a relação entre a probabilidade acumulada e a precipitação. O mapeamento da probabilidade, assim como nos trabalhos de Fernandes (2012) e Silveira *et al.* (2015), foi utilizado para correção do viés da precipitação mensal baseando-se em duas funções de distribuição acumulativa (FDA), sendo uma função gerada por meio dos dados observados e outra por meio de dados calculados. Cada FDA encaixa-se com uma distribuição gama, salvando os parâmetros de forma e escala. Maiores detalhes da correção estatística podem ser encontrados no trabalho de Fernandes (2012).

Figura 4.8 – Correção de Viés: Função Gama



Fonte: Fernandes, 2012

No Apêndice A é disponibilizada a relação entre a probabilidade acumulada das precipitações históricas e das precipitações para os modelos de mudança climática utilizando a correção do viés.

Uma das análises das projeções dos modelos de mudança do clima foram os cálculos das anomalias de precipitações máximas, mínimas e médias, medidas através da variação percentual, calculadas como a diferença o cenário do século XXI e o cenário histórico, conforme equações a seguir:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}^{XXI} - P_{m\acute{a}x}^{XX}}{P_{m\acute{a}x}^{XX}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$A_{m\acute{i}n} = \frac{P_{m\acute{i}n}^{XXI} - P_{m\acute{i}n}^{XX}}{P_{m\acute{i}n}^{XX}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$$A_{med} = \frac{P_{med}^{XXI} - P_{med}^{XX}}{P_{med}^{XX}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Onde: $A_{m\acute{a}x}$ é a anomalia de precipitação máxima; $P_{m\acute{a}x}^{XXI}$ é a precipitação máxima para o cenário do século XXI; $P_{m\acute{a}x}^{XX}$ é a precipitação máxima para o cenário histórico; $A_{m\acute{i}n}$ é a anomalia de precipitação mínima; $P_{m\acute{i}n}^{XXI}$ é a precipitação mínima para o cenário do século XXI; $P_{m\acute{i}n}^{XX}$ é a precipitação mínima para o cenário histórico; A_{med} é a anomalia de precipitação média; P_{med}^{XXI} é a precipitação média para o cenário do século XXI; P_{med}^{XX} é a precipitação média para o cenário histórico.

4.3.2 Pavimentos Urbanos

Para os pavimentos e bacias urbanas foram estudadas condições de chuvas intensas considerando a Equação IDF (intensidade – duração – frequência). Para a cidade de Fortaleza existem equações que foram desenvolvidas pela Autarquia Metropolitana de Fortaleza (AUMEF) (Equação 4.4), por Matos Neto e Fraga (1983) (Equação 4.5) e por Silva *et al.* (2013) (Equação 4.6). A equação da AUMEF é adotada oficialmente pela Secretaria de Infraestrutura do Município de Fortaleza (SEINF) e utilizada para os projetos de drenagem urbana na Região Metropolitana de Fortaleza e cidades próximas (SILVA *et al.*, 2013), por isso foi escolhida para o desenvolvimento da pesquisa.

$$i = \frac{528,076 \cdot T^{0,181}}{(t + 6)^{0,62}} \quad (4.4)$$

$$i = \frac{506,99 \cdot T^{0,181}}{(t + 8)^{0,61}} \quad (4.5)$$

$$i = \frac{2345,29 \cdot T^{0,181}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (4.6)$$

Onde: i denota a intensidade de precipitação (mm/h); T representa o tempo de retorno (anos); t a duração da chuva (min).

Para o estudo, considerando as mudanças climáticas, foram usadas as equações desenvolvidas por Sabóia *et al.* (2017), que utilizaram dados de precipitações oriundos de diferentes modelos de circulação global, extraídos e interpolados para a cidade de Fortaleza-CE. Isso foi feito, a fim de gerar novas equações IDF projetadas para o futuro, ou seja, considerando as mudanças baseadas nas projeções climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

Na Tabela 4.2 podem ser observadas as equações da IDF's obtidas por Sabóia *et al.* (2017) considerando diferentes modelos de circulação global e cenários de mudança climáticas que foram utilizadas no trabalho.

Tabela 4.2 – Equações IDF derivadas dos dados gerados pelos modelos de circulação global referentes aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para a cidade de Fortaleza

Modelo	RCP 4.5	RCP 8.5
Bcc-csm1	$i = \frac{734,8541 \cdot T^{0,0873}}{(t + 20,6649)^{0,7476}}$	$i = \frac{788,4440 \cdot T^{0,00876}}{(t + 20,8779)^{0,7278}}$
CanESM2	$i = \frac{702,8991 \cdot T^{0,1427}}{(t + 19,1330)^{0,6931}}$	$i = \frac{691,5597 \cdot T^{0,1962}}{(t + 16,7853)^{0,6415}}$
CESM1-CAM5	$i = \frac{736,9068 \cdot T^{0,1624}}{(t + 14,4142)^{0,6079}}$	$i = \frac{876,0093 \cdot T^{0,2255}}{(t + 7,6045)^{0,5107}}$
inmcm4	$i = \frac{541,0216 \cdot T^{0,3291}}{(t + 12,2910)^{0,5787}}$	$i = \frac{762,2614 \cdot T^{0,1619}}{(t + 19,7644)^{0,6843}}$
MIROC5	$i = \frac{639,8823 \cdot T^{0,2003}}{(t + 15,9149)^{0,6361}}$	$i = \frac{647,7016 \cdot T^{0,1897}}{(t + 19,1330)^{0,7040}}$

Fonte: Sabóia *et al.* (2017)

4.4 Modelo Hidrológico – Pavimentos Rodoviários

O modelo hidrológico foi utilizado para os pavimentos rodoviários, com objetivo de caracterizar as condições de escoamento e infiltração para as diferentes superfícies na rodovia. Como hipóteses foram admitidas que durante o evento de chuva (Figura 4.9), parte da

precipitação (i) vira escoamento superficial direto (q) e a outra parte é infiltração (f), conforme equações a seguir:

$$q = C \cdot i \quad (4.7)$$

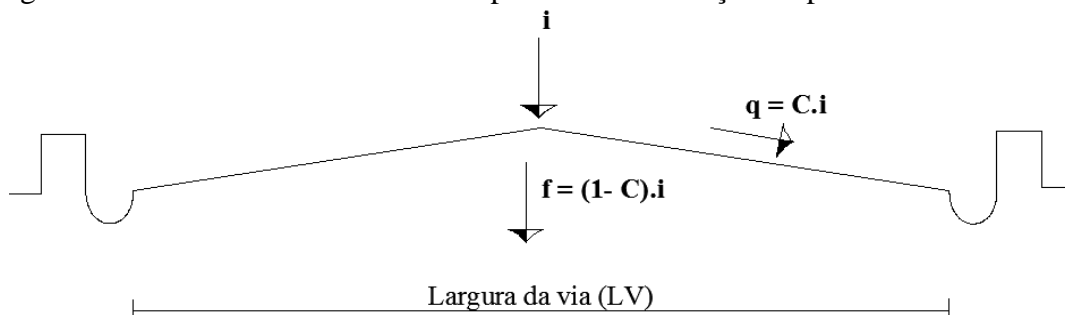
$$f = (1 - C) \cdot i \quad (4.8)$$

Onde: C é o coeficiente adimensional de escoamento superficial.

Para o modelo geométrico das superfícies do pavimento, definiu-se uma seção-tipo de 6 m de largura da via, conforme indicado na Figura 4.10. Na região onde há presença de revestimento asfáltico, adotou-se o coeficiente adimensional de escoamento superficial (C) de 0,95, enquanto para a região sem revestimento, o valor adotado foi de 0,30, com base nos trabalhos de Porto (1995).

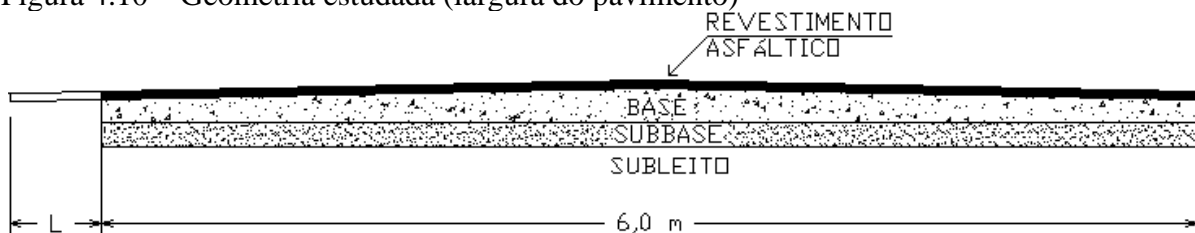
Para o acostamento, foram estudadas 4 condições com dimensões L (largura do acostamento) diferentes (Figura 4.10): 0 metro (sem acostamento), 0,5 metro, 1,0 metro de acostamento e 1,5 metros. Essa escolha foi feita, uma vez que, conforme apontado na pesquisa da Confederação Nacional do Transporte de 2019 (CNT, 2019), de um total de 108.863 km de rodovias pesquisadas em todo o país, em 45,5% não foi identificada a presença de acostamento. Para a RMF existem pavimentos com diferentes condições de acostamento. Na Figura 4.11 e na Figura 4.12 podem ser observadas imagens de rodovias da região com variadas dimensões de acostamentos

Figura 4.9 – Modelo de escoamento superficial e infiltração do pavimento



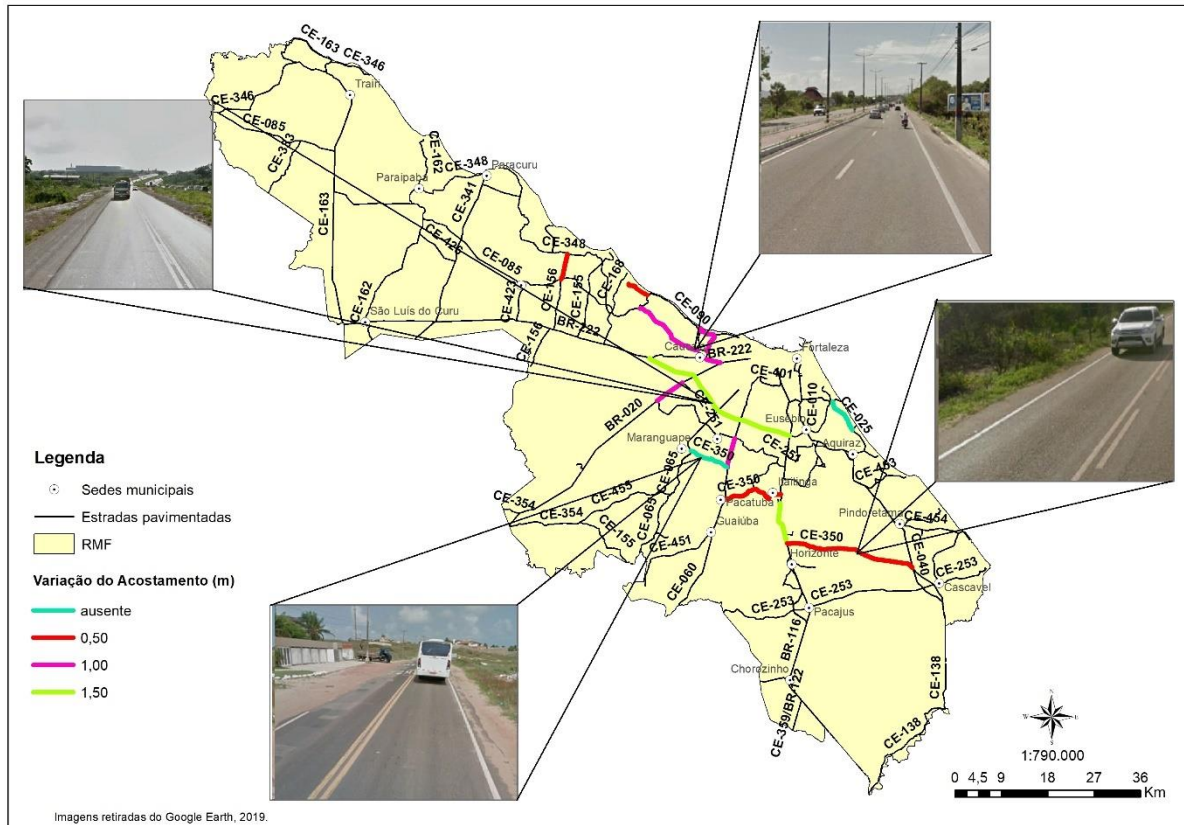
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.10 – Geometria estudada (largura do pavimento)



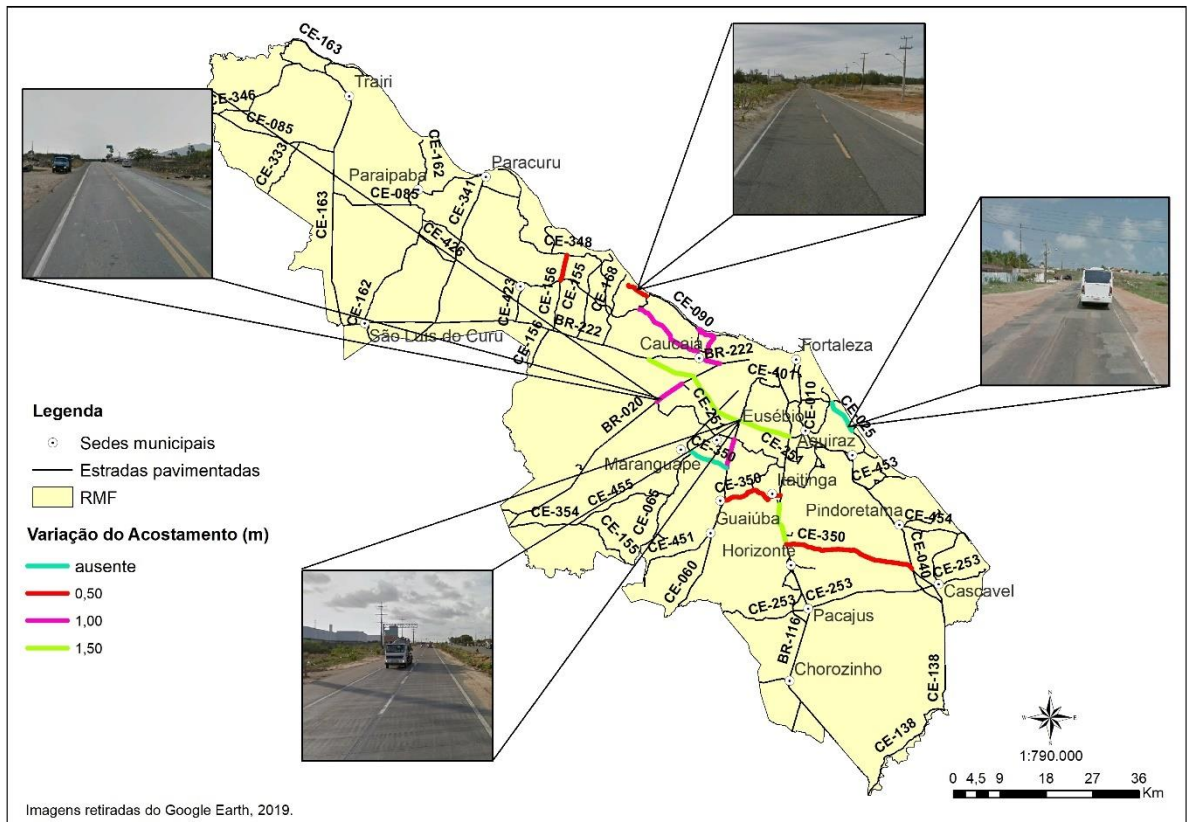
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.11 – Condições de Acostamento de Rodovias da RMF



Fonte: Elaboração própria (Imagens retidas do Google Earth)

Figura 4.12 – Condições de Acostamento de Rodovias da RMF



Fonte: Elaboração própria (Imagens retidas do Google Earth)

4.5 Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico - Pavimentos Urbanos

Para simulação do modelo hidrológico e hidrodinâmico foi escolhida uma sub-bacia da Bacia do Rio Cocó no Bairro Damas (Fortaleza, CE), conforme indicado na Figura 4.13. O trecho foi escolhido pela disponibilidade de informações (dimensões e junções) sobre os condutos de drenagem urbana, bem como as áreas de contribuição.

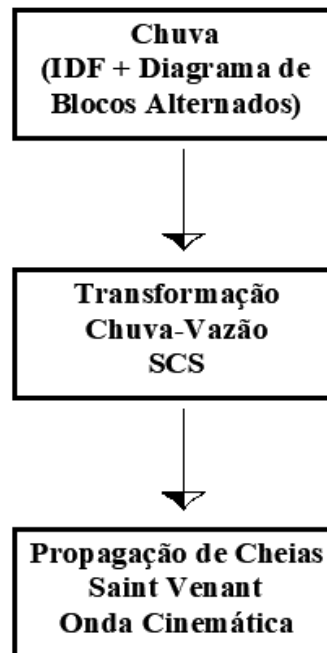
Figura 4.13 – Trecho Modelado no Bairro Damas, Fortaleza/CE



Fonte: Elaboração própria

Conforme apresentado anteriormente, os pavimentos urbanos estarão sujeitos aos eventos de enchentes (Figura 3.9). Dessa forma, a fim de analisar eventos de cheias em regiões urbanas, foi utilizada a estrutura do modelo hidrológico e hidrodinâmico apresentada na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Estrutura do modelo hidrológico e hidrodinâmico



Fonte: Elaboração Própria

Nessa configuração, foram simulados eventos de chuvas intensas com duração de 1 hora, com base na equação da AUMEF (Equação 4.4) e nas equações apresentadas na Tabela 4.2, que foram desenvolvidas por Sabóia *et al.* (2017) e consideram os modelos de mudança do clima. O período de retorno adotado para as simulações foram: 25 anos, 50 anos e 100 anos. Esses valores foram escolhidos por serem, em geral, utilizados para o dimensionamento das infraestruturas de drenagem urbana. Considerando as diferentes equações e períodos de retorno adotados, foram simulados um total de 33 cenários de cheias urbanas no trecho analisado (Tabela 4.3).

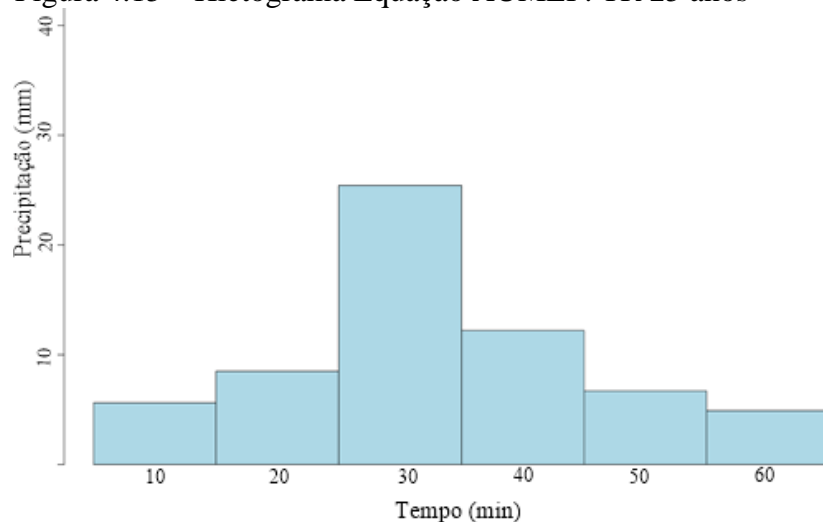
Para a distribuição da chuva, no período de tempo analisado ($t = 1$ hora), foram desenvolvidos os hietogramas utilizando o método dos blocos alternados. Na Figura 4.15 pode-se visualizar o hietograma gerado a partir da equação de chuva de Fortaleza da AUMEF para um período de retorno de 25 anos. Todos os hietogramas utilizados para os 33 cenários estão apresentados no Apêndice B deste trabalho.

Tabela 4.3 – Cenários de Cheias Urbanas

Equação de Chuva	Período de Retorno		
	25 anos	50 anos	100 anos
AUMEF	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
BCC-CM1 (RCP 4.5)	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
CanESM2 (RCP 4.5)	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
CESM1-CAM4 (RCP 4.5)	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12
inmcm4 (RCP 4.5)	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15
MIROC5 (RCP 4.5)	Cenário 16	Cenário 17	Cenário 18
BCC-CM1 (RCP 8.5)	Cenário 19	Cenário 20	Cenário 21
CanESM2 (RCP 8.5)	Cenário 22	Cenário 23	Cenário 24
CESM1-CAM4 (RCP 8.5)	Cenário 25	Cenário 26	Cenário 27
inmcm4 (RCP 8.5)	Cenário 28	Cenário 29	Cenário 30
MIROC5 (RCP 8.5)	Cenário 31	Cenário 32	Cenário 33

Fonte: Elaboração Própria

Figura 4.15 – Hietograma Equação AUMEF: TR 25 anos



Fonte: Elaboração própria

A etapa de transformação da chuva em vazão foi feita no software *Storm Water Management Model* (SWMM) (ROSSMAN, 2015), sendo utilizado o método do SCS (*Soil Conservation Service*) e consideradas as áreas da região com 80% a 90% de cobertura impermeável.

Para simular a propagação de cheias nas bacias urbanas podem ser usados modelos hidrodinâmicos, baseados nas equações de Saint-Venant (conservação da massa e conservação do momento), que representam o escoamento transiente (não permanente) e gradualmente variado em condutos naturais e artificiais. A equação da conservação da massa é escrita na forma (CUNGE *et al.*, 1980; CHANSON, 2004; STURM, 2010):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (4.9)$$

Onde: Q é a vazão; A é a área da seção transversal ao escoamento; x é a distância no sentido longitudinal; t é o tempo; e q é a vazão por unidade de largura de contribuição lateral.

A equação da conservação de momento é derivada da segunda lei de Newton, aplicada a um volume de controle. Logo (CUNGE *et al.*,1980; CHANSON, 2004; STURM, 2010):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + gA(-S_0 + S_f) = 0 \quad (4.10)$$

Em que: h é a profundidade do conduto, S₀ é a declividade do fundo do canal; S_f representa a perda de energia por atrito com o fundo e as laterais; g é aceleração da gravidade, A é a área da seção transversal, x é a distância no sentido longitudinal, e Q é a vazão.

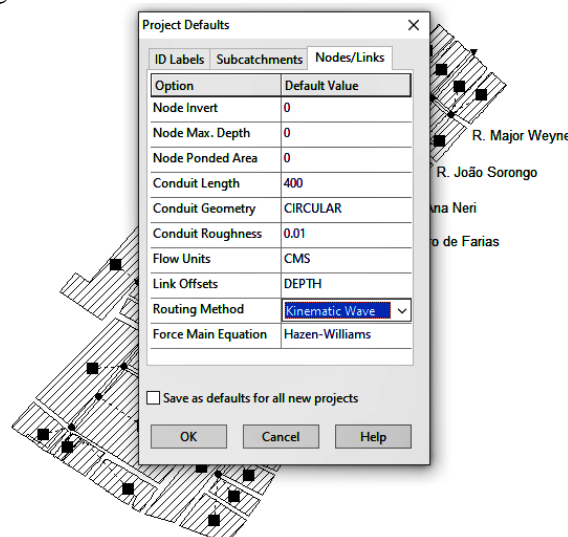
Uma das simplificações da Equação de Saint Venant é a onda cinemática, dada pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4.11)$$

$$S_0 = S_f \text{ (Força de atrito igual a força peso)} \quad (4.12)$$

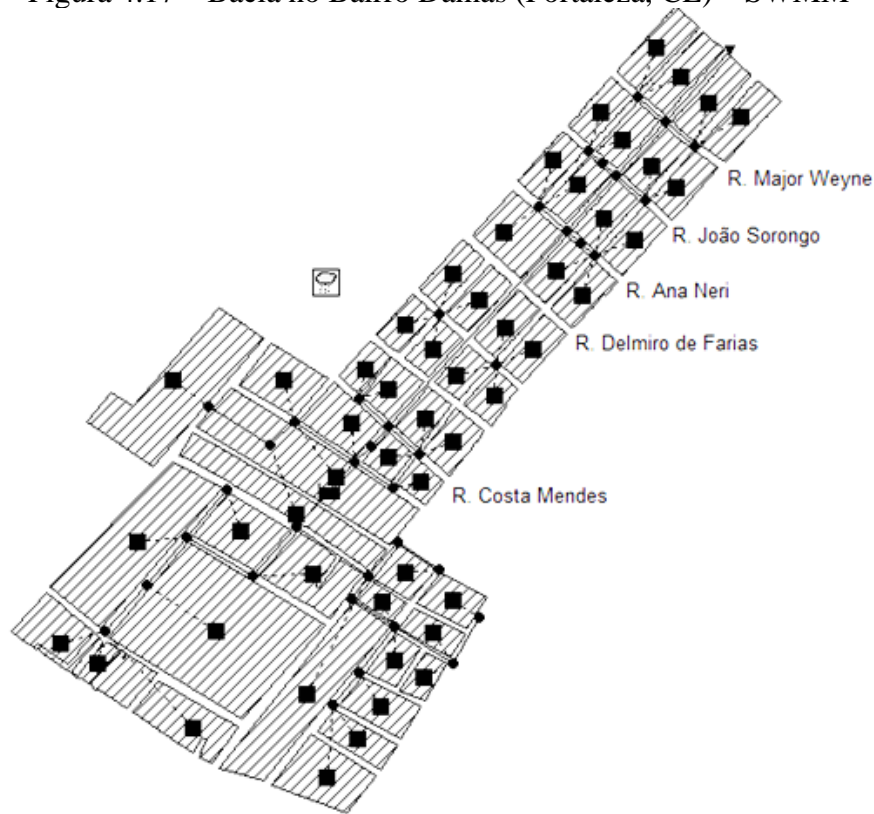
No software SWMM, conforme observado na Figura 4.16 é possível utilizar o método da onda cinemática para simulação da propagação de cheias. Na Figura 4.17 pode ser observado o arranjo geral da bacia estudada. Dessa forma, os hietogramas gerados, conforme descritos anteriormente, foram empregados como dados de entrada no software SWMM (ROSSMAN, 2015) e simuladas as vazões na bacia estudada.

Figura 4.16 – Onda Cinemática: Software SWMM



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.17 – Bacia no Bairro Damas (Fortaleza, CE) – SWMM



Fonte: Elaboração própria

4.6 Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não - Saturado

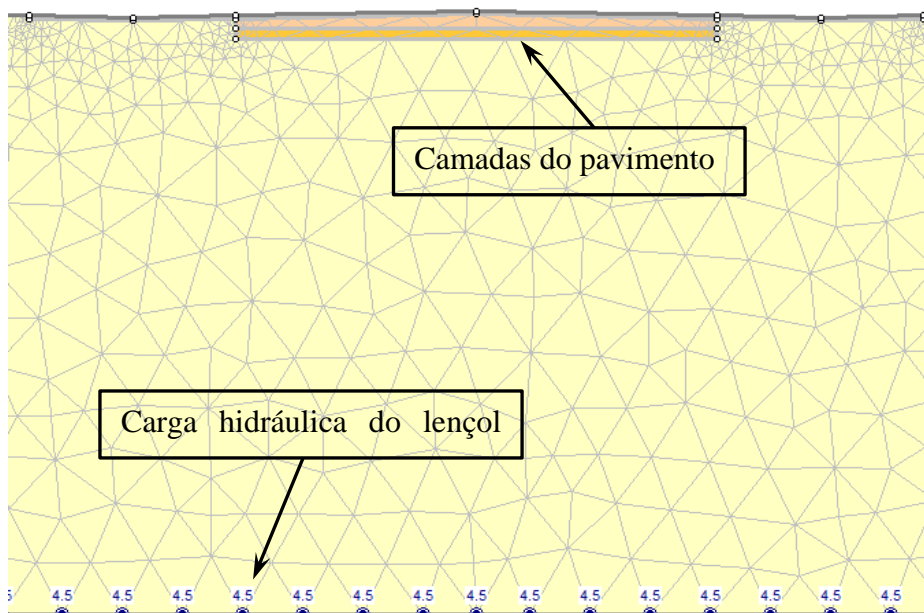
O clima da região de estudo é tropical quente (Figura 3.4), variando de úmido a semiárido. Portanto, os pavimentos da RMF passam a maior parte de sua vida útil submetidos a condição não-saturada, havendo ainda o revestimento asfáltico que funciona como uma barreira impermeabilizante que dificulta a passagem da água para as camadas inferiores. Em função desse aspecto, a modelagem de fluxo, nas camadas do pavimento, deve ser feita considerando a condição inicial não saturada, visto que os fluidos que estão presentes nos vazios da estrutura granular modificam suas propriedades hidráulicas e mecânicas.

Neste trabalho, para o modelo de fluxo em regime transiente e meio não saturado, foi feito o uso do programa Slide 8.0 da Rocscience com a licença da Universidade Federal do Ceará. A modelagem utiliza o método dos elementos finitos (MEF), conforme apresentado na Figura 4.18.

Para a modelagem, como dados de entrada, são necessários: a condutividade hidráulica saturada dos materiais (k_s), a curva de condutividade hidráulica e a curva de retenção.

Pode-se ainda considerar diferentes profundidades do nível d'água, conforme indicado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Malha de elementos finitos utilizada na modelagem de fluxo – Software Slide



Fonte: Elaboração própria

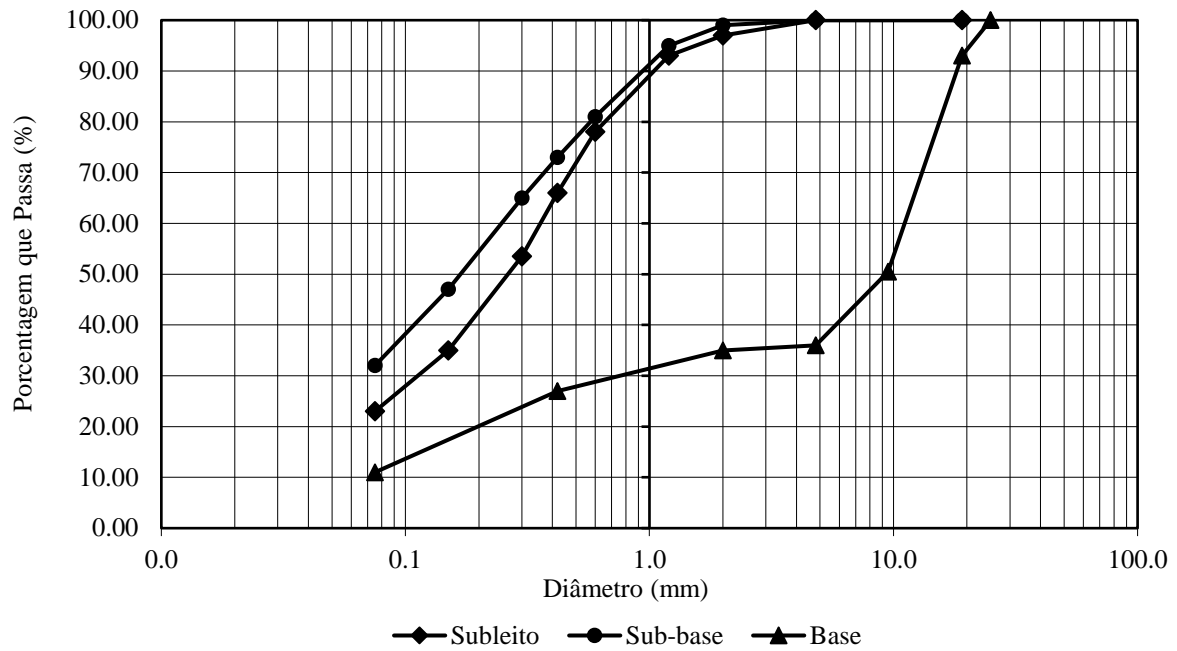
Para as estruturas da base, sub-base e subleito do pavimento foram utilizados 3 solos caracterizados por Bastos (2013). A autora fez ensaios de caracterização, compactação, CBR (Índice de Suporte Califórnia) e MR (Módulo de Resiliência) em solos da RMF. Na Tabela 4.4 e na Figura 4.19 são apresentados os resultados da caracterização dos solos. A camada de subleito foi caracterizada segundo o AASHTO como um solo A-2-4, que são pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas, e conforme o trabalho de Ribeiro (2013) representam aproximadamente 50% dos solos da RMF.

Tabela 4.4 – Caracterização dos Solos

Estrutura	wot (%)	$\rho_{s\text{máx}}$ (g/cm³)	e	n	LL	LP	AASHTO
Base	6,1	2,273	0,254	0,202	NP	NP	A-1-a
Sub-base	8,6	1,985	0,290	0,225	NP	NP	A-2-4
Subleito	8,3	1,977	0,280	0,219	NP	NP	A-2-4

Fonte: Adaptado de Bastos (2013)

Figura 4.19 – Curvas Granulométricas dos Solos do Pavimento



Fonte: Adaptado de Bastos (2013)

4.6.1 Condutividade Hidráulica

Como no trabalho de Bastos (2013) não foram realizados ensaios de permeabilidade, para os solos de base, sub-base e subleito, a condutividade hidráulica foi estimada através da equação empírica de Chapuis (2004) para materiais granulares:

$$k \text{ (cm/s)} = 2,4622 * \left[D_{ef}^2 \frac{e^3}{(1 + e)} \right]^{0,7825} \quad (4.13)$$

Em que: e é o índice de vazios, e D_{ef} é o diâmetro efetivo.

Para a condutividade hidráulica do revestimento asfáltico foram estudados dois tipos de revestimento: concreto asfáltico (CA) e tratamento superficial por penetração (TSP). Conforme citado por Vasconcelos (2013) e Silva (2018), o TSP é um dos tipos de revestimento mais utilizados no estado do Ceará, abrangendo aproximadamente 63% de toda a sua malha pavimentada.

Ferreira *et al.* (2014) analisaram as condições de fluxo em 6 misturas asfálticas com diferentes percentuais de volume de vazios (V_v). Dentre as misturas analisadas, optou-se pela utilização do tipo concreto asfáltico (CA) com 4% de vazios. Para a previsão de k_s do revestimento TSP, foi aplicada a equação de Kozeny–Carman (Equação 4.14), assim como no trabalho de Masad *et al.* (2006) que aplicaram a referida equação para prever a permeabilidade de diferentes misturas asfálticas.

$$k_s \text{ (m/s)} = \frac{C \cdot n^3 \cdot D_s^2}{(1 - n)^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (4.14)$$

Onde: k_s = coeficiente de permeabilidade do meio saturado (m/s); C = fator de forma igual a 1/180 para partículas esféricas; D_s = diâmetro médio das partículas; n = porcentagem de vazios no ar; $\gamma = 9,79 \text{ kN/m}^3$, peso unitário do fluido (água a 20°C); e μ = viscosidade do fluido, igual a 10^{-3} kg/(m.s) para a água.

Considerando todas as equações e trabalhos apresentados, as condutividades hidráulicas dos diferentes materiais que compõem as camadas do pavimento utilizadas nas modelagens, foram as indicadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficiente de permeabilidade dos materiais das camadas do pavimento

Material	Condutividade Hidráulica (m/s)
Revestimento Asfáltico CA	$8,82 \times 10^{-7}$
Revestimento Asfáltico TSP	$9,46 \times 10^{-7}$
Base	$1,42 \times 10^{-5}$
Sub-base	$9,32 \times 10^{-6}$
Subleito	$9,53 \times 10^{-6}$

Fonte: Elaboração própria

4.6.2 *Curvas de Retenção*

Para estimativa das curvas de retenção dos materiais foi utilizada a metodologia de Arya e Paris (1981), que faz a previsão através dos dados da granulometria do solo. Segundo o método proposto pelos autores, a curva granulométrica pode ser dividida em n frações arbitrárias. Para cada fração é associado um diâmetro médio do poro e uma curva de retenção idealizada. Essa curva é determinada pelo seu valor de entrada de ar e por drenagem total e abrupta. Dentre as hipóteses simplificadoras adotadas nessa metodologia, estão (ARYA e PARIS, 1981; GITIRANA *et al.*, 2005):

- a) A densidade do solo é a mesma para todas as n frações e permanece constante;
- b) As partículas podem ser consideradas esféricas, possuindo diâmetro igual ao diâmetro médio de cada fração;
- c) O volume dos poros de cada fração pode ser idealizado como sendo um tubo capilar cilíndrico, cujo raio é associado ao raio médio das partículas da fração;
- d) A equação de capilaridade de Kelvin pode ser aplicada a cada fração;

e) Histerese e seus mecanismos geradores não são considerados.

O volume dos vazios de cada fração, V_{vi} , pode ser calculado da seguinte forma (ARYA e PARIS, 1981; GITIRANA *et al.*, 2005):

$$V_{vi} = \frac{m_{si}}{\rho_s} e \quad (4.15)$$

onde $i = 1, 2, \dots, n$; m_{si} é a massa das partículas de cada fração [igual a porcentagem gravimétrica de partículas pertencentes à fração i , obtida da curva granulométrica ($m_{si} = P_{i+1} - P_i$)]; e é o índice de vazios; ρ_s é a densidade das partículas;

Considerando que os poros são preenchidos com água progressivamente, a umidade volumétrica, acumulado até a fração n , é dado por:

$$\theta_{vi} = \sum_{j=1}^i \frac{V_{vj}}{V} = \sum_{j=1}^i V_{vj} \cdot \rho_d \quad (4.16)$$

onde $V_{vj} = V_{vi}$; V é o volume total de solo da fração ($V = \sum m_{si} / \rho_s = 1 / \rho_s$); e ρ_s é a densidade seca do solo.

A umidade volumétrica correspondente ao ponto central de cada fração é dada por:

$$\theta_{vi}^* = \frac{\theta_{vi} + \theta_{vi+1}}{2} \quad (4.17)$$

Para estabelecer a sucção mátrica de cada fração, Arya e Paris (1981) assumem que cada fração de solo é formada por n_i partículas esféricas, o que gera um volume de sólidos, V_{si} , e vazios, V_{vi} :

$$V_{si} = \frac{n_i \cdot 4\pi \cdot R_i^3}{3} = \frac{m_{si}}{\rho_s} \quad (4.18)$$

$$V_{vi} = \pi r_i^2 h_i = \frac{m_{si}}{\rho_s} e \quad (4.19)$$

onde R_i é o raio médio das partículas de cada fração, r_i é o raio médio dos poros da fração e h_i é o comprimento do poro.

Deve-se, ainda, igualar o comprimento total do poro ao número de partículas alinhadas ao longo do poro, vezes o comprimento contribuído por cada partícula. Considerando uma configuração cúbica de esferas de mesmas dimensões, o comprimento do poro seria $n_i 2R_i$. Arya e Paris (1981) sugerem a inclusão de um parâmetro α , para levar em conta o formato não esférico das partículas. Assim, o comprimento do poro seria dado por:

$$h_i = n_i^\alpha 2R_i \quad (4.20)$$

Combinando as Equações 4.18, 4.19 e 4.20:

$$r_i = R_i \sqrt{\frac{2en_i^{1-\alpha}}{3}} \quad (4.21)$$

Os valores de α são determinados em função da classificação do solo do sistema USDA (SOIL SURVEY STAFF, 1975): 1,285 para areia; 1,459 para franco arenosos; 1,375 para franco; 1,150 para franco siltosos; e 1,160 para argilas.

Os valores de n_i são estimados utilizando a Equação 4.18. O valor de sucção de cada fração é determinado utilizando a equação de capilaridade:

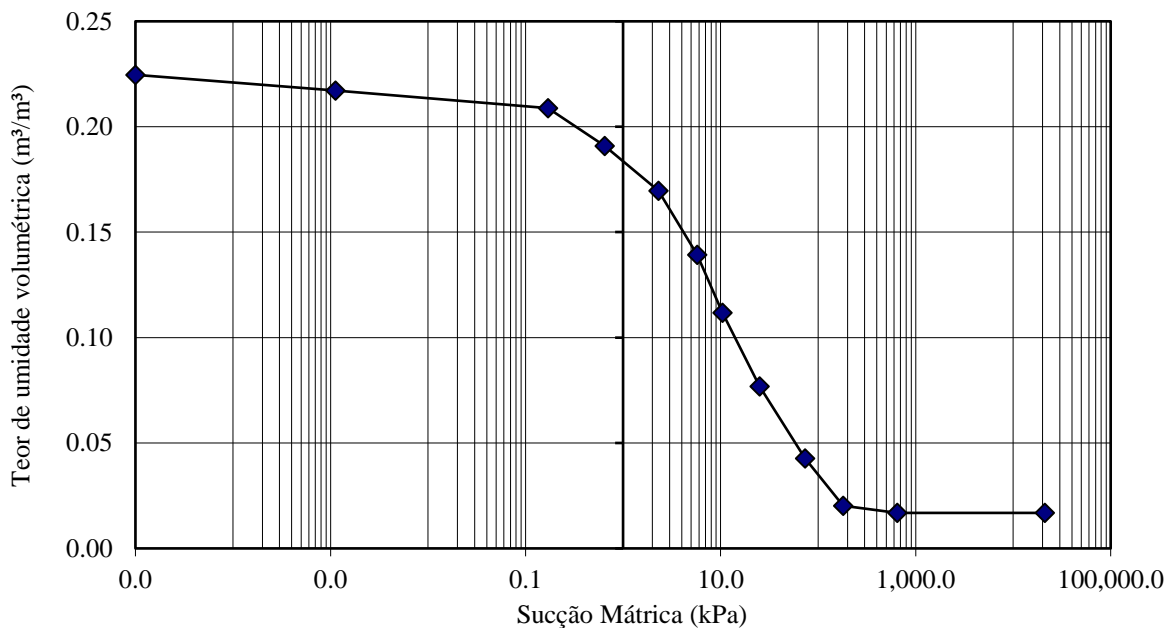
$$(u_a - u_w) = \frac{2 \cdot T_s}{r_i} \quad (4.22)$$

Onde: T_s é a tensão superficial da água ($T_s \cong 7,2 \cdot 10^{-5}$ kN/m).

A partir das equações apresentadas e da caracterização dos solos realizada por Bastos (2013), foi possível estimar as curvas de retenção para os solos do subleito (Figura 4.20), sub-base (Figura 4.21) e base (Figura 4.22). A metodologia de Arya e Paris (1981) foi aplicada por Almeida (2018) para um solo areno-siltoso da cidade de Fortaleza, tendo apresentado previsões bastante coerentes com os resultados dos ensaios de laboratório.

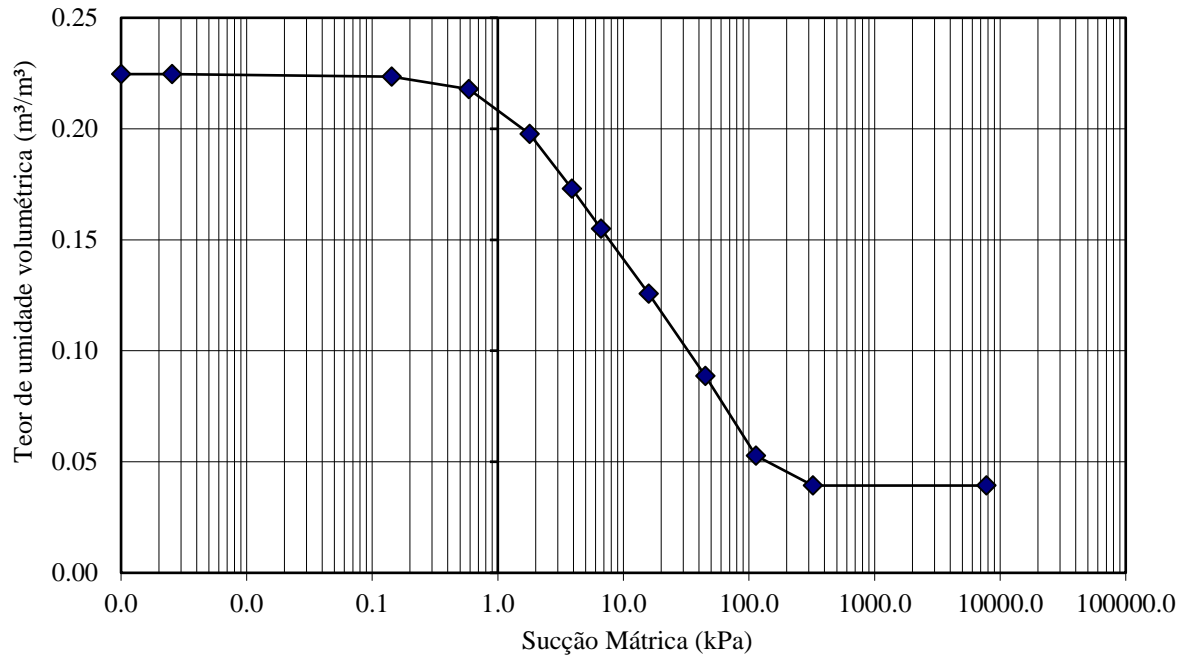
É possível ainda estimar a curva saturação *versus* sucção mátrica para todas as camadas do pavimento. As curvas estão indicadas na Figura 4.23.

Figura 4.20 – Curva de Retenção Subleito



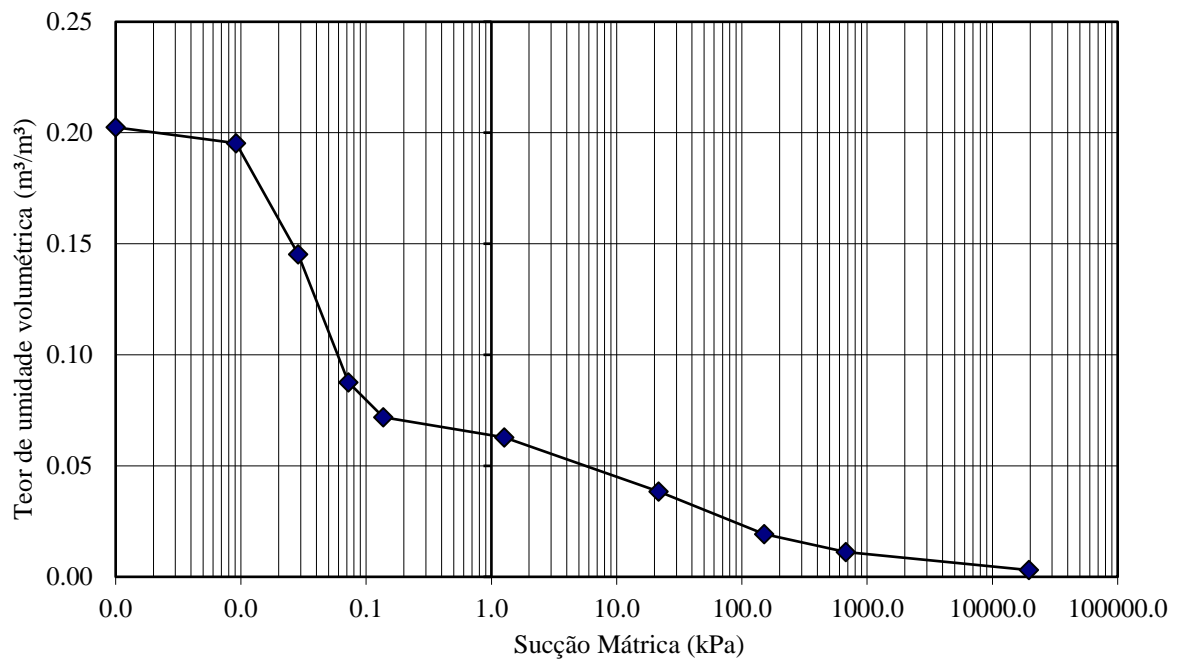
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.21 – Curva de Retenção Sub-base



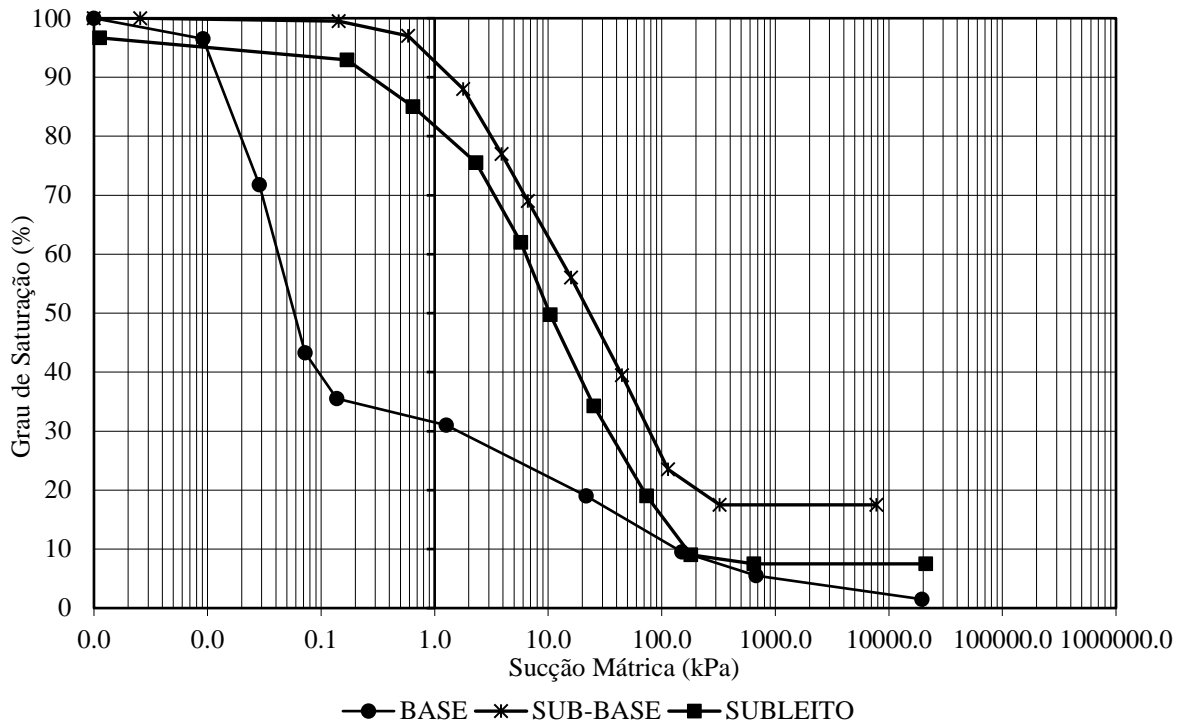
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.22 – Curva de Retenção Base



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.23 – Curva Saturação x Sucção Mátrica



Fonte: Elaboração própria

4.6.3 Curvas de Condutividade Hidráulica

Para a função da condutividade hidráulica, as curvas foram geradas com base na proposta por Fredlund e Xing (1994) e Fredlund *et al.* (1994), que correlaciona os dados de sucção com a umidade volumétrica e com a função condutividade hidráulica. De forma que (FREDLUND e XING, 1994):

$$\theta = \theta_s \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right)} \right]^m \left\{ \frac{1}{\ln\left(e + \frac{\psi}{a}\right)^n} \right\} \quad (4.23)$$

Onde: θ_s é a umidade volumétrica de saturação; ψ é a sucção (kPa); ψ_r é a sucção total (kPa) que corresponde a umidade volumétrica residual (θ_r); a é o coeficiente do solo que se relaciona com o valor de entrada de ar (kPa); e é o algarismo neperiano de valor 2,718282...; n é o parâmetro do solo que controla a inclinação do ponto de inflexão da curva característica; e m é o parâmetro que é relacionado com a umidade residual do solo.

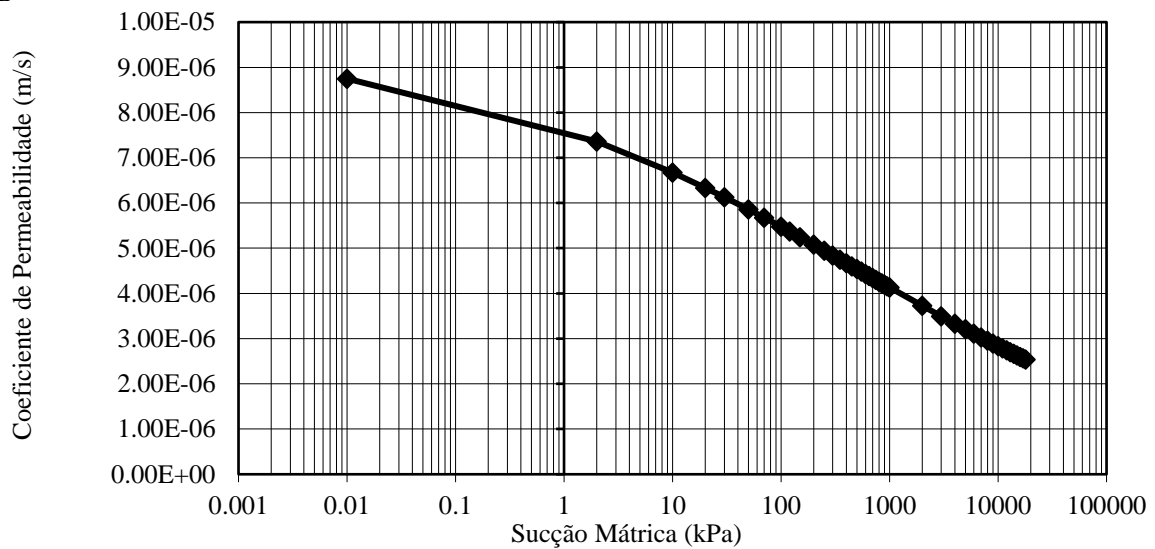
De acordo com Fredlund *et al.* (1994), a função de condutividade hidráulica pode ser determinada pelo conhecimento do coeficiente de permeabilidade saturado e pela curva de retenção, resultando numa função não linear entre o coeficiente de permeabilidade e a sucção.

Essa função de condutividade hidráulica pode ser definida pela seguinte equação (FREDLUND *et al.*, 1994):

$$k(\psi) = k_s \frac{\int_{\ln \psi}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{a_{ev}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (4.24)$$

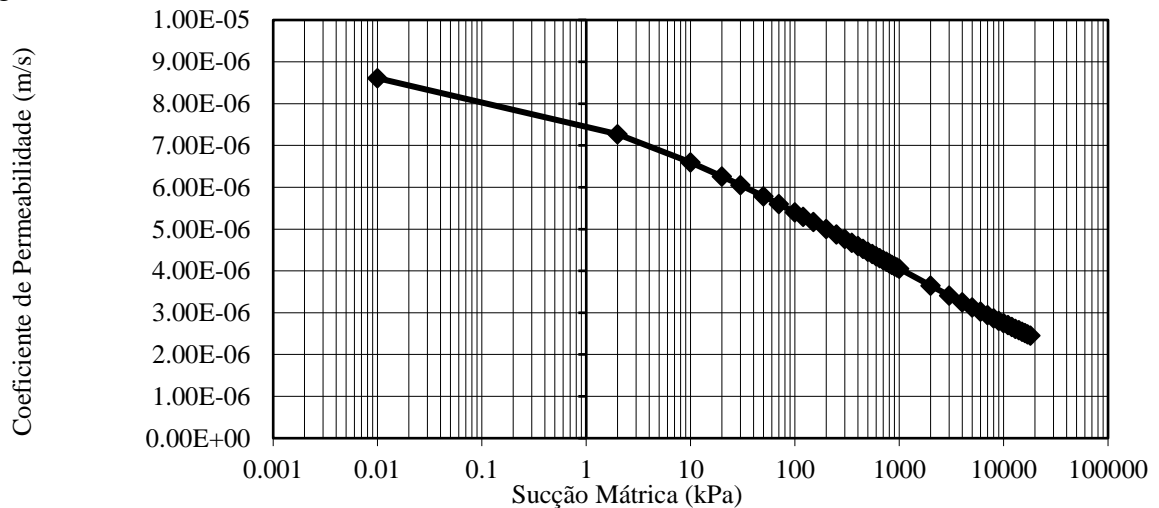
Com base nisso, as curvas de condutividade hidráulica para as camadas de subleito, sub-base e base foram geradas conforme indicado na Figura 4.24, na Figura 4.25 e na Figura 4.26, respectivamente.

Figura 4.24 – Curva de Condutividade Hidráulica Subleito



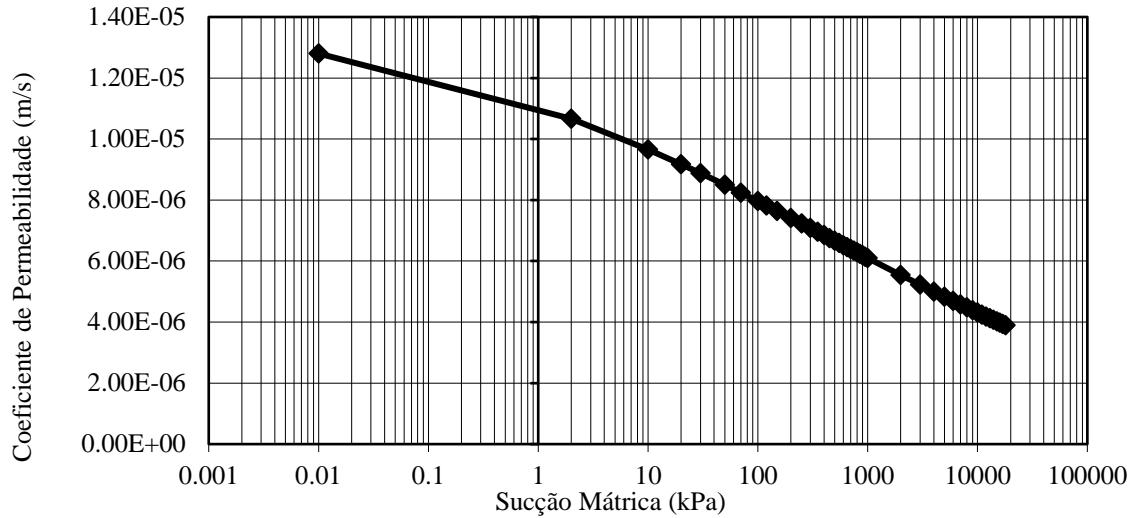
Fonte: Elaboração própria

Figura 4.25 – Curva de Condutividade Hidráulica Sub-base



Fonte: Elaboração própria

Figura 4.26 – Curva de Condutividade Hidráulica Base

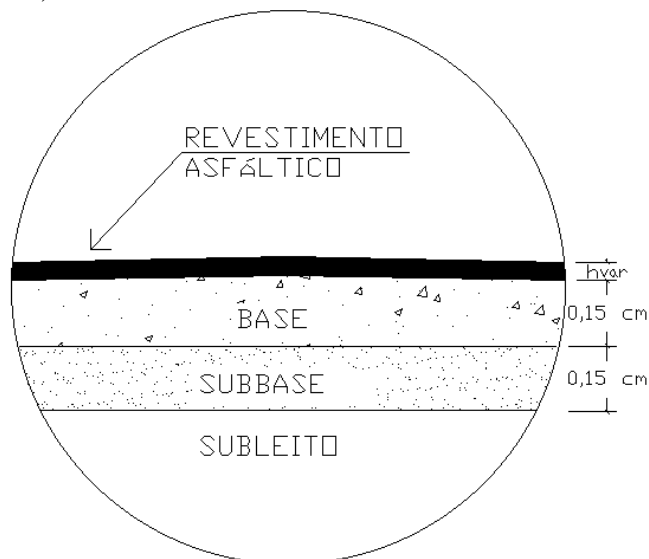


Fonte: Elaboração própria

4.6.4 Pavimentos Rodoviários

Para os pavimentos rodoviários, foi adotada uma geometria com camadas de base e sub-base de 15 centímetros (Figura 4.27) cada, e para o revestimento asfáltico foram estudadas 3 espessuras diferentes: TSP com 2 cm, CA com 5 cm e 10 cm.

Figura 4.27 – Geometria estudada (espessura das camadas) – Dimensões em metros

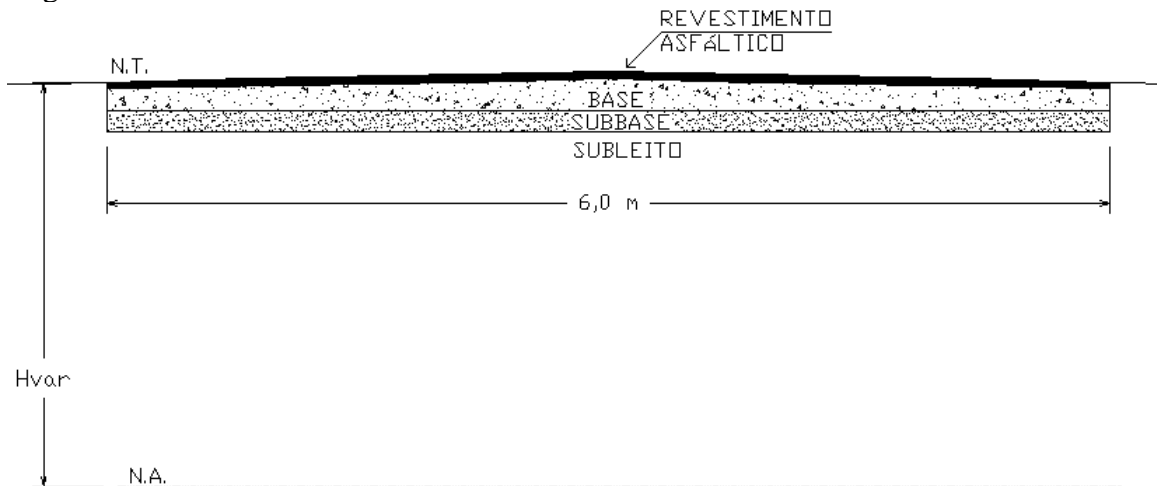


Fonte: Elaboração própria

Outro aspecto importante na modelagem de fluxo em meio poroso não-saturado é a definição da profundidade do nível d'água. Para definição dessa variável, foram considerados os resultados do mapeamento de poços na RMF de Cavalcante (1998), apresentado no Capítulo

3 deste trabalho. Foram estudadas condições de nível freático de 3,0 m, 3,5 m, 4,0 m e 4,5 m (Figura 4.28). Todas essas condições de lençol freático são representativas dos diferentes sistemas de aquíferos que compõem a RMF.

Figura 4.28 – Profundidade do Nível Freático



Fonte: Elaboração própria

Considerando as diferentes condições de acostamento apresentadas na definição do modelo hidrológico, as profundidades de nível d'água e as diferentes espessuras de revestimentos asfálticos, têm-se um total de 48 cenários diferentes, conforme apresentado na Tabela 4.6. Porém conforme as definições do modelo climático, foram analisados todos esses cenários para 3 períodos chuvosos diferentes (acima da média, abaixo da média, próximo a média), totalizando 144 cenários modelados.

Tabela 4.6 – Cenários Estudados para Pavimentos Rodoviários

Nível freático	Acostamento			
	0 m	0,5 m	1,0 m	1,5 m
3,0 m	2 cm (1)	2 cm (2)	2 cm (3)	2 cm (4)
	5 cm (5)	5 cm (6)	5 cm (7)	5 cm (8)
	10 cm (9)	10 cm (10)	10 cm (11)	10 cm (12)
3,5 m	2 cm (13)	2 cm (14)	2 cm (15)	2 cm (16)
	5 cm (17)	5 cm (18)	5 cm (19)	5 cm (20)
	10 cm (21)	10 cm (22)	10 cm (23)	10 cm (24)
4,0 m	2 cm (25)	2 cm (26)	2 cm (27)	2 cm (28)
	5 cm (29)	5 cm (30)	5 cm (31)	5 cm (32)
	10 cm (33)	10 cm (34)	10 cm (35)	10 cm (36)
4,5 m	2 cm (37)	2 cm (38)	2 cm (39)	2 cm (40)
	5 cm (41)	5 cm (42)	5 cm (43)	5 cm (44)
	10 cm (45)	10 cm (46)	10 cm (47)	10 cm (48)

Fonte: Elaboração própria

Na modelagem no software Slide, é necessária a definição da condição inicial. Nesta pesquisa definiu-se que no instante tempo $t = 0$, as camadas de solo do pavimento estariam na condição de umidade ótima. Como no software não é possível definir uma condição de contorno de umidade, calculou-se a umidade volumétrica correspondente a umidade gravimétrica ótima (umidade ótima do ensaio de compactação) conforme indicado na Tabela 4.7 e com base nas curvas de retenção, definiu-se a sucção mátrica correspondente. Dessa forma, a condição inicial foi adotada conforme indicado na Figura 4.29.

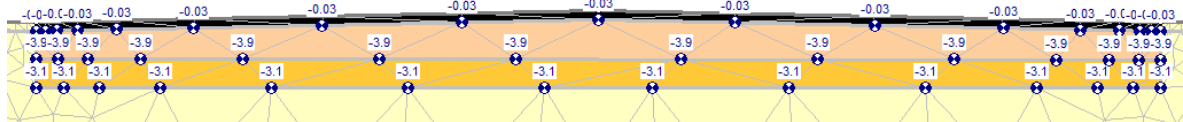
Para inserção dos dados estimados no modelo hidrológico, utilizou-se a função “*vertical infiltration with time*” (Figura 4.30) que permite inserir a infiltração de água no solo com o tempo.

Tabela 4.7 – Umidade Volumétrica

Camada	Umidade Ótima (%)	Umidade Volumétrica(m ³ /m ³)
Base	6,1	0,148
Sub-base	8,6	0,164
Subleito	8,3	0,170

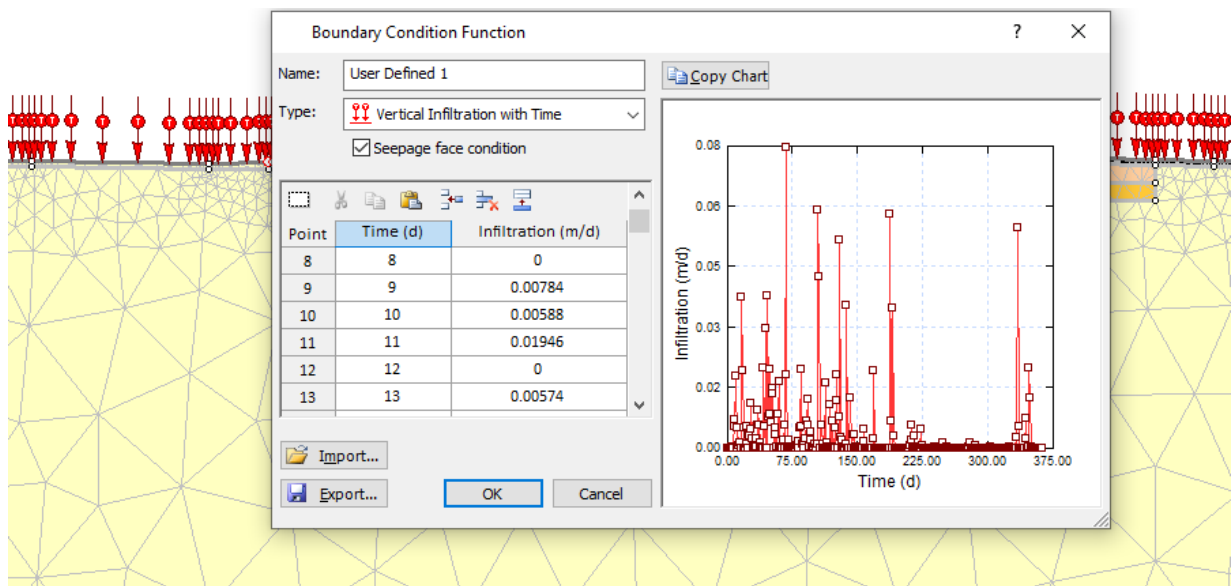
Fonte: Elaboração Própria

Figura 4.29 – Condição Inicial



Fonte: Elaboração Própria

Figura 4.30 – Função vertical “*infiltration with time*”

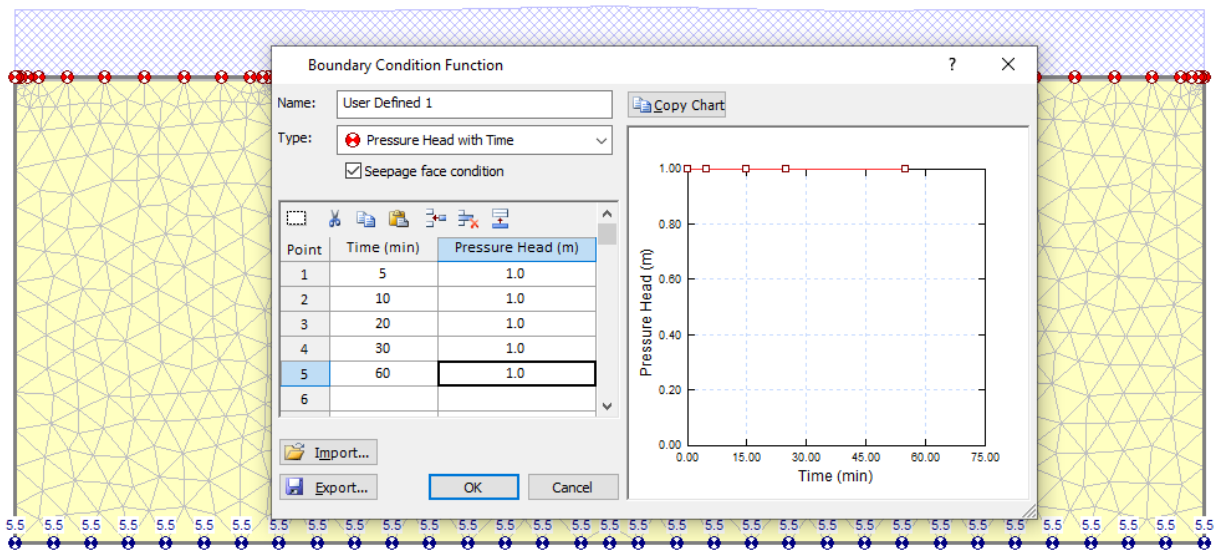


Fonte: Elaboração Própria

4.6.5 Pavimentos Urbanos

As modelagens com pavimentos urbanos consideraram diferentes lâminas de inundação sobre o pavimento. No software Slide, a carga hidráulica acima do nível do terreno foi adicionada por meio da função “*preassure head with time*”, conforme apresentado na Figura 4.31. Foi considerada que toda a superfície modelada apresentava condições de baixa permeabilidade, semelhantemente ao revestimento asfáltico.

Figura 4.31 – Função “*preassure head with time*”



Fonte: Elaboração Própria

4.7 Modelo de Rigidez do Pavimento

Para o modelo de rigidez do pavimento foi necessária a adaptação da Equação 2.9 para estimativa do módulo de resiliência, pois era indispensável a incorporação da variação de umidade do material. O trabalho de Takeda (2006) indica que a utilização da função exponencial (e^x) para o cálculo de MR, em um determinado teor de umidade, apresenta boa correlação, por isso, a Equação 2.9 foi adaptada para a Equação 4.25:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \Delta\sigma^{k_3} \cdot e^{k_4 \cdot (\Delta w)} \quad (4.25)$$

Onde: k_1 , k_2 , k_3 , k_4 são coeficientes obtidos na regressão; Δw : variação de umidade em relação a umidade ótima de compactação; σ_3 é a tensão principal menor; $\Delta\sigma$ é a tensão desvio.

Como nesta pesquisa foram empregados os solos caracterizados por Bastos (2013), utilizou-se as equações para cálculo de MR disponíveis para cada uma das umidades e cada uma das amostras ensaiadas pela autora (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Equações de características do MR para cada umidade

Estrutura	Variação de umidade		
	-2%	0	2%
Subleito	$187,8 \cdot \theta^{0,738} \cdot \tau_{oct}^{-0,461} (R^2 = 0,83)$	$154,2 \cdot \theta^{0,787} \cdot \tau_{oct}^{-0,518} (R^2 = 0,82)$	$149,2 \cdot \theta^{0,603} \cdot \tau_{oct}^{-0,343} (R^2 = 0,75)$
Sub-base	$268,6 \cdot \theta^{0,488} \cdot \tau_{oct}^{-0,542} (R^2 = 0,75)$	$197,1 \cdot \theta^{0,640} \cdot \tau_{oct}^{-0,399} (R^2 = 0,81)$	$142,6 \cdot \theta^{0,682} \cdot \tau_{oct}^{-0,520} (R^2 = 0,71)$
Base	$485,5 \cdot \theta^{0,682} \cdot \tau_{oct}^{-0,316} (R^2 = 0,79)$	$378,1 \cdot \theta^{-0,037} \cdot \tau_{oct}^{-0,028} (R^2 = 0,60)$	$252,7 \cdot \theta^{0,454} \cdot \tau_{oct}^{-0,300} (R^2 = 0,50)$

Fonte: Adaptado de Bastos (2013)

Para obtenção dos coeficientes k1, k2, k3, k4 indicados na Equação 4.25 foi utilizada a regressão linear no software Excel. Para tal, foram empregadas as tensões (confinantes e desvio) utilizadas por Bastos (2013) em seus ensaios e os resultados de módulo de resiliência calculados a partir das equações indicadas na Tabela 4.8.

4.7.1 Análise dos Resíduos

Para o modelo de rigidez desenvolvido neste trabalho, foi feita a análise dos resíduos (erro) a fim de se analisar a adequação dos resíduos a um modelo distributivo, uma vez que isso pode significar o desenvolvimento de um modelo que permita a predição de desempenho do fenômeno, considerando sua variabilidade e confiabilidade através dos níveis e intervalos de confiança do modelo. Os resíduos foram calculados pela expressão seguinte:

$$d = MR_{ensaio} - MR_{modelo} \quad (4.26)$$

Onde: d = resíduo entre o valor medido e o valor calculado pelo modelo de previsão; MR_{ensaio} = valor do ensaio; MR_{cal} = valor calculado pelo modelo de previsão.

Para a determinação do intervalo de confiança foi considerada a hipótese de que os resíduos calculados se adequavam a uma Distribuição Normal de Probabilidade. Essa hipótese foi confirmada por meio de teste de aderência na distribuição dos resíduos do modelo. Os resultados obtidos no teste de aderência podem ser verificados no Apêndice C.

Dada as condições de normalidade das curvas de distribuição dos resíduos, determinou-se os intervalos de confiança para as médias dos resíduos, considerando-se um nível de confiança de $(1 - \alpha)$, calculado como:

$$d_{med} - z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq MR_{ensaio} - MR_{modelo} \leq d_{med} + z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.27)$$

Onde: d_{med} = média aritmética dos desvios calculados para o modelo; $z_{\alpha/2}$ = variável aleatória da distribuição Normal, para qual a probabilidade de ocorrência de um valor $d \leq (1 - \alpha)$; σ = desvio-padrão da amostra; n = tamanho da amostra.

A Equação 4.27 pode ser simplificada da seguinte forma:

$$MR_{modelo} + LI \leq MR_{ensaio} \leq LS + MR_{modelo} \quad (4.28)$$

Onde: LI = limite inferior do intervalo de confiança; LS = limite superior do intervalo de confiança.

Desta forma, é possível determinar qual o intervalo se encontra o valor do ensaio (MR_{ensaio}) do módulo de resiliência, a partir do valor que foi calculado (MR_{modelo}) pelo modelo de previsão, estando este em um nível de confiança de $(1 - \alpha)$.


4.8 Análise de Desempenho

Para os cálculos de tensões, deformações, deslocamentos e as simulações de dano no pavimento foi utilizado o programa computacional CAP3D-D (*Computational Analysis of Pavements – 3D*), que é um desdobramento do programa CAP3D (Holanda *et al.*, 2006), sendo que o primeiro é um programa de dimensionamento de pavimentos asfálticos e o segundo um programa de análise estrutural. O CAP3D é baseado no MEF (CAP3D) e foi desenvolvido utilizando a técnica de programação orientada a objetos (POO), que permite o sistema ser expandido com maior facilidade (BASTOS, 2013). Há possibilidade de tratar modelos planos, axissimétricos e tridimensionais, utilizando elementos de diferentes formas (triângulos, quadriláteros, tetraedros e hexaedros) e ordens de interpolação (linear e quadrática). Nesse sistema também é possível considerar diferentes modelos constitutivos, realizar análises lineares e não lineares, estáticas ou dinâmicas, através de diferentes algoritmos.

No CAP3D, o modelo geométrico do pavimento é gerado no programa PMG (*Pavement Mesh Generator*), que produz malhas axissimétricas de pavimentos asfálticos, também desenvolvido no LMP (Laboratório de Mecânica de Pavimentos) da UFC (Universidade Federal do Ceará) (CAVALCANTE *et al.*, 2008). Para gerar o modelo geométrico do pavimento, utilizando o PMG, são necessárias características das camadas do pavimento (espessura e material) e o carregamento aplicado (Figura 4.32). Após a conclusão do modelo geométrico, o usuário pode gerar uma malha de elementos finitos quadrilaterais ou

uma malha mista, mesclando elementos finitos com elementos infinitos (COUTINHO *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2012).

Figura 4.32 – Software CAP3D-D

 CAP3D - Dimensionamento BETA

Dados Gerais

ID:

Mês/Ano Inicial: Mês/Ano Final:

Tráfego do Ano Inicial:

Taxa de Crescimento (%):

Tráfego Total (N):

Estrutura

#Camadas:

#	Camada	h (cm)	Propriedades
1	Revestimento	0.05	Edit
2	Base	0.15	Edit
3	Subbase	0.15	Edit
4	Subleito	----	Edit

Carregamento

#Cargas:

#	Raio (cm)	Força (kN)	V (km/h)	Spec
1	0.0108	-20.5	60	

Clima - Temperatura do ar (°C)

	Jan	Fev	Mar	Abr
00:00 - 08:00	27	27	27	27
08:00 - 16:00	27	27	27	27
16:00 - 00:00	27	27	27	27

Fonte: Elaboração Própria

A análise de desempenho dos pavimentos é feita utilizando as estimativas dos defeitos estruturais mais evidentes nas vias com pavimentação asfáltica, que são deformações permanentes e trincamentos. No CAP3D-D é possível fazer essas estimativas para o período que se deseje analisar (meses, anos, vida útil do pavimento) utilizando equações de previsão de desempenho (% de área trincada e deformação permanente). O equacionamento empregado no software pode ser consultado no trabalho de Santiago *et al.* (2018).

Para a análise de desempenho dos pavimentos estudados, foram utilizados como dados de entrada no software CAP3D-D os seguintes parâmetros:

- Data de início de operação da via: Jan/2019;

- Tráfego inicial (N): $1,0 \cdot 10^6$;
- Velocidade: 60 km/h;
- Taxa de crescimento do tráfego: 2,0 % (Modelo Exponencial);
- Estrutura composta por 3 camadas, além do subleito, todas com coeficiente de Poisson assumido, como 0,35, e espessuras e rigidezes conforme apresentados anteriormente;
- Temperatura: 27°C (estimada conforme dados INMET para a temperatura média da cidade de Fortaleza). Nesta pesquisa optou-se por considerar a temperatura média constante, com objetivo de analisar a influência somente das precipitações no desempenho do pavimento;
- Dados da curva mestra da mistura: $a = 1,19$; $b = 3,29$; $d = 0,9130$; $g = 0,51$; $\alpha_1 = 0,00121$; $\alpha_2 = -0,1780$; $\alpha_3 = 3,0800$ (conforme Santiago *et al.*, 2017);
- Dado da curva de vida de fadiga por compressão diametral (CD): $K_1 = 3 \cdot 10^{-11}$; $K_2 = -3,535$ (conforme Santiago *et al.*, 2018);
- Dados da curva de vida de fadiga por TD da mistura com CAP 65/90 e Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,1mm: $\alpha = 3,43$; $C_{11} = 0,001530$; $C_{12} = 0,528$; $\Delta = -1,211$; $Y = 3709564$; $\beta = -0,08$ (conforme Santiago *et al.*, 2018);
- Raio da roda: 0,108 m;
- Força por roda: -20,5 kN.

4.9 Considerações Parciais

A definição e caracterização dos modelos apresentados neste capítulo apresentam incertezas intrínsecas as formulações e simplificações utilizadas. Por isso, a seguir são destacadas as principais incertezas de cada um desses:

- Modelo Climático (Pavimentos Rodoviários): para o clima atual, as medidas de precipitação são determinadas através de pluviômetros, nessa situação, as incertezas são associadas as medidas e coletas realizadas no equipamento. Para o clima futuro, ainda existem muitas incertezas nas projeções, e a correção de viés é realizada por meio de análises do clima passado, que dependem de séries históricas.
- Modelo Climático (Pavimentos Urbanos): para o clima atual, as estimativas de chuvas intensas são realizadas por meio de pluviógrafos, que para cidade de Fortaleza, apresentam uma série histórica reduzida. Para o clima futuro, assim como para pavimentos rodoviários, existem muitas incertezas nas projeções para o século

XXI. Ressalta-se ainda que as equações para mudança climática requerem resultados de chuvas desagregadas.

- Modelo Hidrológico (Pavimentos Rodoviários): uma das principais incertezas é quanto ao coeficiente de escoamento (C), pois, este depende de características geotécnicas, uso e ocupação do solo e topografia. Afim, de possibilitar a aplicação da metodologia, as simplificações apresentadas neste capítulo tiveram que ser aplicadas.
- Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico (Pavimentos Urbanos): a modelagem depende de uma caracterização adequada da infraestrutura de águas urbanas e de uso e ocupação do solo, bem como de uma base topográfica.
- Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não-Saturado: nesta etapa, diversas equações empíricas tiveram que ser adotadas. Em todos os casos, foram utilizadas equações para solos granulares (todos os solos utilizados tinham esta característica), que em geral, apresentam melhores resultados, quando comparados a equações para solos argilosos. Porém, as incertezas são associadas, principalmente, a permeabilidade e as curvas de retenção e de condutividade hidráulica.
- Modelo de Rigidez: as equações para estimativa do módulo de resiliência nem sempre apresentam boas correlações com os resultados dos ensaios de laboratório, em alguns casos, chegam a valores menores que 0,5.
- Análise de Desempenho: a principal incerteza está associada a calibração das funções de transferência de área trincada e deformação permanente, pois, essas são baseadas em medidas de campo e estimadas empiricamente.

A partir da definição da estratégia geral da metodologia apresentada neste capítulo, mesmo considerando todas as incertezas associadas aos modelos, foi possível desenvolver os resultados apresentados no Capítulo 5 e analisá-los.

5 RESULTADOS

Conforme apresentado anteriormente, foram desenvolvidas duas abordagens diferentes para a aplicação da metodologia integrada: uma para pavimentos rodoviários e outra para pavimentos urbanos. Neste capítulo são apresentados os resultados de todos os modelos estudados considerando a integração entre cada um dos subsistemas analisados (clima, sistema viário, sistema hidrológico e sistema de drenagem urbana).

5.1 Pavimentos Rodoviários

Para os pavimentos rodoviários foi utilizado o esquema metodológico indicado na Figura 4.2. De tal forma que, a partir das precipitações (modelo climático) e das condições de escoamento superficial (modelo hidrológico) foram feitas as estimativas de infiltração. Esses resultados foram utilizados como dados de entrada para a modelagem transiente de fluxo em meio poroso não saturado, a partir da qual são calculadas as variações de umidade nas camadas dos pavimentos. As alterações de umidade resultam em modificações na rigidez da estrutura, levando a alteração no seu desempenho.

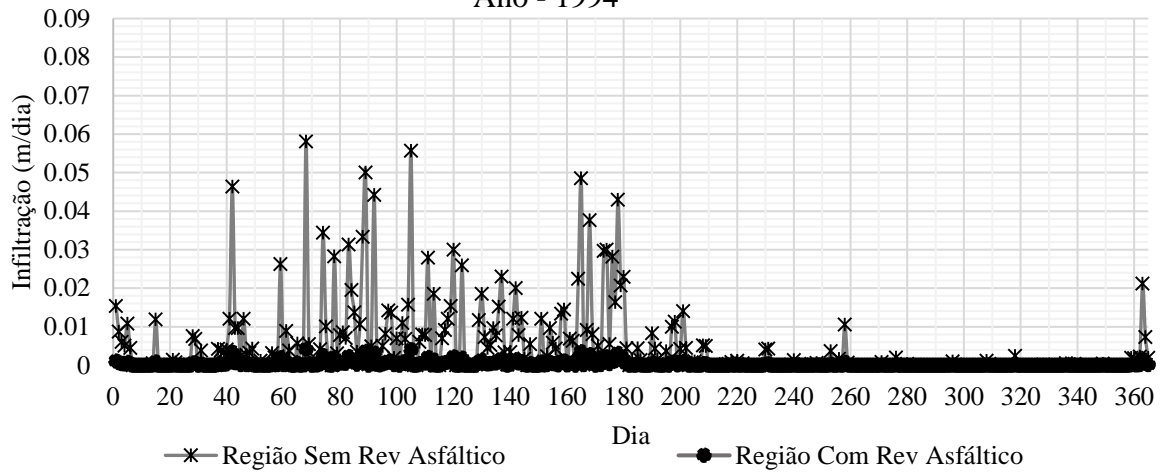
Por fim, são apresentados e analisados os resultados das previsões de mudança climática das precipitações para a região e como estas mudanças poderão afetar o desempenho, a gestão e o projeto das infraestruturas rodoviárias.

5.1.1 Modelo Climático e Hidrológico

Conforme apresentado no Capítulo 4, para o modelo climático foram escolhidos 3 anos da série histórica de precipitações: 1994 (chuvas acima da média), 2013 (chuvas abaixo da média) e 2018 (chuvas na média).

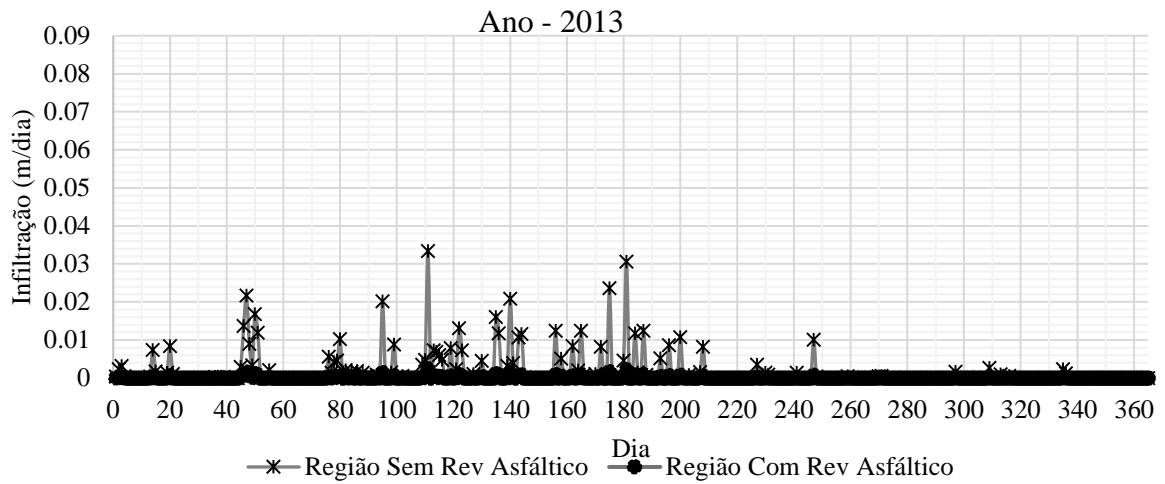
Para o modelo hidrológico, as estimativas de infiltração foram calculadas a partir da Equação 4.8, considerando as precipitações diárias para cada um dos anos analisados, e as condições superficiais do terreno (com e sem revestimento asfáltico). Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são exibidos os valores de infiltração diária, calculados para cada uma das séries históricas de precipitações. Observa-se que devido ao coeficiente de escoamento adotado, as infiltrações na região com revestimento são bem menores que regiões sem revestimento.

Figura 5.1 – Infiltração para o Ano com Precipitações Acima da Média: 1994
Ano - 1994



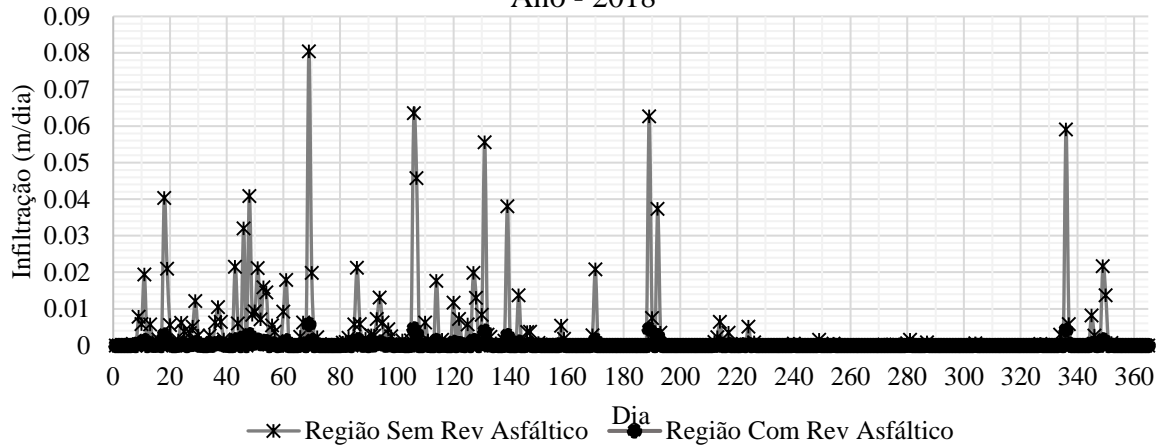
Fonte: Elaboração Própria

Figura 5.2 – Infiltração para o Ano com Precipitações Abaixo da Média: 2013
Ano - 2013



Fonte: Elaboração Própria

Figura 5.3 – Infiltração para o Ano com Precipitações na Média: 2018
Ano - 2018



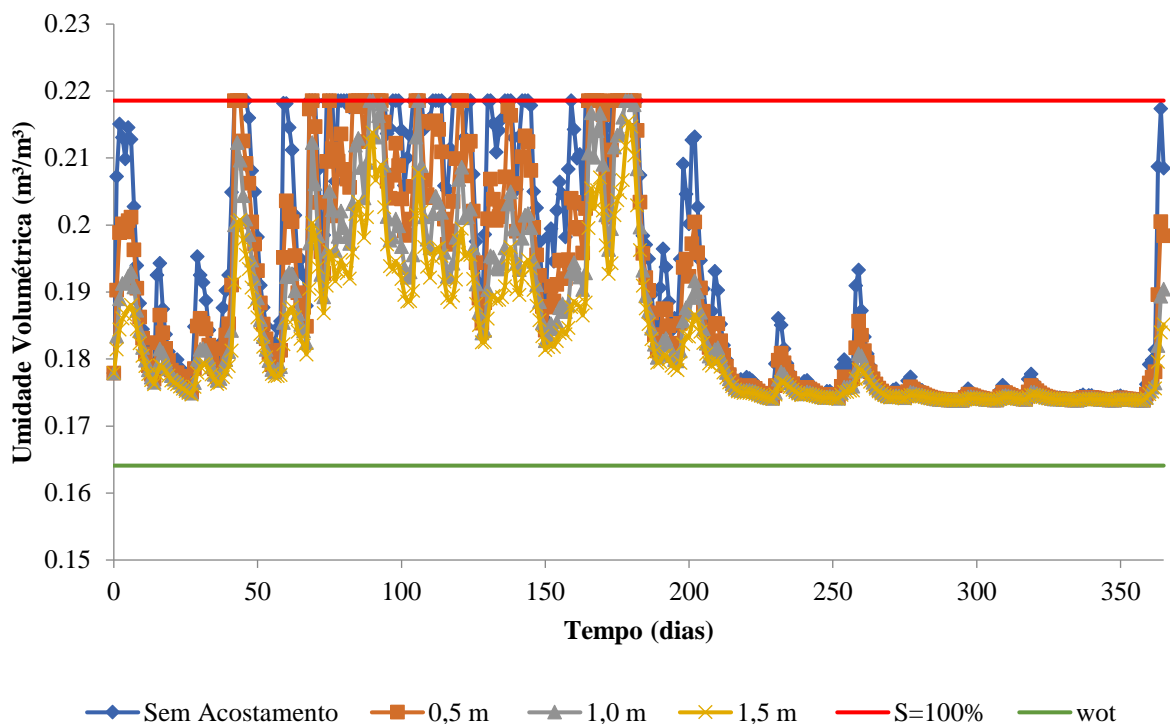
Fonte: Elaboração Própria

Os resultados mostram que mesmo em anos de precipitação na média (2018), podem apresentar dias com infiltração maiores que anos acima da média (1994). Isto ocorre devido a eventos de chuvas intensas. Nesse caso, o ano de 2018 apresentou um dia (65º dia da série histórica) de precipitação mais elevada, gerando um valor máximo de infiltração de 0,08 m/dia. Para o ano de 1994 o máximo valor de infiltração observado foi o 68º dia série histórica, com 0,06 m/dia. No ano de precipitações abaixo da média (2013), o maior valor de infiltração da série histórica foi de 0,033 m/dia.

5.1.2 Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não – Saturado

Considerando as diferentes condições de acostamento (0,0 m; 0,5 m; 1,0m; 1,5 m), as profundidades de nível d'água (3,0 m; 3,5 m; 4,0 m; 4,5 m), as variadas espessuras de revestimentos asfálticos (2,0 cm; 5,0 cm; 10,0 cm), e os três períodos chuvosos (acima da média, abaixo da média, próximo à média), foram modelados um total de 144 cenários. Os resultados de variação de umidade volumétrica para todos esses cenários estão disponíveis no Apêndice D, conforme exemplo apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d'água 3,5 m



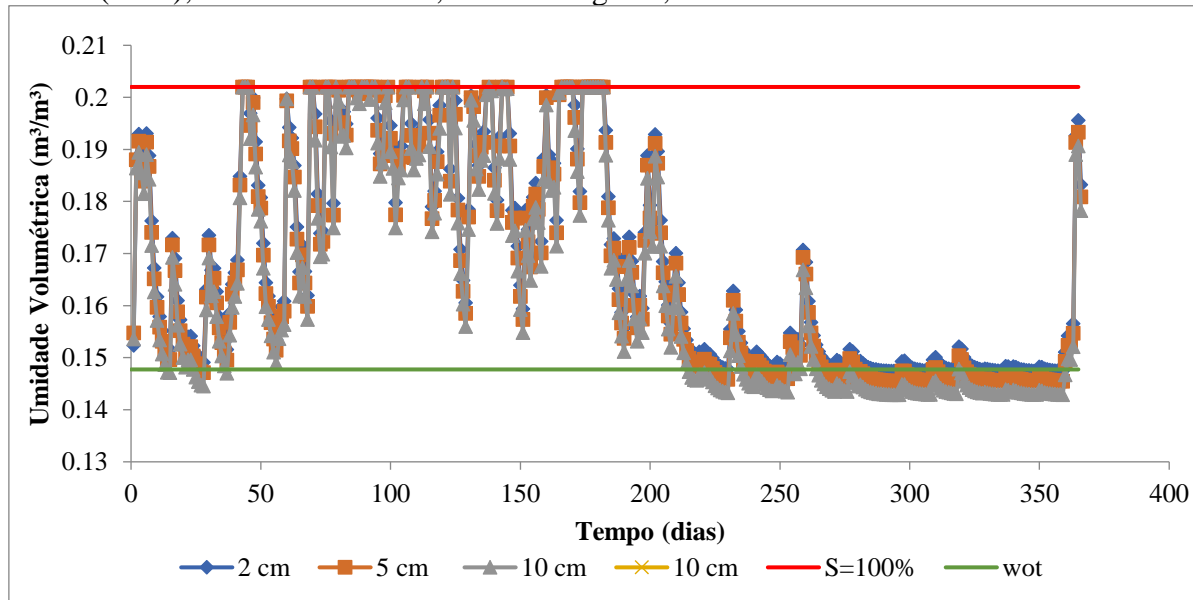
Fonte: Elaboração Própria

A fim de realizar uma análise comparativa da variação de umidade volumétrica entre as diferentes situações, são variados os seguintes parâmetros: espessuras de revestimento, variações de nível d'água e condições de acostamento.

5.1.2.1 Espessura do Revestimento

Os resultados das modelagens para as mesmas condições (nível d'água, precipitações/infiltração e acostamento) com variação das espessuras dos revestimentos asfálticos, indicam uma pequena distinção entre os valores. Conforme pode ser observado na Figura 5.5, mesmo em condições de precipitação acima da média e para pavimentos sem acostamento (pior cenário estudado), a diferença de umidade volumétrica para as camadas do pavimento considerando as diferentes espessuras é de no máximo 2%. Por isso, nas análises a seguir, os resultados apresentados são referentes a espessura de revestimento de 5 cm, devido apresentar-se como um cenário intermediário dentre os três investigados.

Figura 5.5 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Sem Acostamento; Nível de Água 3,5 m



Fonte: Elaboração Própria

5.1.2.2 Condições de Nível d'água

As modelagens de fluxo transiente em meio poroso não saturado indicaram que um fator importante nas análises é a profundidade do nível d'água. A distância das camadas do

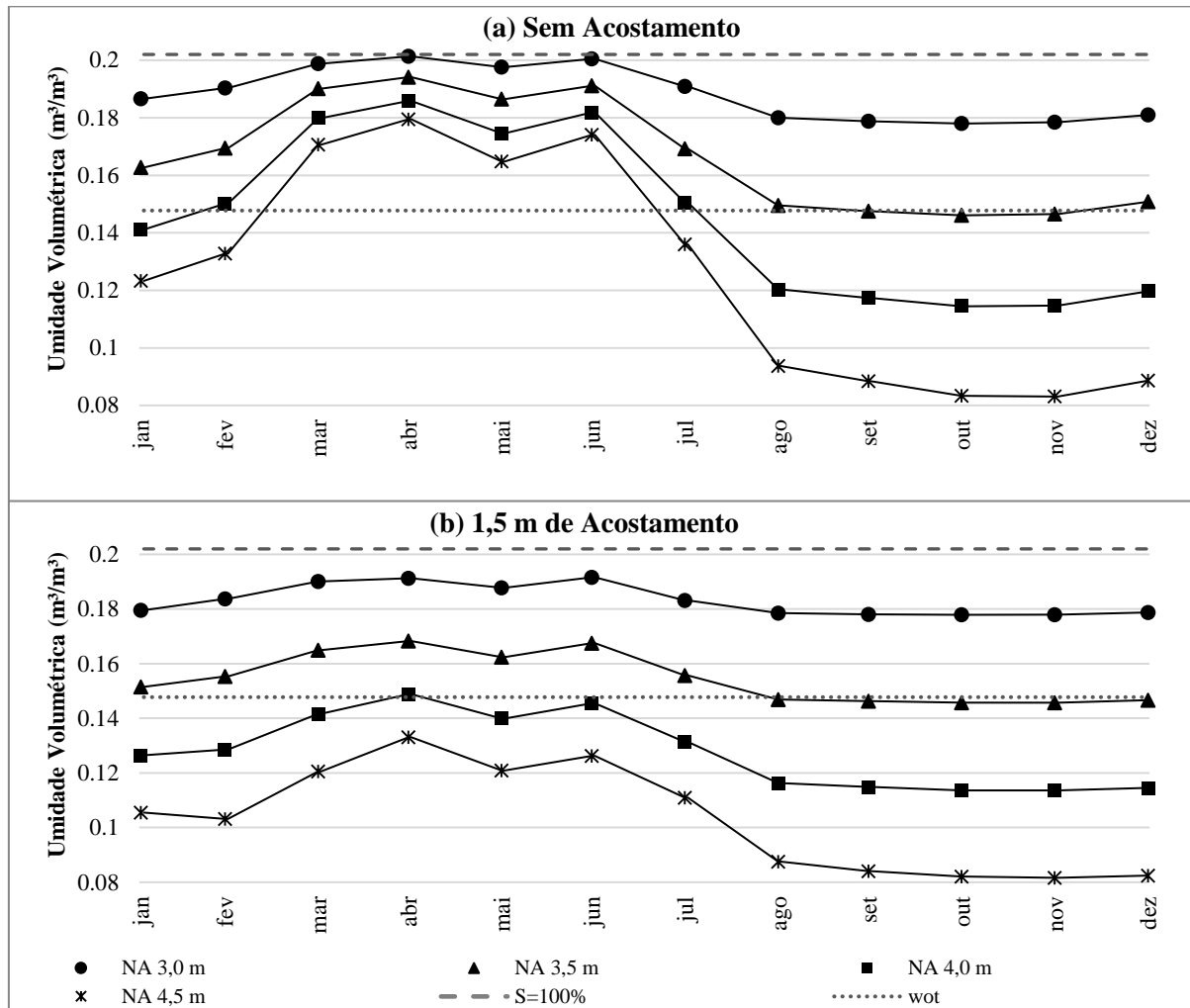
pavimento para o lençol freático influencia diretamente nas condições de umidade do solo, bem como nas variações frente ao clima da superfície (precipitações).

Quanto mais próximo ao lençol freático, maior a proximidade da zona capilar, onde a saturação é de quase 100%. Acima dessa zona, conforme Fredlund *et al.* (2012), o grau de saturação varia de 20% a 90%. Para lençol freático 3 m abaixo da superfície, aproximadamente 2,6 metros abaixo do pavimento, na condição de equilíbrio (sem infiltração), as modelagens indicam que a camada se encontra numa condição de saturação de aproximadamente 85%. Ressalta-se ainda que, conforme o manual do DNIT (2010), pavimentos submetidos às condições de lençol freático elevado devem possuir sistemas de drenagem profunda, instalados preferencialmente entre 1,5 m a 2,0 m de profundidade. Nessas condições, sem o sistema de drenagem, o pavimento estaria na zona capilar ($S = 100\%$) durante toda sua vida útil.

Na Figura 5.6 é apresentada a variação da média mensal de umidade volumétrica na camada de base, para um pavimento submetido a condições de precipitação acima da média (ano de 1994). Observa-se que para a condição sem acostamento há uma variabilidade mensal muito maior que para a condição com 1,5 m de acostamento. Na situação sem acostamento e para todos os níveis de água (NA na legenda) analisados, durante os meses de chuva mais intensa (março, abril e maio), a camada de base permanece com umidade acima da ótima. Verifica-se também que para a condição de nível de água de 3,0 m, nesse mesmo período, a camada permanece em condições de saturação igual a 100%, o que não ocorre para pavimentos com 1,5 m de acostamento.

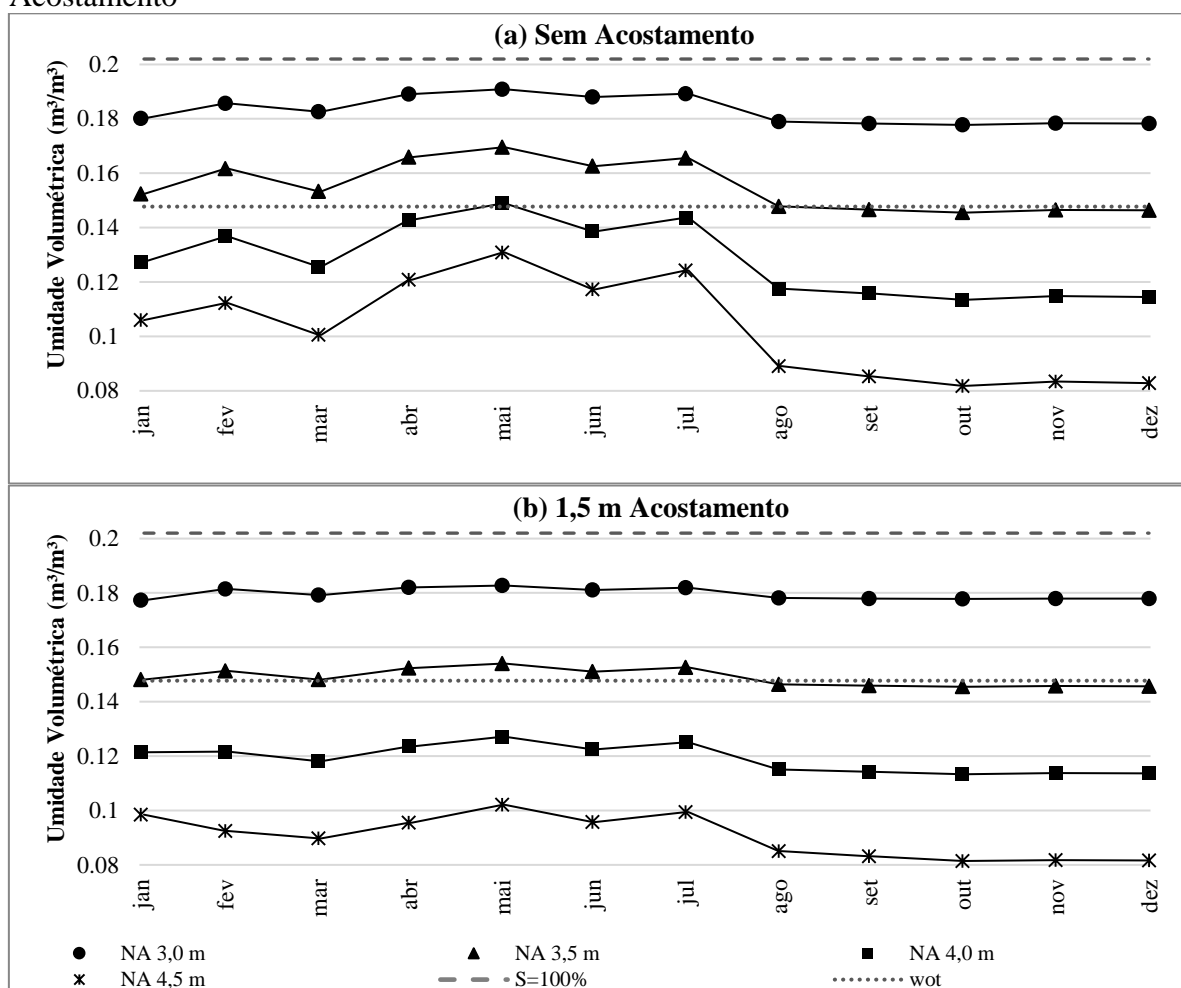
Para anos com precipitações abaixo da média histórica, na Figura 5.7 é exibida a variação média mensal da umidade volumétrica na camada de base. Os resultados indicam que para anos secos, a variabilidade das umidades, mesmo para pavimentos sem acostamentos, é pequena e acontece principalmente nos meses de fevereiro a maio. Para nível de água (NA na legenda) de 4,0 m e 4,5 m, a umidade permanece abaixo da ótima durante o ano todo. Pavimentos com acostamento de 1,5 m permanecem com umidade média mensal similar durante todo o período analisado.

Figura 5.6 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento



Fonte: Elaboração Própria

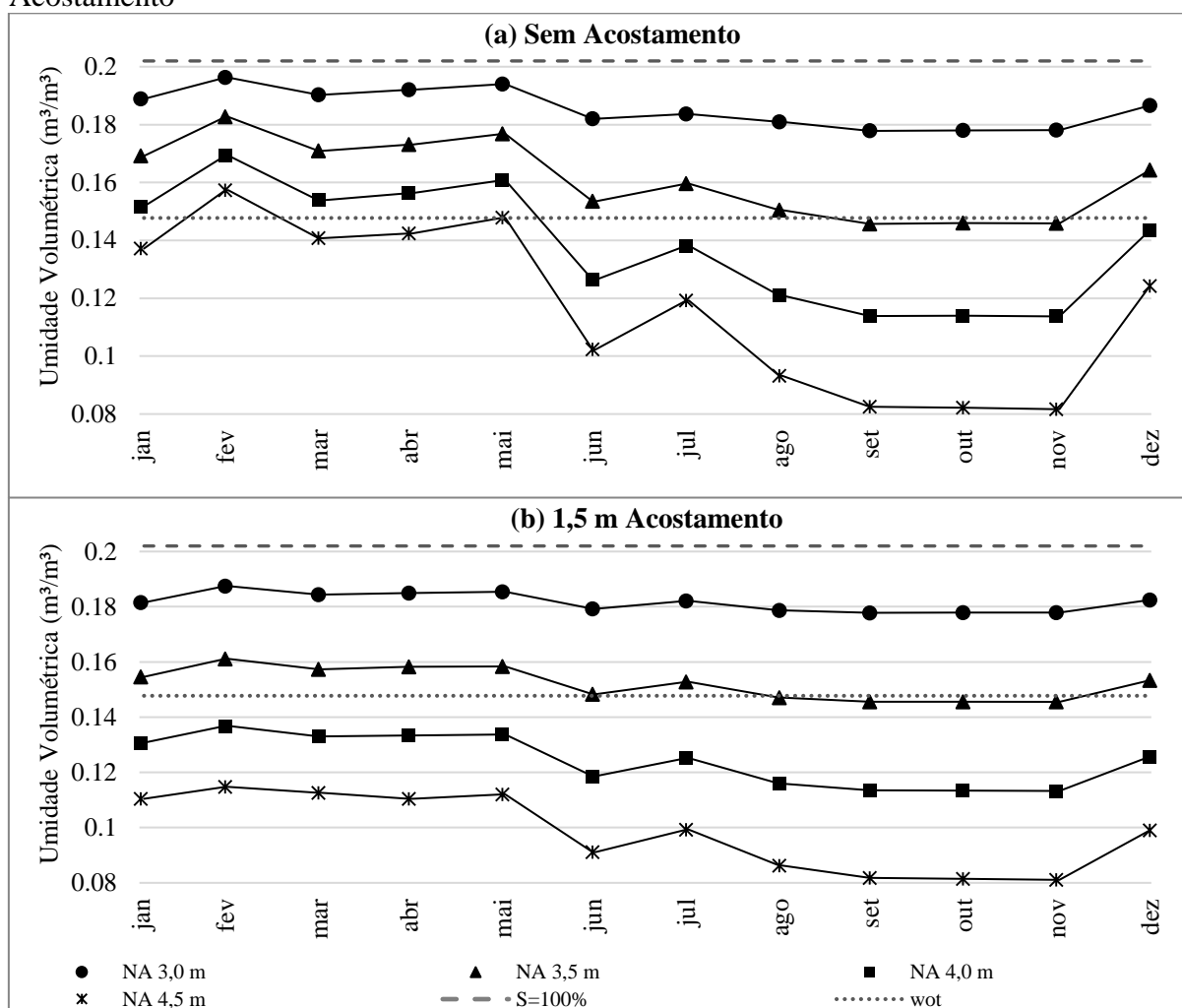
Figura 5.7 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações Abaixo da Média (2013); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento



Fonte: Elaboração Própria

Na situação de precipitações na média, a variabilidade da umidade volumétrica mensal da camada de base é apresentada na Figura 5.8. Nota-se que, conforme as situações anteriores, as maiores variações de umidade concentram-se no primeiro semestre do ano (estação chuvosa da região). Verifica-se que para nível d'água igual 4,5 m, mesmo em condições sem acostamento, a umidade permanece o ano quase todo abaixo da umidade ótima. Comparando-se os mesmos níveis de água e os anos de precipitação abaixo da média e na média, pavimentos com acostamento de 1,5 m apresentam oscilação similar de umidade durante todo o ano, reguladas principalmente pelas forças capilares.

Figura 5.8 – Média Mensal de Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Precipitações na Média (2018); Revestimento 5 cm; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento

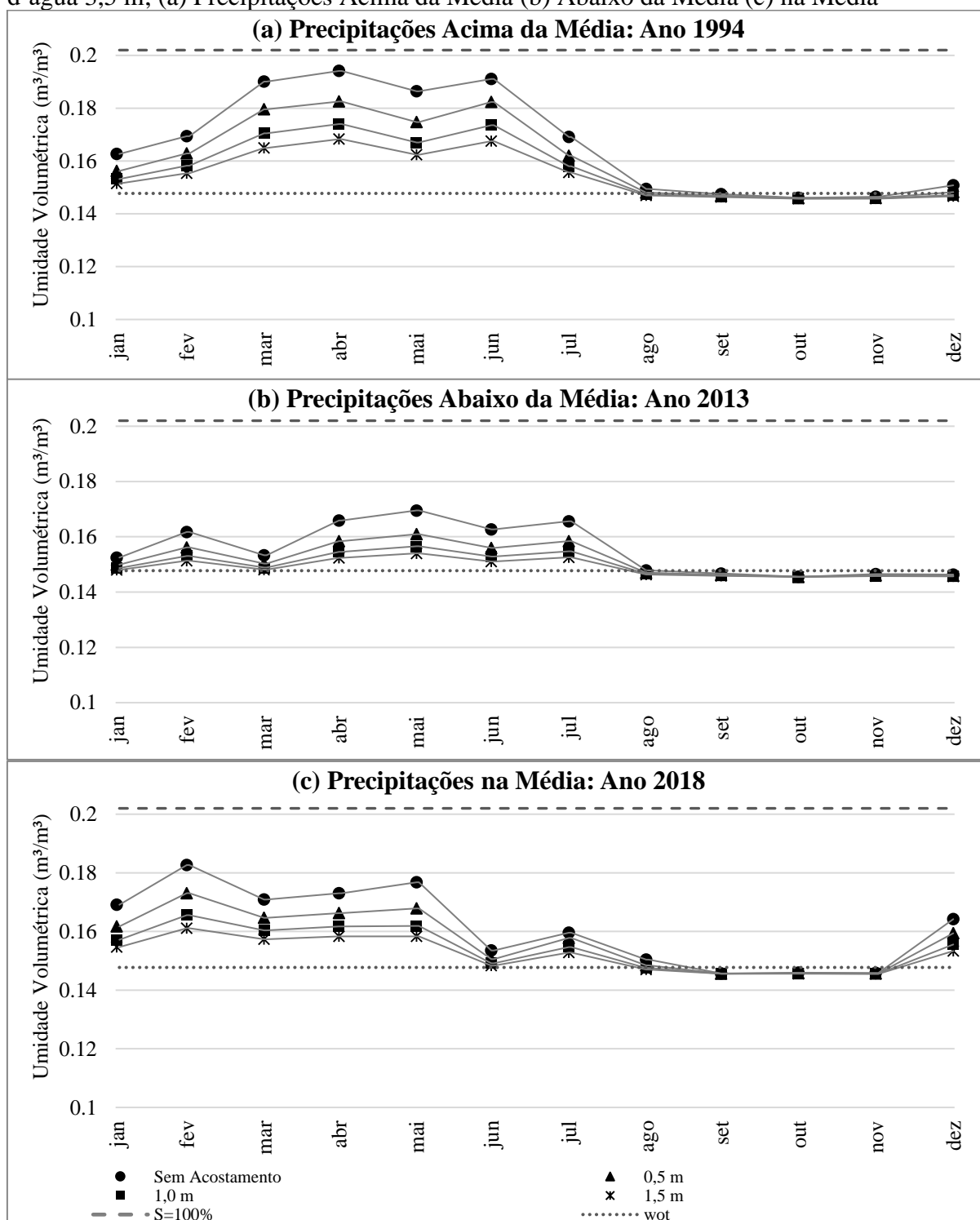


Fonte: Elaboração Própria

5.1.2.3 Condições de Acostamento

Na Figura 5.9 são exibidas as variações de umidade volumétrica da camada de base para nível d'água igual a 3,5 m e os diferentes comprimentos de acostamento. Observa-se que, conforme esperado, os acostamentos reduzem as variações de umidade no pavimento em todos os cenários, principalmente, para anos com precipitações acima da média.

Figura 5.9 – Variação da Umidade Volumétrica da Camada de Base: Revestimento 5 cm; Nível d'água 3,5 m; (a) Precipitações Acima da Média (b) Abaixo da Média (c) na Média

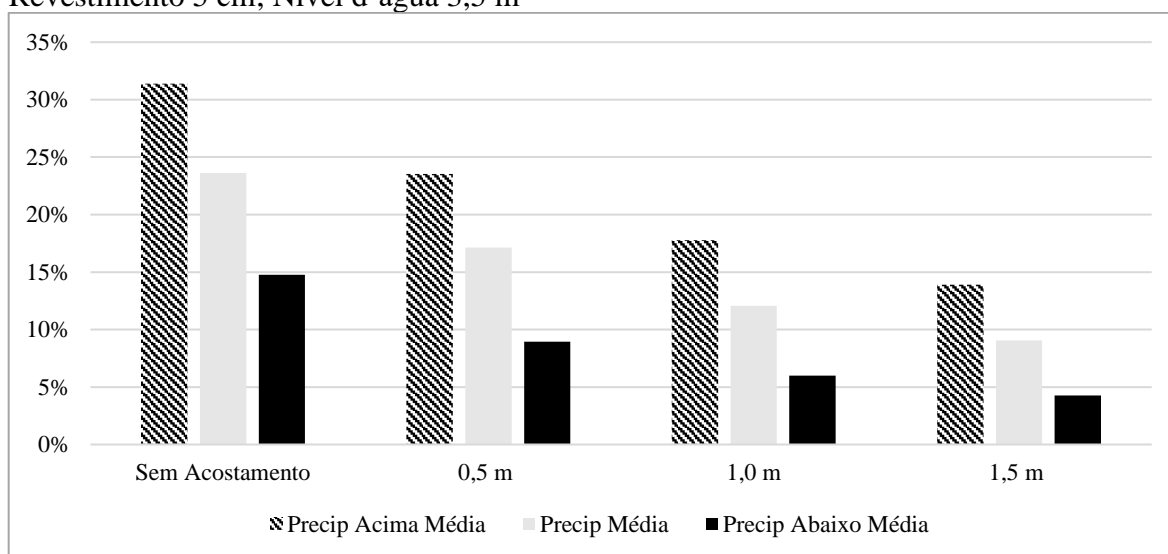


Fonte: Elaboração Própria

Comparando-se a umidade máxima mensal observada com a umidade ótima (Figura 5.10) é possível notar que para anos de precipitações acima da média, o acostamento de 1,5 m reduz em mais 15% a variação da umidade. Para anos de chuvas abaixo da média, essa redução é de aproximadamente 10%.

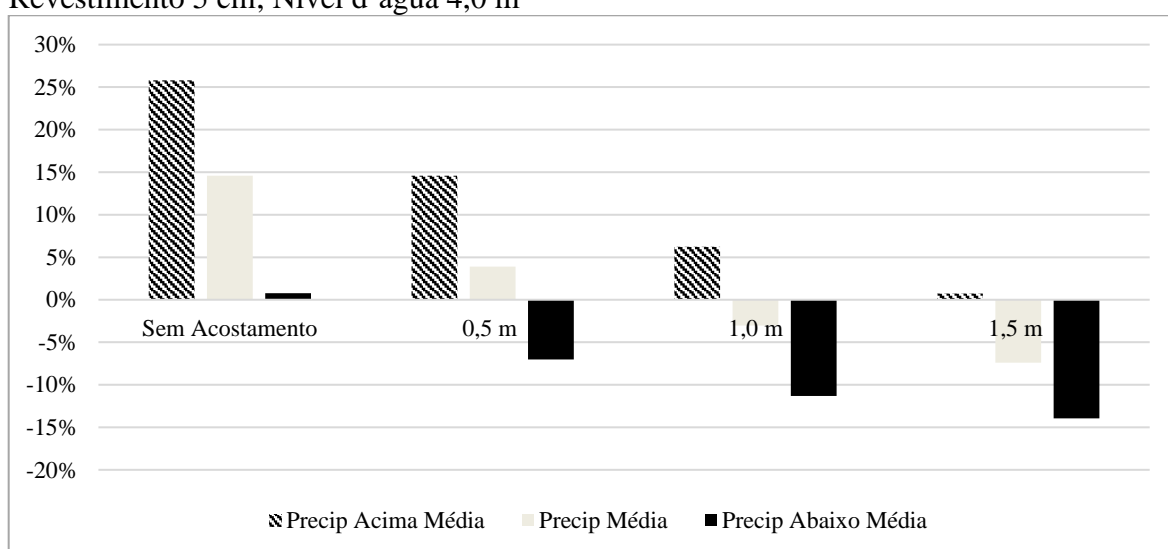
Fazendo a mesma análise comparativa para regiões com nível d'água a 4,0 m de profundidade (Figura 5.11), para anos de elevadas precipitações, pavimentos com 1,5 m de acostamento apresentam uma redução 25% na umidade máxima em comparação às estruturas viárias sem qualquer tipo de acostamento. Para anos de precipitações abaixo da média, essa redução chega a 15%.

Figura 5.10 – Variação percentual das Umidades Máximas em Relação à Umidade Ótima: Revestimento 5 cm; Nível d'água 3,5 m



Fonte: Elaboração Própria

Figura 5.11 – Variação percentual das Umidades Máximas em Relação à Umidade Ótima: Revestimento 5 cm; Nível d'água 4,0 m



Fonte: Elaboração Própria

5.1.3 Modelo de Rigidez do Pavimento

Para o modelo de rigidez do pavimento foi utilizada a Equação 4.24 e os resultados dos ensaios de Bastos (2013). Os coeficientes k_1 , k_2 , k_3 e k_4 apresentados na Tabela 5.1 foram obtidos por meio de regressão linear no Excel.

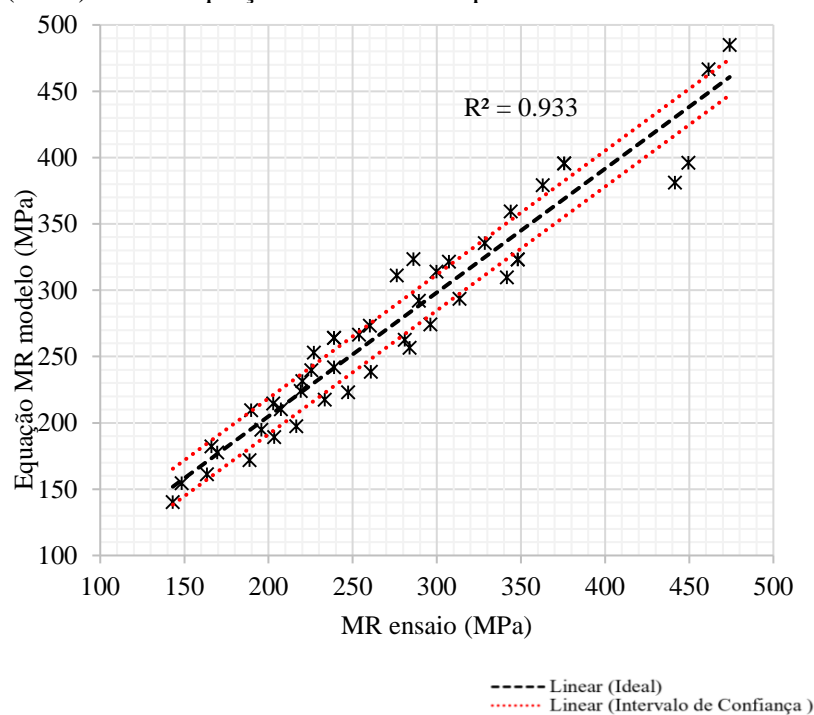
Tabela 5.1 – Coeficientes da regressão para cálculo do MR

Camada	k_1	k_2	k_3	k_4
Base	741	0,282	-0,118	-0,116
Sub-base	474	0,366	-0,359	-0,328
Subleito	627	0,510	-0,237	-0,101

Fonte: Elaboração Própria

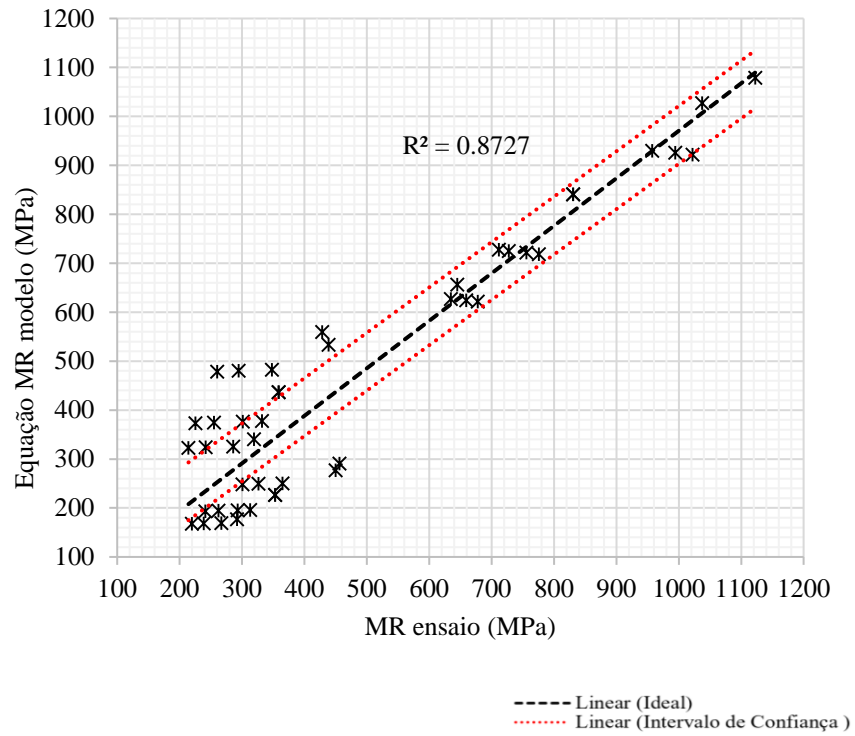
As correlações para o MR calculado utilizando a Equação 4.25 e as equações estudadas por Bastos (2013) podem ser consideradas satisfatórias, pois os valores para o coeficiente de determinação (R^2) obtidos foram de 0,93, 0,87 e 0,77 para os solos do subleito, sub-base e base, respectivamente, conforme pode ser observado nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14.

Figura 5.12 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para o subleito



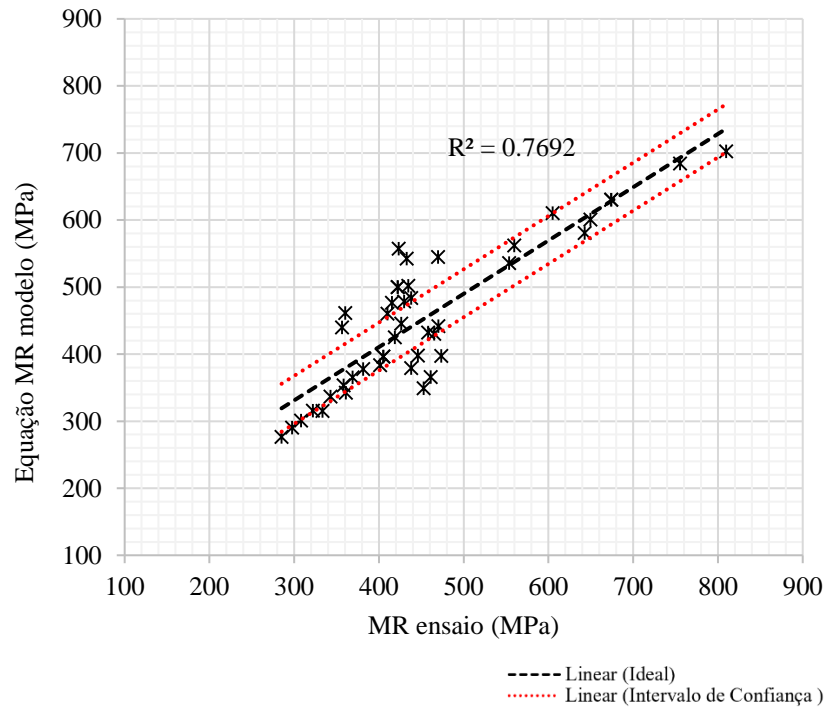
Fonte: Elaboração própria

Figura 5.13 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para a camada de sub-base



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.14 – Correlação do MR obtido nos ensaios de Bastos (2013) com a equação desenvolvida para a camada de base



Fonte: Elaboração própria

Com base na análise dos resíduos apresentada, foi possível determinar as expressões do intervalo de confiança para o módulo de resiliência do ensaio (MR_{ensaio}), em função do valor modelado (MR_{modelo}), considerando um nível de confiança de 95% para os solos de subleito, sub-base e base, respectivamente (valores em MPa):

$$MR_{modelo} - 13,54 \leq MR_{ensaio} \leq 13,55 + MR_{modelo} \quad (5.1)$$

$$MR_{modelo} - 51,12 \leq MR_{ensaio} \leq 67,01 + MR_{modelo} \quad (5.2)$$

$$MR_{modelo} - 34,94 \leq MR_{ensaio} \leq 36,57 + MR_{modelo} \quad (5.3)$$

A definição destes intervalos para o modelo desenvolvido no trabalho, considerando o nível de confiança de 95%, permite considerar a variabilidade inerente ao fenômeno estudado.

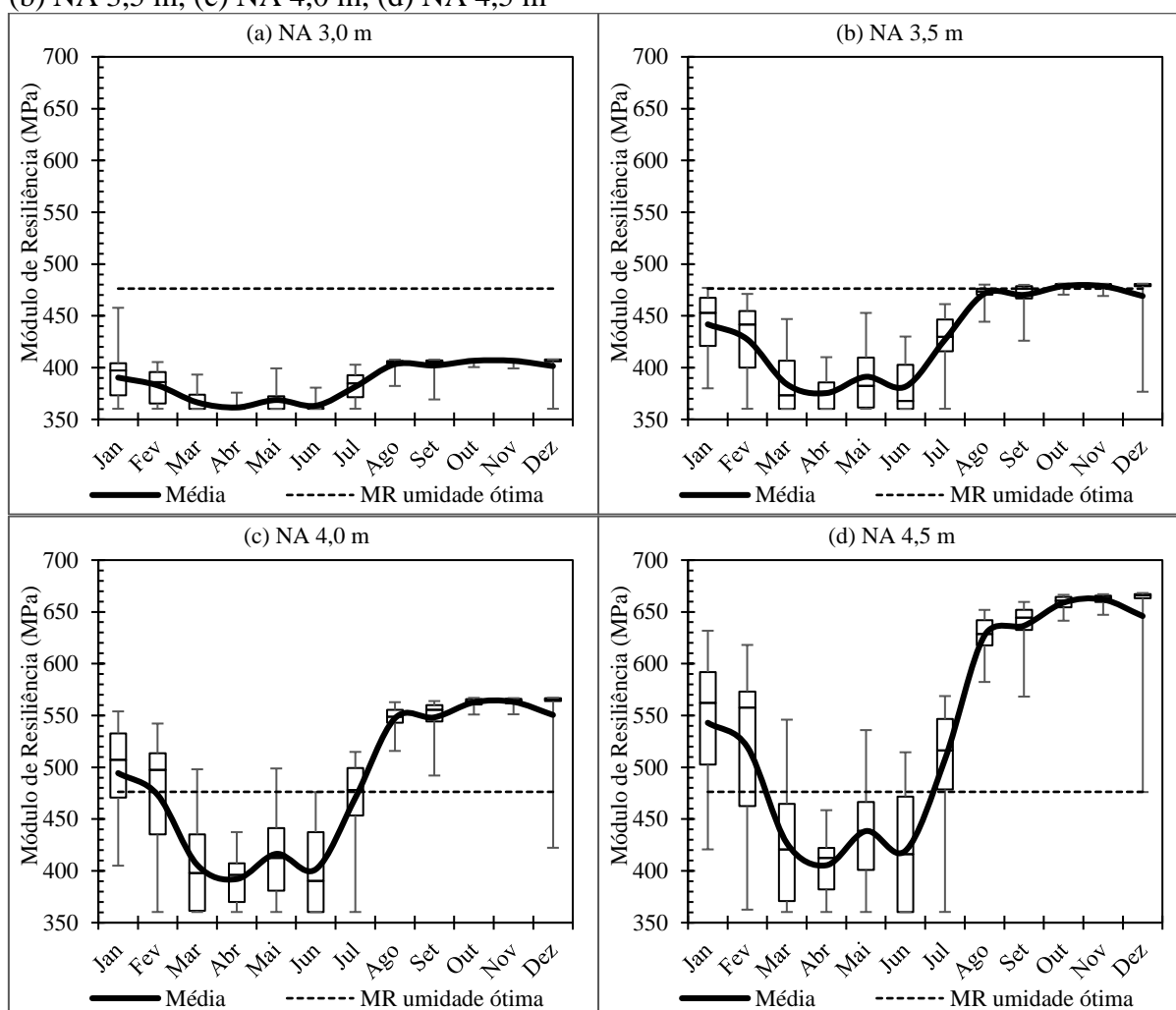
No Apêndice E são apresentadas as variações do módulo de resiliência anual e mensal para a camada de base em todos os 144 cenários estudados. Para essas estimativas foram utilizadas: Equação 4.25, coeficientes indicados na Tabela 5.1, tensão confinante de 0,1034 MPa e tensão desvio de 0,1861 MPa (somente para fins comparativos).

A seguir, são comparadas as variabilidades mensais do módulo de resiliência considerando os diferentes níveis d'água e condições de acostamento para um pavimento com 5 cm de revestimento.

5.1.3.1 Condições de Nível d'água

Na Figura 5.15 é indicada a variabilidade do módulo de resiliência para a camada de base de um pavimento sem acostamento em um ano com precipitações acima da média. Verifica-se que para nível d'água a 3,0 m de profundidade, o módulo de resiliência permanece todo o período com valores abaixo do $MR_{ótimo}$ (módulo de resiliência para umidade ótima), e mesmo em meses de chuvas intensas (janeiro a junho), o valor permanece entre 360 a 390 MPa, atingindo valores médios máximos de 405 MPa no período seco. Condições de nível d'água a 3,5 m apresentam variação de MR de mais de 100 MPa do período chuvoso (primeiro semestre do ano) para o período seco (segundo semestre do ano). Para níveis freáticos de 4,0 e 4,5 m, o segundo semestre do ano apresenta ganhos de rigidez do material, entre 6% a 38% em relação a umidade ótima (nível d'água = 4,5 m).

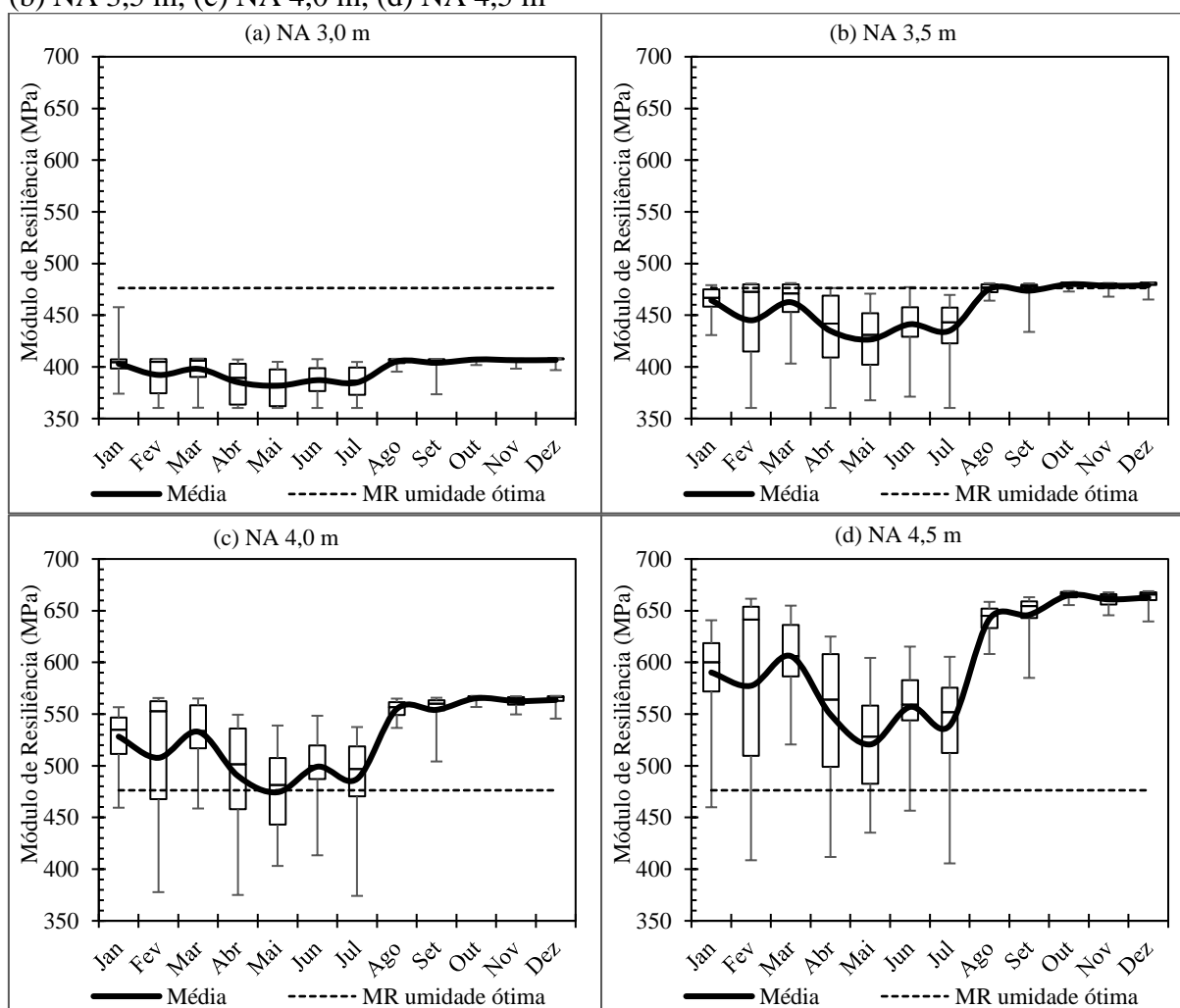
Figura 5.15 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Sem Acostamento; (a) NA 3,0 m, (b) NA 3,5 m, (c) NA 4,0 m, (d) NA 4,5 m



Fonte: Elaboração própria

Para anos com precipitações abaixo da média, de acordo com os resultados apresentados na Figura 5.16, a variabilidade do módulo de resiliência para lençol freático a 3,0 m de profundidade é ainda menor que na condição anterior, permanecendo entre valores de 380 a 400 MPa no primeiro semestre, atingindo valores médios máximos de 405 MPa no período seco. Para nível d'água a 3,5 m, a variação de MR entre o período seco e o chuvoso é reduzida para 50 MPa. Nas condições de nível d'água de 4,0 m e 4,5 m, mesmo sem acostamento, para anos secos, o módulo de resiliência médio mensal permanece acima do ótimo durante todo o ano. Porém, alguns eventos de chuvas intensas, podem reduzir os valores diários de MR até 22% em relação ao MR_{ótimo} (esses resultados podem ser observados nos gráficos bloxpot).

Figura 5.16 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Abaixo da Média (2013); Revestimento 5 cm; Sem Acostamento; (a) NA 3,0 m, (b) NA 3,5 m, (c) NA 4,0 m, (d) NA 4,5 m

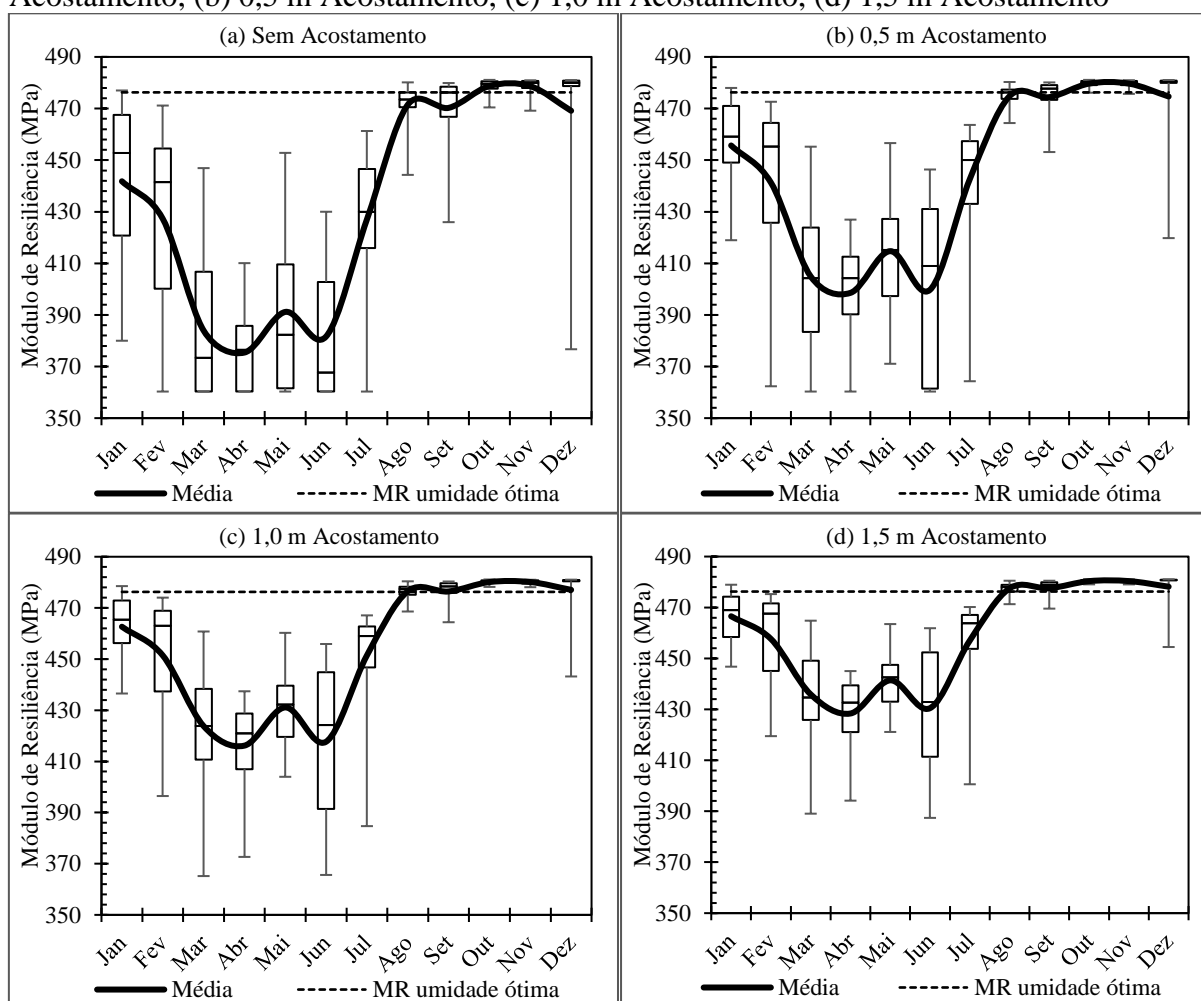


Fonte: Elaboração própria

5.1.3.2 Condições de Acostamento

Para analisar as condições de acostamento, escolheu-se o ano de precipitações acima da média (pior cenário de variação da umidade no pavimento) e nível d'água a 3,5 m de profundidade (Figura 5.17). Constata-se que os acostamentos reduzem a variabilidade mensal e a dispersão do módulo de resiliência. Para pavimentos sem acostamento, a variação do MR entre os dois semestres do ano, é de 100 MPa. Já para o mesmo pavimento em que seja empregada uma infraestrutura de acostamento de 1,5 m, essa variação é reduzida para 40 MPa.

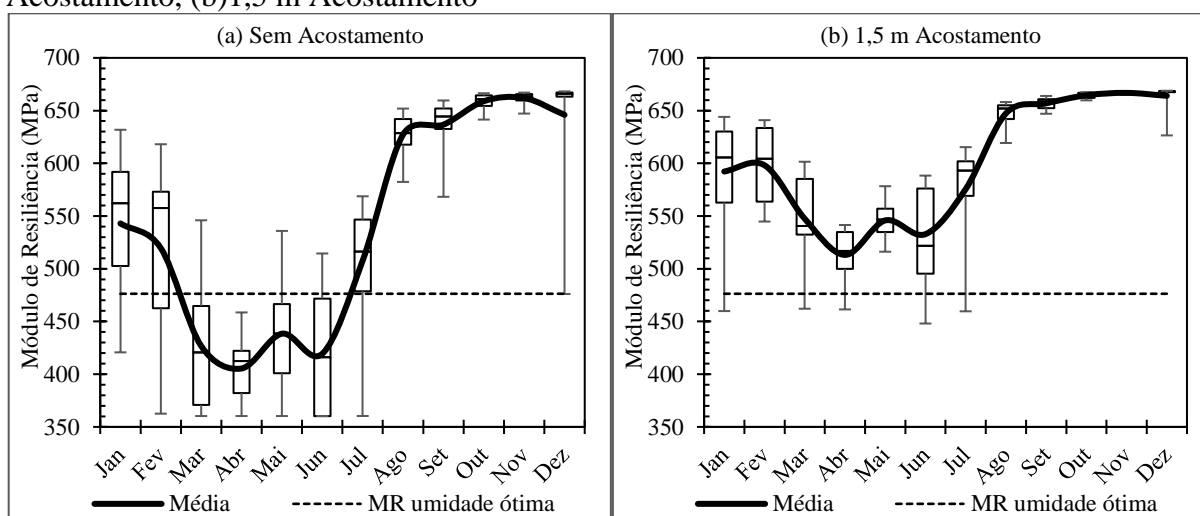
Figura 5.17 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d'água 3,5 m; (a) Sem Acostamento, (b) 0,5 m Acostamento, (c) 1,0 m Acostamento, (d) 1,5 m Acostamento



Fonte: Elaboração própria

Analisando a condição de nível d'água a 4,5 m, de acordo com os resultados indicados na Figura 5.18, mesmo em anos de chuvas intensas, o acostamento de 1,5 m garante que o módulo de resiliência médio mensal permaneça acima do ótimo. Ademais, mesmo em dias de chuvas intensas, os valores mínimos observados apresentam-se no intervalo de confiança do $MR_{\text{ótimo}}$. Comparando a condição sem acostamento, nos períodos dos meses de maiores precipitações (março, abril, maio e junho) a rigidez do material é reduzida a valores menores que a condição ótima.

Figura 5.18 – Variabilidade Mensal do Módulo de Resiliência da Camada de Base: Precipitações Acima da Média (1994); Revestimento 5 cm; Nível d'água 4,5 m; (a) Sem Acostamento, (b) 1,5 m Acostamento



Fonte: Elaboração própria

5.1.4 Análise de Desempenho

Para a análise de desempenho, foram escolhidos 6 cenários dentre todos os modelados. Essa escolha foi feita, pois o software CAP3D-D ainda não possui uma rotina implementada que permita considerar condições de variabilidade do módulo de resiliência, por isso, parte das análises tem que ser feita de forma não automatizada, o que gera um tempo de modelagem muito elevado.

Os cenários escolhidos estão apresentados na Tabela 5.2, foram fixados: espessura do revestimento (5 cm) e nível d'água (3,5 m). Para estimativas de dano, área trincada e deformação permanente foram variados: condições de acostamento (sem acostamento e 1,5 m de acostamento) e precipitações (abaixo da média, média e acima da média).

Tabela 5.2 – Cenário Modelados

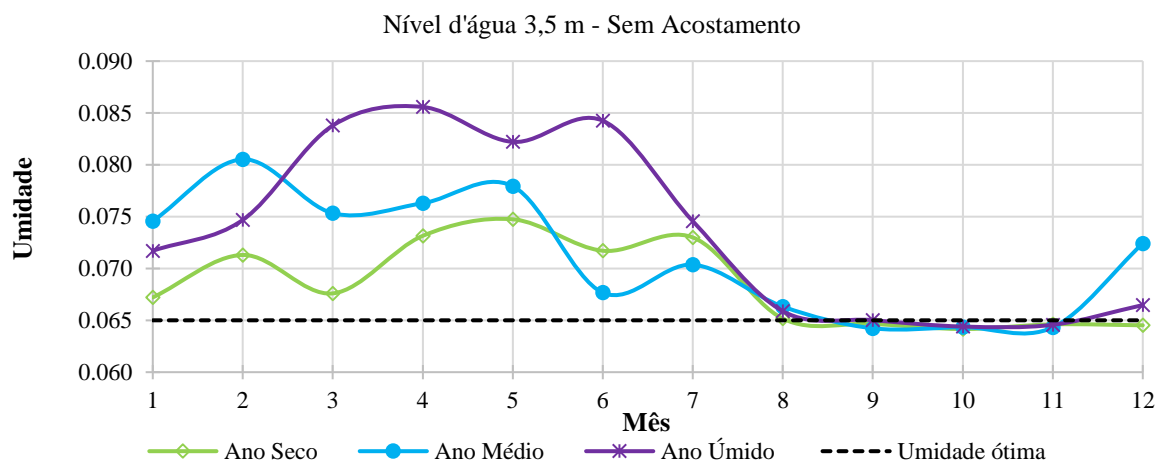
Acostamentos	Precipitações		
	Abaixo da Média	Média	Acima da Média
0 m	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1,5 m	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6

Fonte: Elaboração própria

Para os cenários estudados, na Figura 5.19 (sem acostamento) e na Figura 5.20 (com acostamento) são exibidas as variações de umidade gravimétrica. Esses valores foram utilizados

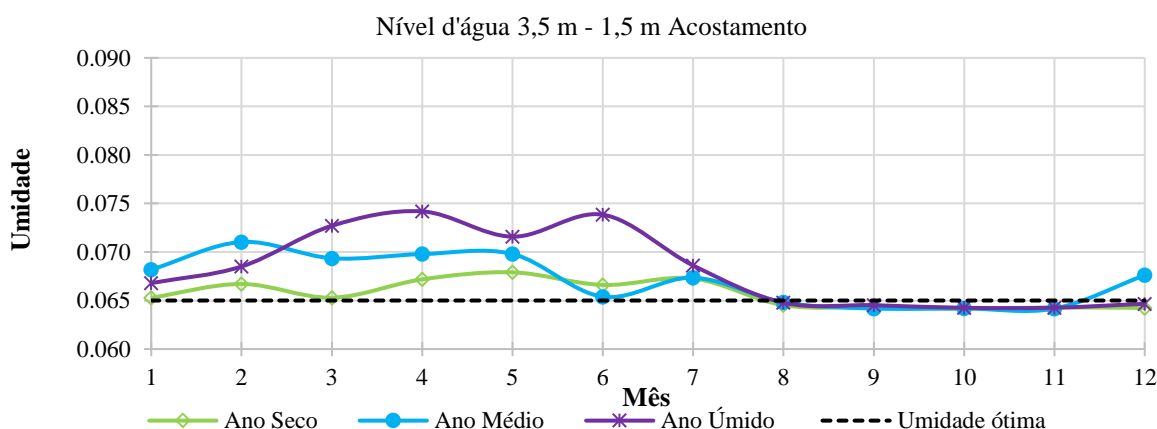
na Equação 4.25 para estimativa do módulo de resiliência na camada de base. As mesmas estimativas foram feitas para a camada de sub-base e para o subleito.

Figura 5.19 – Variabilidade Média Mensal da Umidade Gravimétrica: Cenários Sem Acostamento



Fonte: Elaboração própria

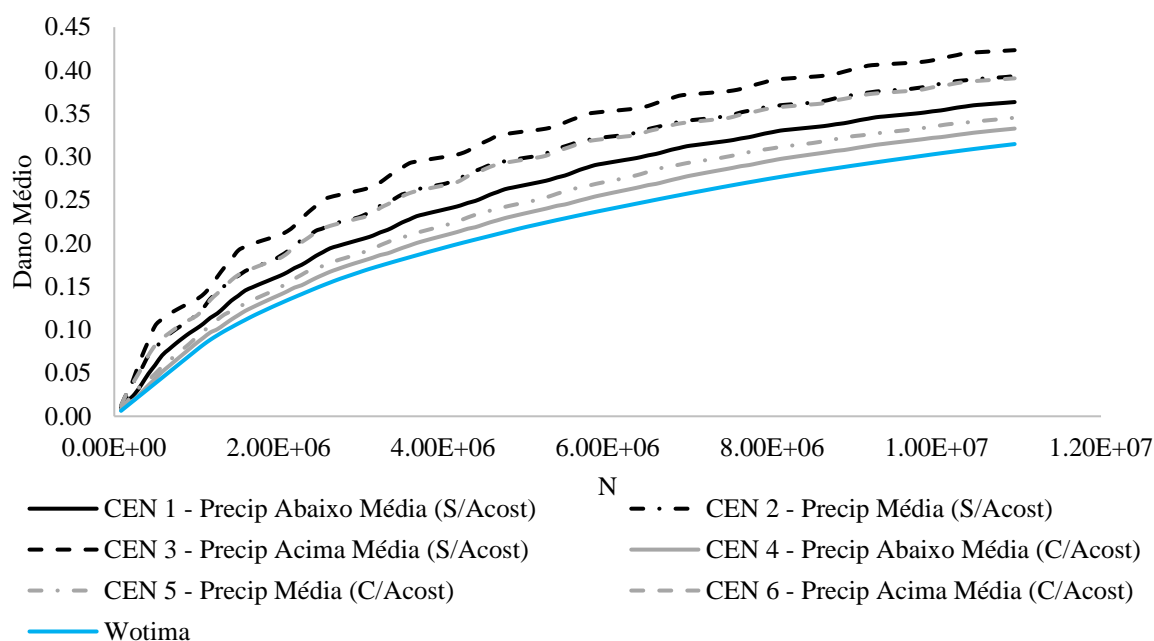
Figura 5.20 – Variabilidade Média Mensal da Umidade Gravimétrica: Cenários Com Acostamento



Fonte: Elaboração própria

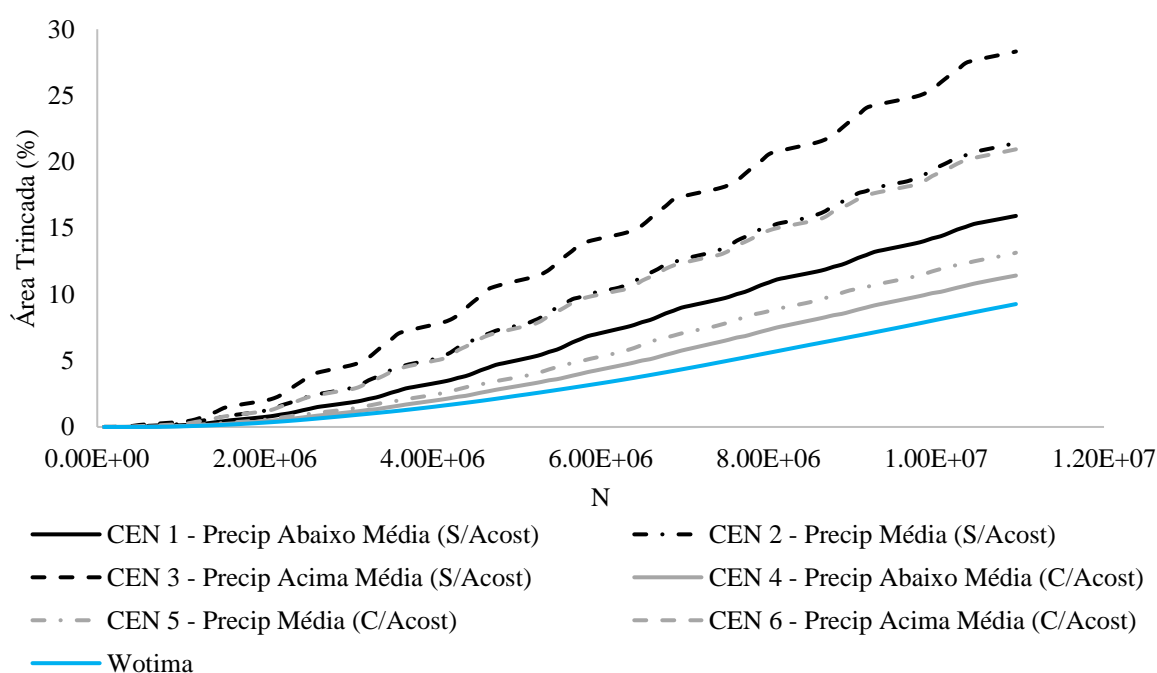
As estimativas de dano médio e porcentagem de área trincada para os 6 cenários são indicadas na Figura 5.21 e Figura 5.22, respectivamente. Conforme esperado, o pior cenário é o 3 (precipitações acima da média, sem acostamento), com maiores valores de dano e área trincada. Já o melhor cenário, com resultados próximos aos da condição de umidade ótima, é o 4 (precipitações abaixo da média, com acostamento).

Figura 5.21 – Dano Médio



Fonte: Elaboração própria

Figura 5.22 – % de Área Trincada



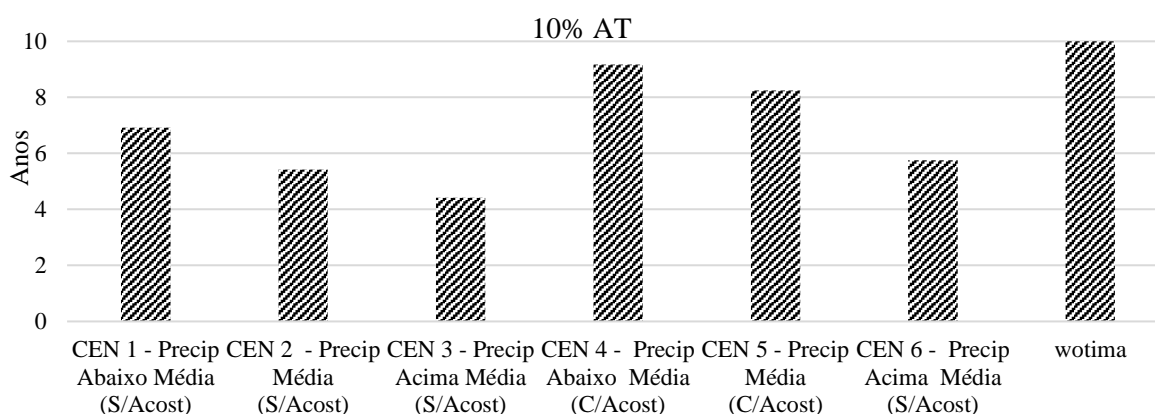
Fonte: Elaboração própria

A fim de identificar a mudança na vida útil das estruturas nos cenários analisados, identificou-se qual o período (anos) para atingir 10% de área trincada, sendo estes resultados expostos na Figura 5.23. Comparando os anos de precipitação acima da média (Cenário 3 e Cenário 6) é possível observar que o acostamento aumenta o período para atingir 10% AT em

até 1,3 anos. Considerando anos com precipitação média (Cenário 2 e Cenário 5), esse aumento é de 2,8 anos. Já para os anos mais secos (Cenário 1 e Cenário 4) o acréscimo é 2,3 anos.

Comparando os cenários do modelo integrado com a condição do módulo de resiliência constante (determinado na condição de umidade ótima), verifica-se que a redução percentual do tempo para atingir 10% de área trincada para pavimentos com acostamento varia 31% a 56%. Essa redução para as condições com 1,5 m de acostamento varia de 8,3% a 42,5%. Observa-se em todos os cenários, uma redução de vida útil que oscila de 1 a 5,6 anos quando comparados ao dimensionamento mecanístico-empírico com $MR_{ótimo}$.

Figura 5.23 – Período para Atingir 10% de Área Trincada



Fonte: Elaboração própria

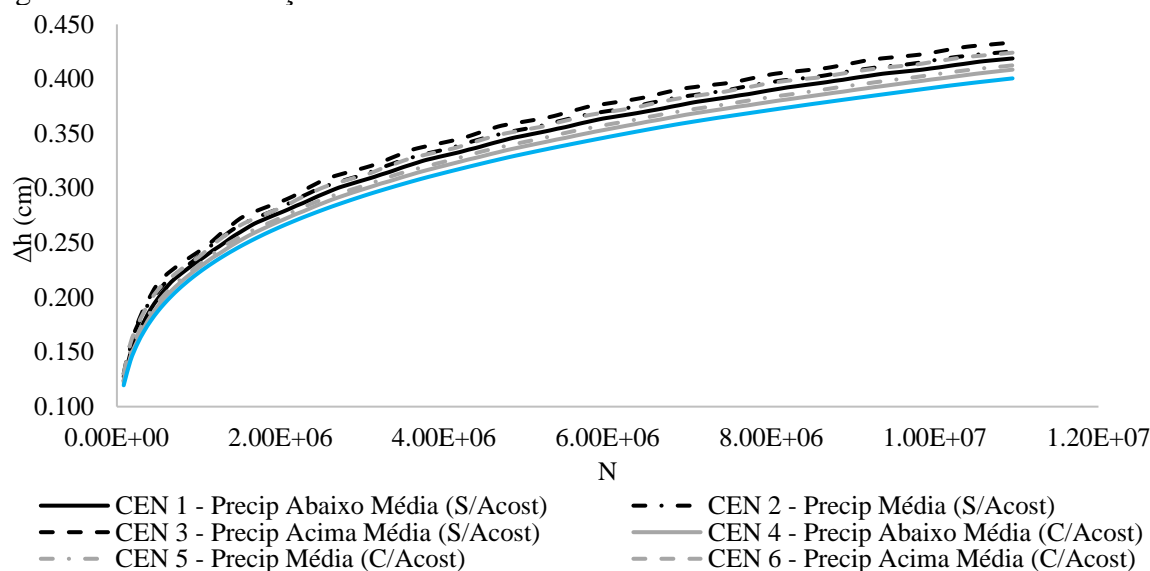
Para cálculo da deformação permanente, considerando todas as camadas do pavimento, o CAP 3D-D ainda não possui funções de transferência validadas com dados de campo, assim como dispõe para %AT. As estimativas de deformação permanente do revestimento asfáltico foram feitas a partir da determinação do estado de tensões. Em seguida, são calculadas as deformações viscoplásticas, para a partir da integração numérica pela regra do trapézio determinar-se a deformação permanente. Esses resultados são mostrados na Figura 5.24 e indicam, assim como para %AT, que o pior cenário é o 3.

Comparando a deformação permanente máxima da condição de umidade ótima com os cenários do modelo integrado, observa-se que para as estruturas sem acostamento, há uma redução de 12,5% a 24,2% no período necessário para atingir a mesma deformação máxima da condição ótima. Já para estruturas com acostamento, esta redução de tempo varia de 3,3% a 17,5%.

Observa-se que mesmo para anos de precipitação abaixo da média e com acostamento, os resultados indicam condições de deformação permanente e área trincada piores

que o dimensionamento considerando o $MR_{\text{ótimo}}$. Isto ocorre, pois mesmo no período seco, conforme apresentado na Figura 5.5, o MR permanece abaixo do ótimo.

Figura 5.24 – Deformação Permanente do Revestimento



Fonte: Elaboração própria

5.1.5 Cenários de Mudança Climática

Para os cenários de mudança climática, foram realizadas as projeções de precipitações para os anos de 2031 a 2070 usando os 5 *General Circulation Models* apresentados na Tabela 4.1 e considerando os cenários RCP's 4.5 e 8.5 do CMIP5. Esses resultados foram ajustados por meio da distribuição gama. Nas Figuras 5.25 e 5.26 são exibidas as distribuições de frequências das precipitações para as projeções RCPs 8.5 e 4.5, respectivamente.

O cenário RCP 8.5 é o mais conservador e pessimista, porém, conforme descrito por Vuuren *et al.* (2011) é o que possui a maior probabilidade de acontecer. Para a região em estudo, observa-se, nesse cenário, uma maior frequência de anos com precipitações abaixo da média histórica para todos os modelos analisados. Os modelos BCC-CSM1 (RCP 8.5), CanESM2 (RCP 8.5) e CESM1-CAM5 (RCP 8.5) apontam ainda para uma redução das precipitações mínimas.

Conforme exposto no Capítulo 2, o cenário RCP 4.5 está associado a uma baixa taxa de emissão de gases do efeito (comparadas ao cenário RCP 8.5) estufa e considera que haverá uma quantidade regular de medidas político-ambientais aplicadas pelos países (VUUREN *et al.*, 2011). A maioria dos modelos (BCC-CSM1, CanESM2, CESM1-CAM5,

inmcm4), para esse cenário, indica que para RMF também deverá haver uma maior frequência de anos com precipitações abaixo da média histórica. Já o modelo MIROC5 (RCP 4.5) projeta uma maior frequência de precipitações acima da média histórica.

Figura 5.25 – Frequência Acumulada das Precipitações para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 8.5

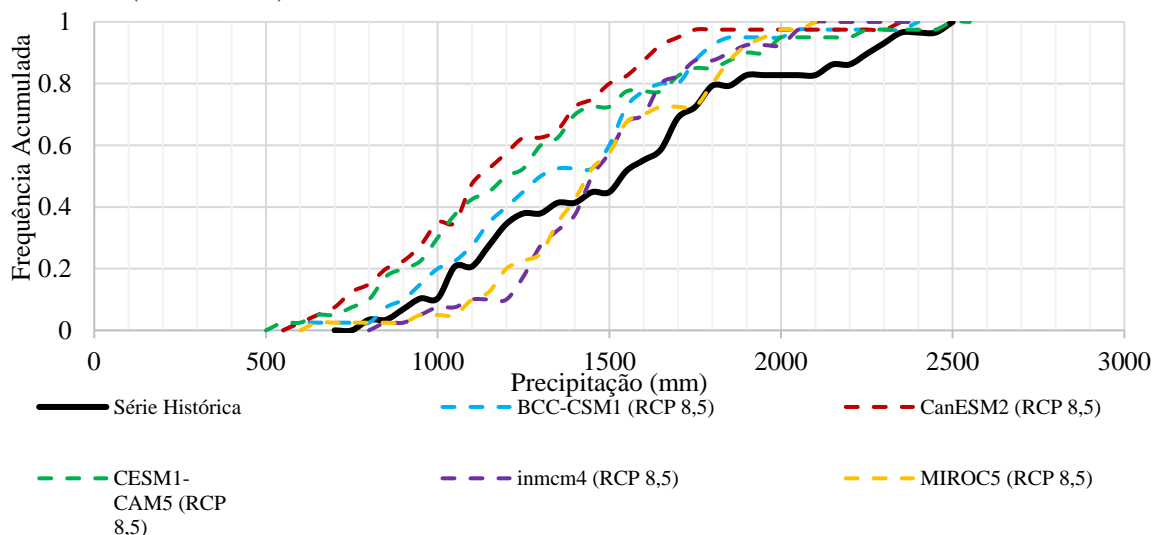
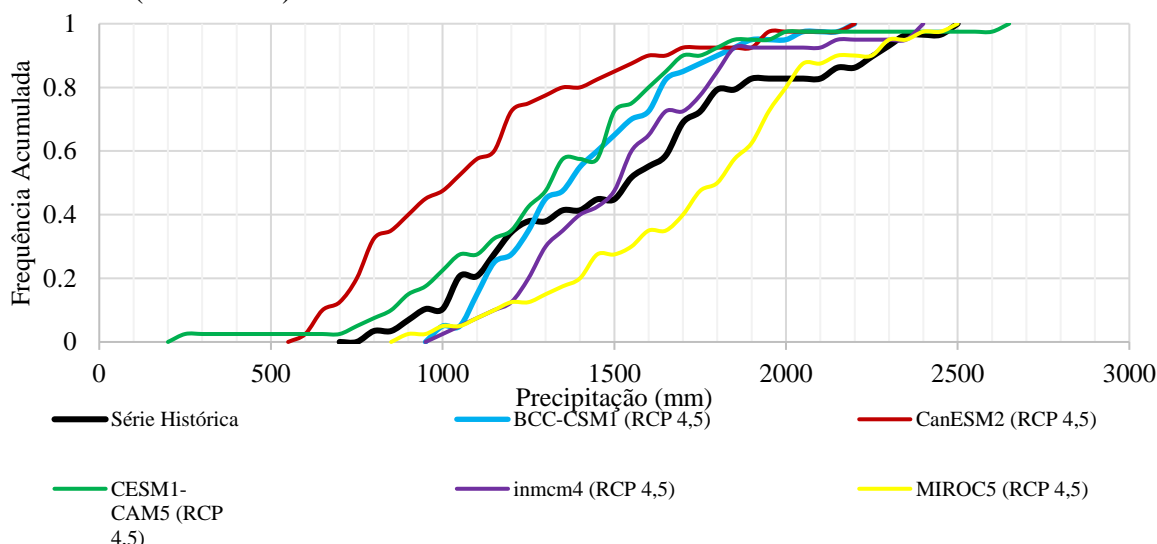


Figura 5.26 – Frequência Acumulada das Precipitações para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 4.5



Na Figura 5.27 são apresentadas as distribuições das precipitações da série histórica e dos modelos de mudança do clima para o século XXI (2031 a 2070). Para comparar e analisar os resultados, foram calculadas as anomalias de precipitação mínima, média e máxima, calculadas conforme as Equações 4.1, 4.2 e 4.3 (Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

As anomalias de precipitação mínima para as projeções dos cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 são divergentes. Para o RCP 8.5, as anomalias de precipitação mínima variam de -23% a 9%, porém 4 dos 5 modelos indicam anomalias negativas. Já para o RCP 4.5 a variabilidade das anomalias é muito maior, de -73% a 29%, apresentando 3 modelos com anomalias positivas.

Para as anomalias de precipitação média, todas as projeções RCP 8.5 apresentam valores negativos (-2% a 22%). Nos cenários RCP 4.5 essas anomalias para o Modelo inmcm4 apontam que não haverá alteração, enquanto os Modelos BCC-CSM1, CanESM2, CESM1-CAM5 apresentam anomalias negativas e o Modelo MIROC5 é o único que indica valores de anomalia positiva.

No período de 2031 a 2070, as projeções dos cenários de precipitações máximas RCP 4.5 e RCP 8.5 são muito semelhantes. Os modelos apontam valores de anomalia entre -17% e 5%.

Tabela 5.3 – Anomalias de Precipitações Máxima, Média e Mínima para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 8.5

	BCC-CSM1	CanESM2	CESM1-CAM5	inmcm4	MIROC5
Mínimo	-21%	-23%	-28%	9%	-15%
Média	-11%	-22%	-16%	-2%	-3%
Máximo	-5%	-6%	4%	-2%	-17%

Fonte: Elaboração Própria

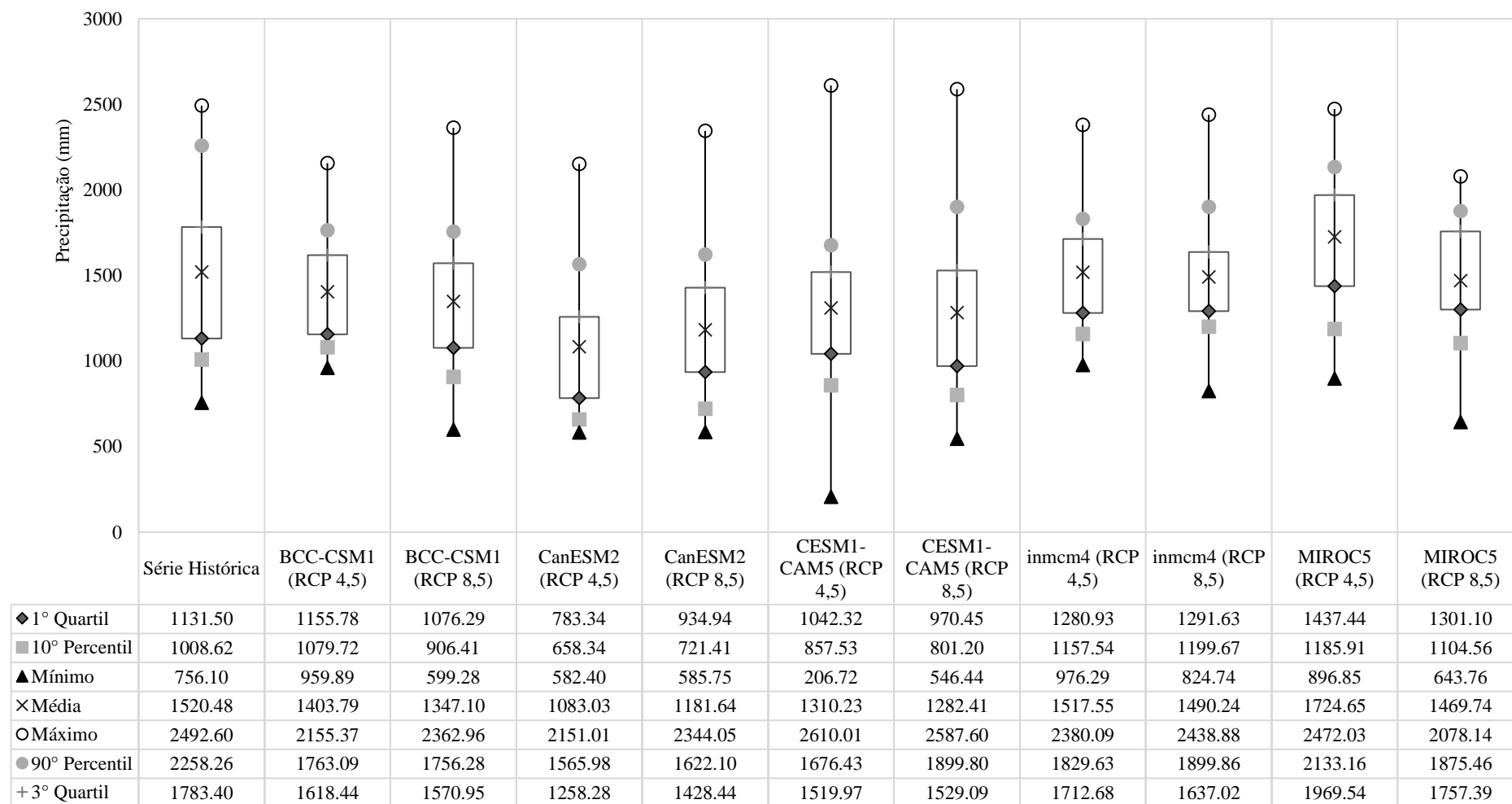
Tabela 5.4 – Anomalias de Precipitações Máxima, Média e Mínima para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070) – RCP 4.5

	BCC-CSM1	CanESM2	CESM1-CAM5	inmcm4	MIROC5
Mínimo	27%	-23%	-73%	29%	19%
Média	-8%	-29%	-14%	0%	13%
Máximo	-14%	-14%	5%	-5%	-1%

Fonte: Elaboração Própria

De forma geral, a maioria dos cenários climáticos aponta que para o século XXI, os pavimentos da região estarão submetidos a uma maior frequência de anos com precipitação abaixo da média, indicando uma maior constância de cenários de infiltração, conforme indicado na Figura 5.2. As precipitações máximas podem chegar a reduções de até -17% e a um aumento máximo de 5%, porém, a maioria dos modelos indica que essas devem ocorrer em menor frequência. Assim, os Cenários 3 e 6 da análise de desempenho apresentam uma menor probabilidade de acontecer.

Figura 5.27 – Gráfico Bloxpot: Série Histórica e Cenários de Mudança do Clima Século XXI (2031-2070)

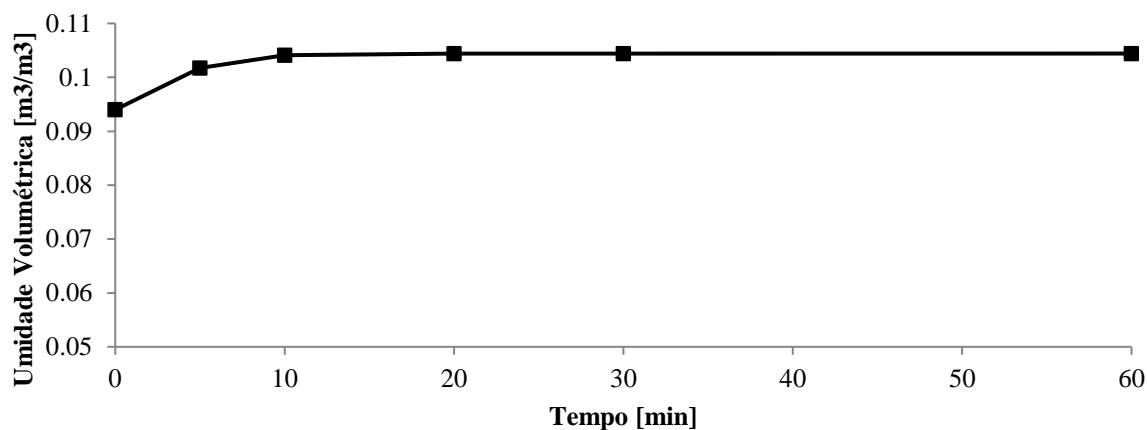


Fonte: Elaboração Própria

5.2 Pavimentos Urbanos

Para os pavimentos urbanos, na região estudada (Bairro Damas), todas as superfícies do terreno foram consideradas impermeáveis. Nas situações analisadas, mesmo em condições de lâmina d'água sobre o pavimento de até 1,0 m, não ocorreram variações relevantes de umidade nas camadas constituintes do pavimento, conforme pode ser observado na Figura 5.28, essas variações não chegaram a 10%. Por isso, os principais resultados analisados na pesquisa são referentes às variações das vazões na sub-bacia, considerando os modelos de mudança climática, a fim de analisar as consequências nas infraestruturas de águas urbanas na região.

Figura 5.28 – Variação da Umidade Volumétrica no Subleito



Fonte: Elaboração Própria

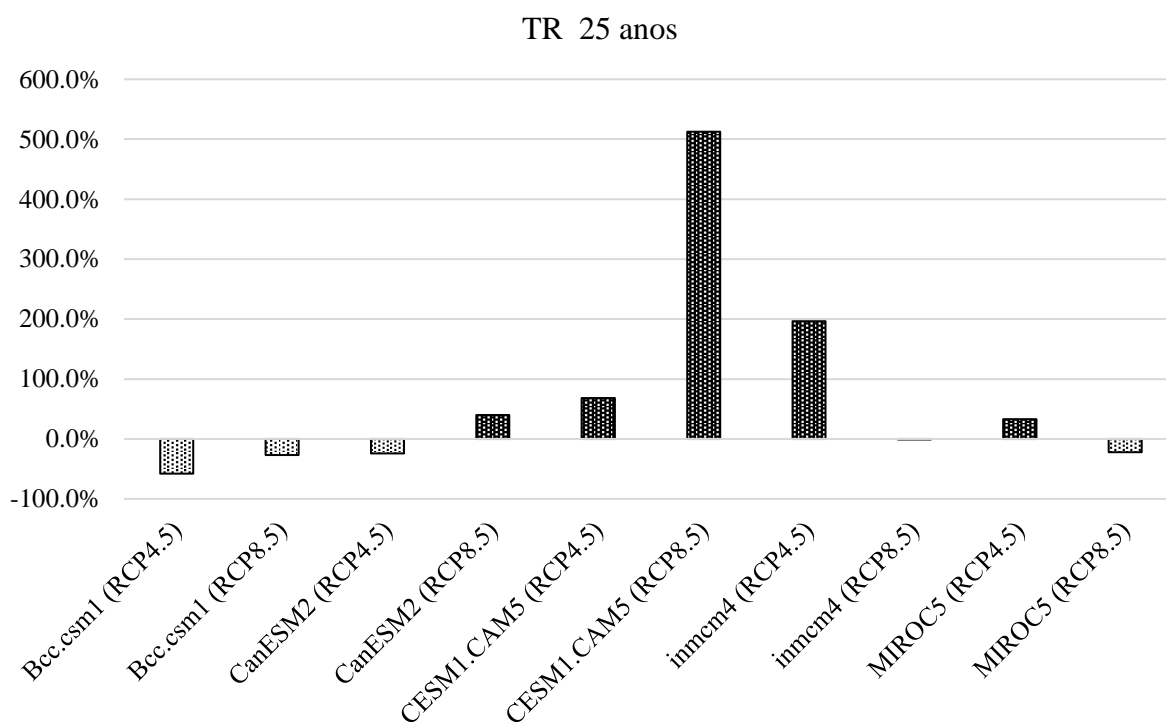
Com base nas IDF's da AUMEF e de Sabóia *et al.* (2017), inicialmente, foram realizadas estimativas de vazões resultantes de chuvas com período de retorno 25, 50 e 100 anos. Em seguida, foram calculadas as variações percentuais dos picos de vazões na saída do sistema (exutório do trecho estudado), com relação aos valores, inicialmente, projetados com base na equação da AUMEF (Figuras 5.28, 5.29 e 5.30).

Considerando o cenário de mudança climática RCP 4,5, constatou-se que 3 (CESM1.CAM5, inmcm4 e MIROC5) dos 5 modelos utilizados resultaram em aumento da vazão no final para todos os períodos de retorno analisados. Em relação às mudanças nos picos de vazões no cenário RCP 4,5, percebe-se que as maiores variações percentuais foram oriundas do modelo inmcm4 (TR 25 anos = 196,5%; TR 50 anos = 259,6%; TR 100 anos = 329,6%). O modelo Bcc.csm1 aponta para uma redução média de 60% nos picos de vazões.

Para o cenário RCP 8,5, ocorreram aumentos ainda mais significativos nas vazões. O modelo CESM1.CAM5 indica incrementos de vazões de 400% a 600%. Porém, os modelos Bcc.csm1 e MIROC 5 apontam para uma tendência na redução de vazões, e o modelo inmcm4 projeta que não haverá alteração nos picos de vazões.

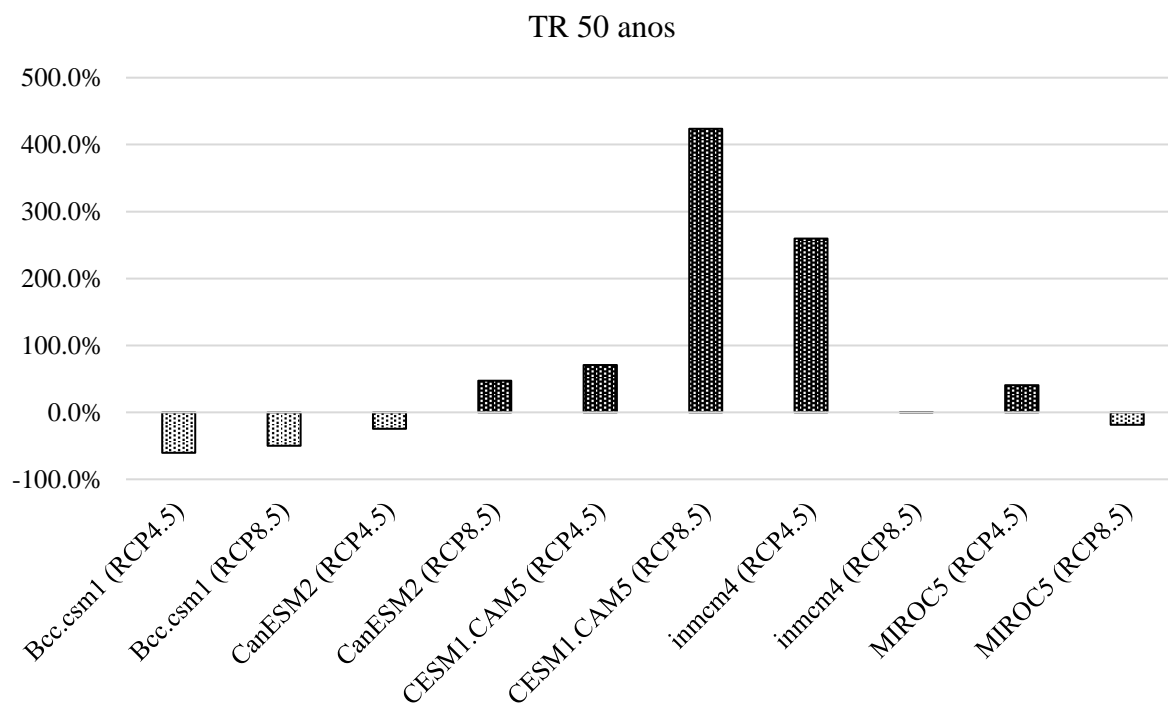
Observa-se que para as chuvas intensas, os modelos de mudança climática não apresentam uma mesma tendência. Há ainda muita divergência entre os resultados projetados para o século XXI. Assim, para as infraestruturas de águas urbanas, pode-se prever estruturas compensatórias para casos de excedente de vazões, conforme apresentado por Souza Filho e Araújo (2016), uma vez que, são cenários incertos e, de acordo com Sabóia (2016), os custos de implantação de infraestruturas para os cenários com aumentos significativos de vazões são elevados.

Figura 5.29 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 25 anos



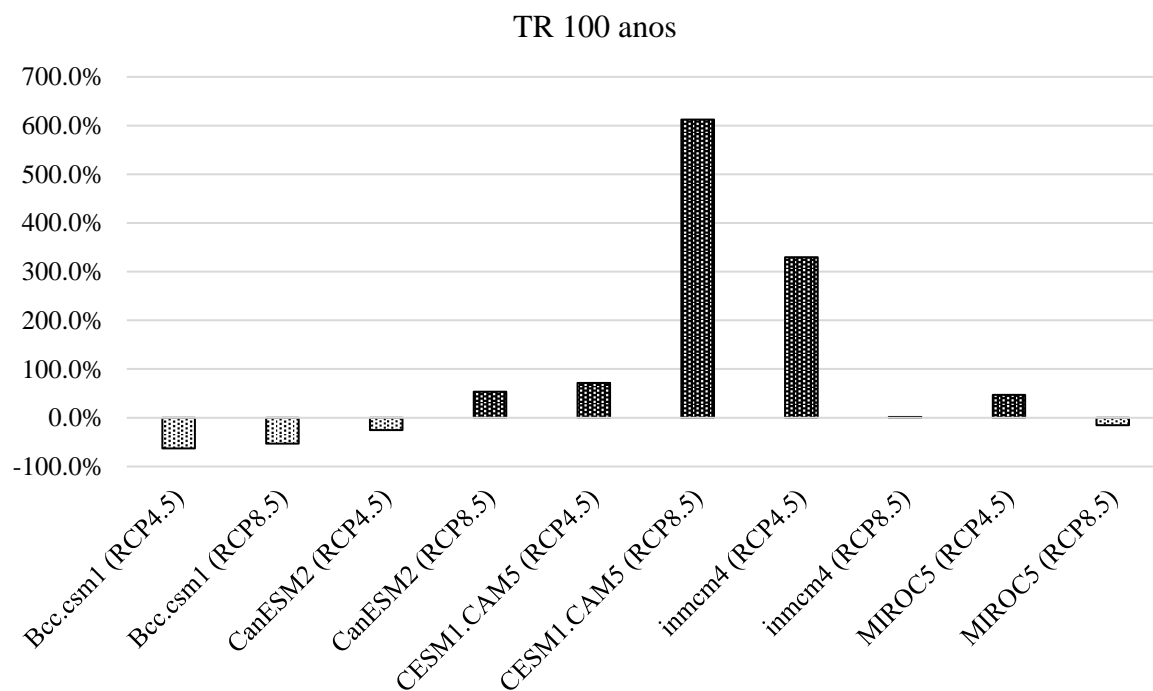
Fonte: Elaboração Própria

Figura 5.30 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 50 anos



Fonte: Elaboração Própria

Figura 5.31 – Variação Percentual das Vazões na Bacia do Bairro Damas para os Cenários de Mudança do Clima Século XXI: TR 100 anos



Fonte: Elaboração Própria

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, indicando um resumo dos resultados obtidos e dos objetivos alcançados, deduzidos a partir dos estudos realizados e apresentados nos capítulos anteriores. Por fim, são apresentadas as sugestões para pesquisas futuras, importantes para a continuidade dos estudos apresentados neste trabalho.

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia que permite uma gestão integrada de infraestrutura civil, especificamente nos temas águas e transportes. O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou produzir uma estrutura de associação dos subsistemas clima, hidrologia e pavimentos que permite uma análise conjunta dos resultados, por meio de modelos e variáveis de integração conhecidas e utilizadas pelo meio técnico e acadêmico.

Na identificação de cada um dos modelos adotados, foi possível apontar como atributos mais importantes na caracterização:

- **Modelo Climático:** analisar o regime de chuvas da região (variabilidade sazonal e interanual), bem como, os sistemas atmosféricos responsáveis pela sua geração. Ademais, as variações de temperatura também devem ser caracterizadas;
- **Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico:** caracterizar as condições de escoamento e infiltração, identificando as condições superficiais do terreno (tipos de solos, regiões com e sem revestimento asfáltico, % área impermeável, entre outros);
- **Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não Saturado:** identificar os tipos de solo da região e condições de águas subterrâneas (identificado como um dos principais fatores que afetam a alteração da umidade nas camadas granulares do pavimento), caracterização geotécnica dos solos, inclusive a curva de condutividade hidráulica e a curva de retenção;
- **Modelo de Rigidez:** caracterização e desenvolvimento de modelo para o módulo de resiliência em umidades diferentes (acima e abaixo da umidade ótima).

Foram apontadas como variáveis de integração entre os componentes dos subsistemas do modelo conceitual:

- **Modelo Climático → Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico:** precipitações;

- Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico → Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não Saturado: infiltração (pavimentos rodoviários); carga hidráulica (pavimentos urbanos);
- Modelo de Fluxo em Meio Poroso Não Saturado → Modelo de Rigidez do Pavimento: variações de umidade nas camadas granulares.

Definidas as etapas e variáveis de ligação, foi possível desenvolver o modelo integrado. Como exemplo de aplicação da metodologia integrada foi escolhida a Região Metropolitana de Fortaleza. Para os solos da RMF, os resultados do modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado, indicam que para níveis de água mais elevados (menos de 3,0 m distante da superfície do pavimento) a variabilidade da umidade é controlada principalmente por forças capilares. Em condições como essa, a incorporação das variações climáticas (precipitações) não apresenta mudanças significativas.

Para previsão da alteração da rigidez das camadas granulares, considerando a variabilidade da umidade, foi desenvolvido um modelo através do aprimoramento dos modelos de Bastos (2013). Os resultados do modelo de rigidez foram considerados satisfatórios, pois apresentam coeficientes de determinação entre 0,77 e 0,93 (quanto mais próximos de 1, melhor o desempenho do modelo). Esse modelo pode ser utilizado como referência para o desenvolvimento de outros trabalhos, permitindo incorporar as variabilidades inerentes às condições ambientais a que as estruturas viárias estarão submetidas.

Para o modelo integrado foi possível verificar que a oscilação do módulo de resiliência para os anos de precipitação acima da média foi de até 100 MPa. Para anos abaixo da média, esse valor de oscilação é reduzido para até 50 MPa.

Na análise de desempenho de pavimentos rodoviários para a RMF, considerando os cenários estudados para o modelo integrado, a presença de acostamento (1,5 m) demonstra aumento de até 2,8 anos para atingir um percentual de 10% de área trincada em comparação a condição sem acostamento. Sendo possível verificar, em todos os cenários, a presença do acostamento aumenta o desempenho e, por consequência, a vida útil do pavimento, ademais, os acostamentos também aumentam a segurança viária, reduzindo acidentes de trânsito. Em todos os cenários do modelo integrado foi observada uma redução de vida útil, que oscila de 1 a 5,6 anos quando comparados ao dimensionamento mecânico-empírico com $MR_{ótimo}$. Desta forma, sem a metodologia integrada, o projeto poderia ser subdimensionado.

Anos com precipitação acima da média reduzem a vida útil do pavimento de 42,5% a 55,8%. Para anos de precipitação média, a diminuição varia de 17,5 % a 45,8%, e para anos abaixo da média é de 8,3% a 30,8%. Os modelos de mudança climática indicam, de forma geral,

que para o século XXI (2031-2070), os pavimentos da RMF estarão submetidos a uma maior frequência de anos com precipitação abaixo da média. As precipitações máximas podem chegar a reduções de até -17% e a um aumento máximo de 5%. Porém, a maioria dos modelos indica que essas devem ocorrer em menor frequência.

Os resultados para nível d'água de 4,5 m e com acostamento sugerem que mesmo em anos de elevada precipitação, a umidade nas camadas do pavimento permanece durante todo o ano abaixo da ótima. Isso mostra que os estudos de pavimentos, principalmente, de baixo custo na região, que possuam lençol freático abaixo de 4,5 m, podem incorporar os ganhos de rigidez nas camadas granulares para umidades menores que a ótima.

Os resultados da tese indicam que é possível aplicar o modelo integrado para o projeto e a previsão de desempenho de pavimentos rodoviários, todavia ainda é necessário um aprimoramento das ferramentas utilizadas (ex. incorporar a variação do MR sazonal no CA3D-D), além da aplicação e da validação da metodologia em outras regiões.

Para os pavimentos urbanos, a formação de lâminas de água sobre esses, mesmo em condições elevadas, não indicou variações relevantes de umidade nas camadas granulares da estrutura viária. Para chuvas intensas, as projeções dos modelos do CMIP 5 analisadas (RCP 4,5 e RCP 8,5) apresentaram grande variabilidade entre si, demonstrando grau de incerteza nos cenários de alterações de vazões para o projeto de infraestruturas de águas urbanas na região analisada (Bairro Damas, Fortaleza/CE). Contudo, as projeções para o século XXI, indicam valores que podem chegar a acréscimos de 600% nas vazões, apontando para eventos de alagamentos mais intensos. A construção de estruturas tradicionais de drenagem urbana (galerias, canais, entre outros) para contenção dos excessos de vazões tem custo elevado, conforme apresentado por Sabóia (2016). Como alternativa, podem ser utilizadas medidas compensatórias, como as propostas por Souza Filho e Araújo (2016).

Com base em todos os resultados apresentados na pesquisa é possível verificar que a metodologia integrada proporciona ganhos em comparação às metodologias tradicionais de projeto e gestão, principalmente de pavimentos rodoviários. Podem ser citadas como vantagens da metodologia proposta na tese: permite uma visão de conjunto dos subsistemas; possibilita a caracterização do ambiente mais próximas a condição real; viabiliza a identificação dos pavimentos que estarão submetidos a variações de umidade acima ou abaixo da ótima; possibilita prever cenários de mudança climática e auxiliar na tomada de decisão dos projetos para o século XXI (2031-2070).

Por fim, ressalta-se que apesar da metodologia apresentada nesta pesquisa propor algumas simplificações, foi possível identificar que a integração de modelos de diferentes áreas

do conhecimento, não é uma tarefa trivial, pois, a base e linguagem conceitual de cada uma das subáreas da engenharia estudadas na pesquisa apresentam especificidades próprias e elevado grau de complexidade. Então, é importante desenvolver mais trabalhos colaborativas entre pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento, com interesse em produzir propostas e projetos mais robustos para os problemas do século XXI.

6.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de melhoria e de continuação a partir de futuras pesquisas, as quais incluem:

- Caracterizar mais solos da Região Metropolitana de Fortaleza: incorporando a variação da umidade no módulo de resiliência e possibilitando o desenvolvimento de modelos de rigidez de maior amplitude. Realizar ensaios da mecânica dos solos não saturados para solos da RMF, a fim de desenvolver curvas de retenção e curvas características;
- Realizar a estimativa de custos dos diferentes cenários estudados com objetivo de auxiliar nos critérios de tomada de decisão dos gestores e projetistas para soluções considerando as projeções de mudança climática dos próximos anos.
- Estudar condições com subleitos argilosos: esses solos apresentam maiores alturas de ascensão capilar e podem ter uma maior variabilidade de umidade frente às condições climáticas, mesmo em condições de nível freático mais profundo;
- Considerar efeitos de evapotranspiração: verificar se os efeitos da evapotranspiração podem ser significativos na alteração da umidade das camadas granulares dos pavimentos;
- Combinar cenários de anos com precipitação acima, abaixo e na média: nesta pesquisa, foram consideradas sequências de anos com mesmas características, como sugestão para próximas pesquisas, podem ser feitas combinações de anos com precipitações;
- Considerar os ganhos de rigidez do material para umidades abaixo da ótima (aumento devido a sucção): verificar o desempenho dos pavimentos para condições, onde o pavimento estará maior parte (ou toda) vida útil, em umidades abaixo da ótima;

- Considerar os efeitos da mudança climática da temperatura: os modelos de mudança climática já têm projeções de alterações das temperaturas para o século XXI e, por isso, podem ser analisados o desempenho das estruturas viárias para os cenários de mudança do clima;
- Aplicar a metodologia para outras regiões do Brasil: validar a implementação da metodologia em outras regiões com características climáticas e geológico-geotécnicas diferentes da RMF;
- Caracterizar melhor os pavimentos urbanos (materiais de revestimento, materiais de composição granular, subleito, lençol freático) para aprimorar o modelo integrado em regiões urbanas.
- Para aprimoramento do modelo integrado, podem ser considerados outros subsistemas das cidades, como:
 - ✓ Impactos dos eventos de cheias na cidade (alagamentos) nos problemas de tráfego de grandes cidades;
 - ✓ Construções civis urbanas e impacto nas condições de fluxo e águas subterrâneas;
 - ✓ Medidas compensatórias de drenagem urbana e águas subterrâneas;
 - ✓ Pavimentos permeáveis e águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. J. P. **Modelagem Computacional de Misturas Asfálticas com Utilização do Método dos Elementos Finitos e da Teoria do Dano Contínuo**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2019.
- ALMEIDA, M. M. da R. **Avaliação de Métodos de Estimativa da Capacidade de Carga de Fundações Diretas em Solos Não Saturados**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.
- AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. Designation T 307-99 – **Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. Washington, DC, 2007.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Soc. Am. J.**, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- ASTM E1823. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. ASTM International. Pennsylvania-USA, 2013.
- BABADOPULOS, L. F. A. L. **A Contribution to Couple Aging to Hot Mix Asphalt (HMA) Mechanical Characterization Under Load-Induced Damage**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2014.
- BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.
- BATES, B. *et al.* **Climate Change and Water**. IPCC Technical Paper VI. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat, Geneva, Switzerland, 210 pp, 2008.
- CAVALCANTE, I. N. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza Estado do Ceará**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- CAVALCANTE, R. N. A.; COUTINHO, R. P.; HOLANDA, A. S. e PARENTE JR, E. Gerador de malha bidimensional para análise de tensões e deformações em pavimentos asfálticos. *In: Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, Anais*, Maceió, p. 1-18, 2008.
- CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction Butterworth-Heinemann**, 2nd ed., Oxford, UK, 630 p, 2004.
- CHAPUIS, R. P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.], v. 41, n. 5, p.787-795, 2004. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t04-022>.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019: relatório gerencial**. 20.ed, Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2019. 238 p; Disponível em:

<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

CORREIA, R. C. *et al.* A região semiárida brasileira. *In: VOLTOLINI, T. V. et al.* Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. [S. l.]: **Embrapa Semiárido** (CPATSA), cap. 1, p. 21-48, 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54762/1/01-A-regiao-semiarida-brasileira.pdf-18-12-2011.pdf>. Acesso em: 24 out. 2019.

COUTINHO, R. P.; BOTELHO, R. P.; CAVALCANTE, R. N. A.; HOLANDA, A. S. e PARENTE JR, E. Desenvolvimento de um sistema gráfico para análise numérica de pavimentos asfálticos. *In: IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos de Reforço*, Fortaleza. **Livro de resumos**, 2009.

CRUTZEN, P. J.; STOERMER, E. F. The 'Anthropocene', **Global Change Newsletter**, v. 41, p. 17-18, 2000.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method), **J. Hydrol. Res.**, v. 7, n. 2, p. 205–230, 1969.

DANTAS NETO, S. A. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Implantação Básica de Rodovia**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

DRUMM, E. C.; REEVES, J. S.; MADGETT, M. R.; TROLINGER, W. D. Subgrade resilient modulus correction for saturation effects. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.123, n.7, p.663-71, 1997.

ELLIOT, R. P.; THORNTON, S. I. Resilient modulus and AASHTO pavement design. **Transportation Research Record**, n.1196, p.116-24, 1998.

EMORI, S.; BROWN, S. J. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. **Geophys. Res. Lett.**, 32, L17706, 2005.

FERNANDES, W. S. **Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas na Oferta Hídrica da Bacia Hidrográfica do Reservatório Óros Usando os Modelos de Mudanças Climáticas do IPCC-Ar4, Levando em Consideração as Diversas Incertezas Associadas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.

FERREIRA, J. G. H. M.; MOTTA, L. M. G. Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 16. Natal, RN, 2002. **Anais**, Natal, ANPET. V.1, p.109-20, 2002.

FERREIRA, W. L. G.; BRANCO, V. T. F. C.; SILVA FILHO, F. C. Simulação Numérica do Fluxo D'água em Pavimentos Flexíveis Compostos por Diferentes Misturas Asfálticas. *In:*

ANPET - XXVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, Curitiba
Anais [...], 2014.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; SAUER, E. K. Deformation characteristics of subgrade soils for highways and runways in Northern environments. **Canadian Geotechnical Journal**, v.12, n.2, p. 213-223, 1975.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New Jersey, 926 p., 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 31(4), p. 533-546, 1994.

FREDLUND, D. G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice, The 2005 Terzaghi Lecture: **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, vol. 132(3): p. 286-321, 2006.

FREDLUND, D. G. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. *In*: Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, **Anais**, Recife, Brazil, v. 3, p. 887-902, 2002.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs,: PrenticeHall, Inc, 1979.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão de Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

GHELING, W. Y. Y. *et al.* Estruturas de pavimento no contexto dos solos não saturados. *In*: CARVALHO, J. C. de *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.

GITIRANA JR., G. F. N.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CORDAO NETO, M. P. Previsão de curvas características de um perfil de solo colapsível de Brasília utilizando curvas granulométricas. *In*: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, **Anais**, Curitiba, v. I, 6 p, 2005.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MARINO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. *In*: CARVALHO, J. C. de *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.

GONÇALVES, R. F. **Estudo de influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior de paulista.** São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

GRODSKY, S. A.; CARTON, J. A. The intertropical convergence zone in the South Atlantic and the Equatorial cold tongue. **J. Climate**, v. 16, n. 4, p. 723-733, 2003.

GUEDES, C. S. **Avaliação do Desempenho Hidrológico de Pavimentos Permeáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

HAMILTON, C.; BONNEUIL, C.; GEMENNE, F. **The Anthropocene and the Global Environmental Crisis.** London/New York: Routledge, 2015.

HANSSON, K.; LUNDIN, L.; SIMUNEK, J. Modeling Water Flow Patterns in Flexible Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 1936, n. 1, p.132-141, jan. 2005.

HASTENRATH, S.; LAMB P. J. **Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Ocean.** University of Wisconsin Press, 1977.

HIBBARD, K. A.; G. A. MEEHL; COX P.; P. FRIEDLINGSTEIN, P. A strategy for climate change stabilization experiments. *Eos*, **Trans. Amer. Geophys. Union**, p.88, 2007. doi:10.1029/2007EO200002.

HOLANDA, A. S.; E. PARENTE Jr.; T. D. P. ARAÚJO; L. T. B. MELO; F. EVANGELISTA Jr.; J.B. SOARES. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. *In: XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*. Belém, **Anais**, Pará, 2006.

HVEEM, F. N. Pavement deflections and fatigue failures. Bulletin N ° 114, p. 43-87. **Highway Research Board**. Washington, DC, 1955.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estimativas de População.** 1 de julho de 2018 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>, Acesso em: 10 out. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil das Regiões de Planejamento Grande Fortaleza – 2017.** Disponível em: http://www2.ipece.ce.gov.br/estatistica/perfil_regional/2017/PR_Grande_Fortaleza_2017.pdf, Acesso em: 10 set. 2019

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

JORNAL DIÁRIO DO NORDESTE. **Alagamento da avenida Heráclito Graça: problema histórico é explicado por especialista.** 2019, Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/online/alagamento-da-avenida-heraclito-graca-problema-historico-e-explicado-por-especialista-1.2072058>. Acesso em: 10 out. 2019

JORNAL TRIBUNA DO CEARÁ. **Chove em Mais de 70 Municípios do Ceará nas Últimas 24 Horas.** 2019, Disponível em: <https://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/cotidiano-2/chove-em-mais-de-70-municipios-do-ceara-nas-ultimas-24-horas/>. Acesso em: 10 out. 2019

JORNAL TRIBUNA DO CEARÁ. **Porque a Av. Heráclito Graça Sempre Vira um Rio em Dia de Chuva Forte.** 2019, Disponível em: <https://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/cotidiano-2/por-que-a-av-heraclito-graca-sempre-vira-um-rio-em-todo-dia-de-chuva-forte/>. Acesso em: 10 out. 2019

KIM, D.; KIM, J. R. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test. **Construction and Building Materials**, 21, p.1470–1479, 2007.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete.** American society of Civil Engineers. Ed. Mc Graw Hill Construction, 2009. ISBN: 978-0-07-146462-8.

KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N.; UNDERWOOD, B. S.; YUN, T.Y.; SUBRAMANIAN, V.; SAVADATTI, S.; THIRUNAVUKKARASU, S. **Development of a Multiaxial Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for Asphalt Mixtures.** Publication FHWA-HRT-08-073, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil, **Monthly Weather Review**, v. 107, 1979, p. 1140 – 1153, 1979.

LEE, H. C.; WRAY, W. K. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable. **Unsaturated Soils**, v. 2, p. 615-622, 1995.

LEMAITRE, J. **A Course on Damage Mechanics.** 2nd ed. Ed. Springer, 1996 ISBN-13: 978-3540609803.

LI, D.; SELIG, E. T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.120, n.6, p.939-57, 1994.

LIMA, A. *et al.* Terminologia e simbologia. In: CARVALHO, J. C. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

LU, N.; LIKOS, W. **Unsaturated soil mechanics.** John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 2004.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1996.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Potenciais da Água no Solo. *In: CARVALHO, J. C. de et al. Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.

MAGALHÃES, B. *et al.* Comportamento Climático da Região Metropolitana de Fortaleza. **Revista de Geografia da UFC**. Vol. 10(23), p. 129-145, 2011.

MAGALHÃES, G. B. A. **Clima e Saúde: Relações Entre os Elementos Atmosféricos e a Dengue na Região Metropolitana de Fortaleza**. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

MALLICK, R. B.; RADZICKI, M. J.; DANIEL, J. S.; JACOBS, J. M. Use of System Dynamics to Understand Long-Term Impact of Climate Change on Pavement Performance and Maintenance Cost. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2455(1), 2014.

MASAD, E.; AL-OMARI, A.; LYTTON, R. Simple Method for Predicting Laboratory and Field Permeability of Hot-Mix Asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1970, p.55-63, 2006.

MATOS NETO, C. E. A.; FRAGA, N. S. Equação de Chuvas Intensas para a Cidade de Fortaleza. *In: V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, 1983, Blumenau-SC. **Anais**, V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1983.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora Interciência, 3. ed., 640 p, 2015.

MEEHL, G. A. *et al.* Decadal prediction: Can it be skillful? **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, vol. 90, p.1467–1485, 2009.

MEEHL, G. A.; C. COVEY; B. MCAVANEY; M. LATIF; R. J. STOUFFER. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, vol. 86, p.89–93, 2005.

MEEHL, G. A.; G. J. BOER; C. COVEY; M. LATIF; R. J. STOUFFER. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, vol. 81, p.313–318, 2000.

MEEHL, G. A.; K. A. HIBBARD. **A strategy for climate change stabilization experiments with AOGCMS and ESMS**. WCRP Informal Rep. 3/2007, ICPO Publ. 112, IGBP Rep. 57, 35 pp, 2007.

MEYBECK M. Global analysis of river systems: from earth system controls to Anthropocene controls. **Philosophical Transactions of the Royal Academy B**, p. 1935-1955, 2003.

MOHAMMAD, L. N.; PUPPALA, A. J.; ALAVILLI, P. Resilient properties of laboratory compacted subgrade soils. **Transportation Research Record**, n.1504, p.87- 102, 1995.

MORALES, M. S. T. **Estudo Numérico e Experimental de Problemas de Fluxo Saturado – Não Saturado em solos**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M.; FRANCO, F. A. C. P.; SILVA, C. F. S. C.; MEDINA, J. (2018) **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Convênio UFRJ/DNIT.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 2015. Tese (Doutorado em Materiais de Transportes) - North Carolina State University. Raleigh, 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP 1-37A. **Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures**. Final Report. Part 3: Design Analysis. Chapter 3: Design of new and reconstructed flexible pavement. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, Illinois-USA, 2004.

NG, C. W. W.; PANG, Y. W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil. **Canadian Geotechnical Journal**, vol 37(6), p.1252– 1264, 2000.

NOBRE, P. **As origens das águas no Nordeste**. A questão da água no Nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – Brasília, DF: CGEE, 2012. ISBN 978-85-60755-45-5

ONGEL, A.; HARVEY, J. **Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)**. Draft report prepared for the CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Califórnia, 2004.

PEZO, R. F. **A General Method of Reporting Resilient Modulus Tests of Soils: A Pavement Engineer's Point of View**. Presented at the 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 1993.

PHILLIP, R. **Kit de Treinamento SWITCH: Gestão Integrada das Águas na Cidade do Futuro. Módulo 4 – MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS: Explorando opções**. 1. ed. São Paulo, 54p, 2011.

PINTO, J. L. T. M. G. **Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Técnico Científico, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2013.

PORTO, R. L. Escoamento Superficial Direto. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

QUEIRÓZ, B. F. **Estudo de Soluções Numéricas da Equação de Richards através do Método de Elementos Finitos e Diferenças Finitas para Simulação de Fluxo Unidimensional em Solo Não-Saturado**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2017.

RIBEIRO, A. J. A. **Um Método Para Localização e Estimação das Características Geotécnicas dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Fins de Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

RODRIGUES, M. R. **Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de Solos Típicos de Subleito de Pavimentos do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. EPA/600/R-14/413b, National Risk Management Research Laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2015.

SABÓIA, M. A. M.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SILVEIRA, C. da S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **RBRH**, vol. 22(0), 2017.

SABÓIA, M. A. M. **Estratégia Robusta para a Gestão de Drenagem Urbana em Cenário de Mudança do Clima**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

SANTIAGO, L. S. **Contribuições para o Desenvolvimento de um Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

SANTIAGO, L. S.; SOARES, J. B. Contribuições ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. *In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET, 2015, Ouro Preto. Anais [...]*.

SANTIAGO, L. S.; SILVA, S. A. T.; SOARES, J. B. Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. **Revista Transportes (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. 31-43, 2018.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 19, n.4, pp. 176-185, 2014.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials**. Ed. Wiley Interscience. New York- USA, 1995. ISBN: 0-471-30311-9.

SHAW, H.; REISINGER, A.; LARSEN, H.; STUMBLES, C. **Incorporating Climate Change into Stormwater Design – Why and How?**, paper for the 4th South Pacific Conference on Stormwater And Aquatic Resource Protection, (Auckland, May 2005), URS New Zealand, 2005. Disponível em: <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/stormwater-design-mar05/stormwater-design-mar05.pdf>. Acesso: 15 out. 2019

SILVA, F. O. E.; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, edição 192, 30 pp. 48-59, 2013.

SILVA, R. C. da. **Avaliação da Dosagem dos Tratamentos Superficiais por Penetração de Rodovias Baseada na Exsudação e na Perda de Agregados**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

SILVA, S. A. T.; VIDAL, P. J. F.; HOLANDA, A. S. e PARENTE JR., E. Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos utilizando elementos finitos e infinitos. *In: XXVI ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, Anais*, Joinville-SC, 2012.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Análise das Projeções de Vazões nas Bacias do Setor Hidroelétrico Brasileiro Usando Fados do IPCC-AR5 para o Século XXI. *In: SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Uso da Informação Climática em Múltiplas Escalas Temporais para o Planejamento do Setor Hidroelétrico Brasileiro*. 1. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, p. 137-159, 2015. ISBN 978-85-420-0763-3.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; COSTA, A. C.; CABRAL, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **RBMET – Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol. 28, n. 3, pp. 317-330, 2013.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V.; Mudanças climáticas na bacia do rio Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 21, n.2, pp. 416-428, 2016.

SOARES, J. B.; A. M., MORENO; L. M. G, MOTTA. Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. **Revista Pavimentação**, 2009.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting surveys**. *USDA-SCS Agriculture Handbook*, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C, 1975.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceará, Brazil: Application of multivariate, semiparametric algorithm. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, p. SWC1-SWC13, 2003.

SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO, C. B. C; **Projeto: Análise da Drenagem Urbana de Fortaleza. Relatório Final**. Fortaleza, 56p, 2016.

STEFFEN, W. *et al.* The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, p. 842-867, 2011.

STONER, A. M. K. *et al.* Quantifying the Impact of Climate Change on Flexible Pavement Performance and Lifetime in the United States. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2673, n. 1, p.110-122, 2019.

STURM, T. W. **Open Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Science/Engineering, Math, 2nd ed., 2010.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

TAKEDA, M. C.; PARREIRA, A. B.; MOTTA, L. M. G. **A influência da variação de umidade pós-compactação no módulo de resiliência de solos tropicais.** In: XX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, 2006. v. 2. p. 1244-1255, 2006.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of The American Meteorological Society, **American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p.485-498, 2012.

THADKAMALLA, G. B.; GEORGE, K. P. Characterization of subgrade soils at simulated field moisture. **Transportation Research Record**, n.1481, p.21-7, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos.** Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília, 2002.

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction.** United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland, 2009.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y.; The relationship between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation, **J. Clim.**, 11(4), p. 551– 562, 1998.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. 1999. **The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till.** Geotechnique, 49(2), p.143-159, 1999.

VASCONCELOS, M. A. G. **Estudo Sobre o Emprego do Cape Seal em Revestimentos Rodoviários do Estado do Ceará.** 227 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5–31, 2011.

ZAMAN, M.; KHOURY, N. N. **Effect of soil suction and moisture on resilient modulus of subgrade soils in Oklahoma.** University of Oklahoma, Norman, 2007. Disponível em: <http://www.okladot.state.ok.us/hqdiv/p-r-div/spr-rip/library/reports/2167-ffy2006.pdf>. Acesso em 25 abr. 2019.

APÊNDICE A – CORREÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS DE MUDANÇA DO CLIMA

Figura A.1 – Correção Gama: Modelo BCC-CSM1

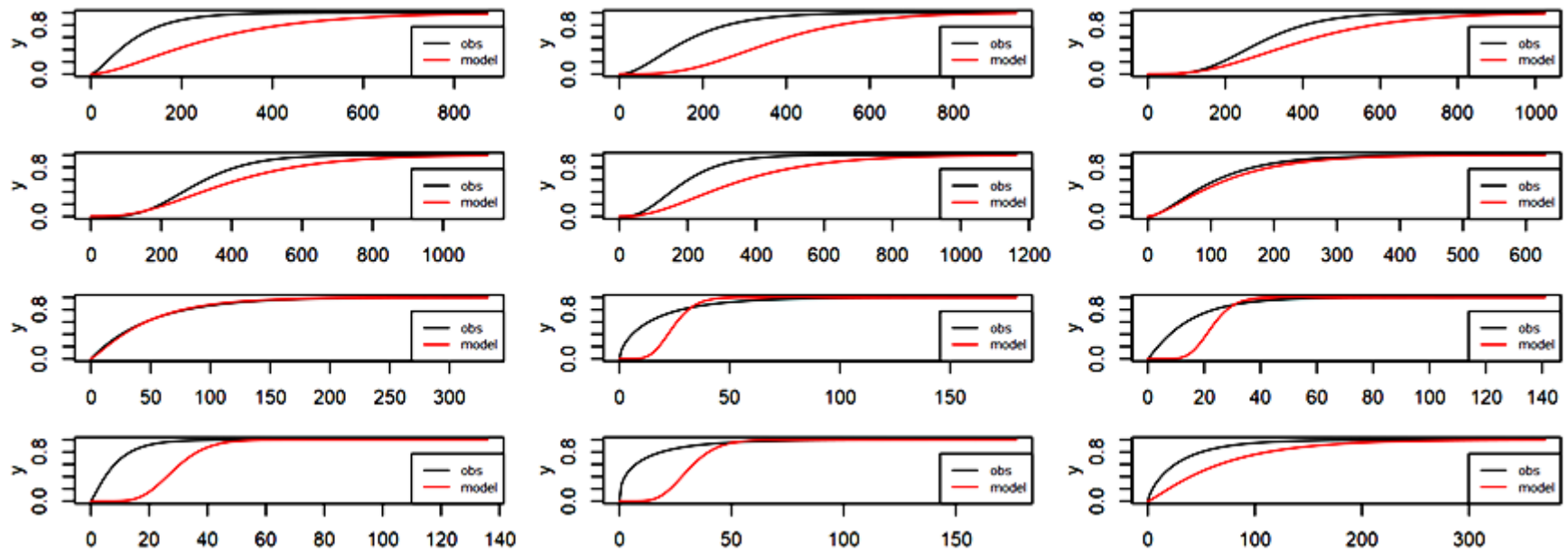


Figura A.2 – Correção Gama: Modelo CanESM2

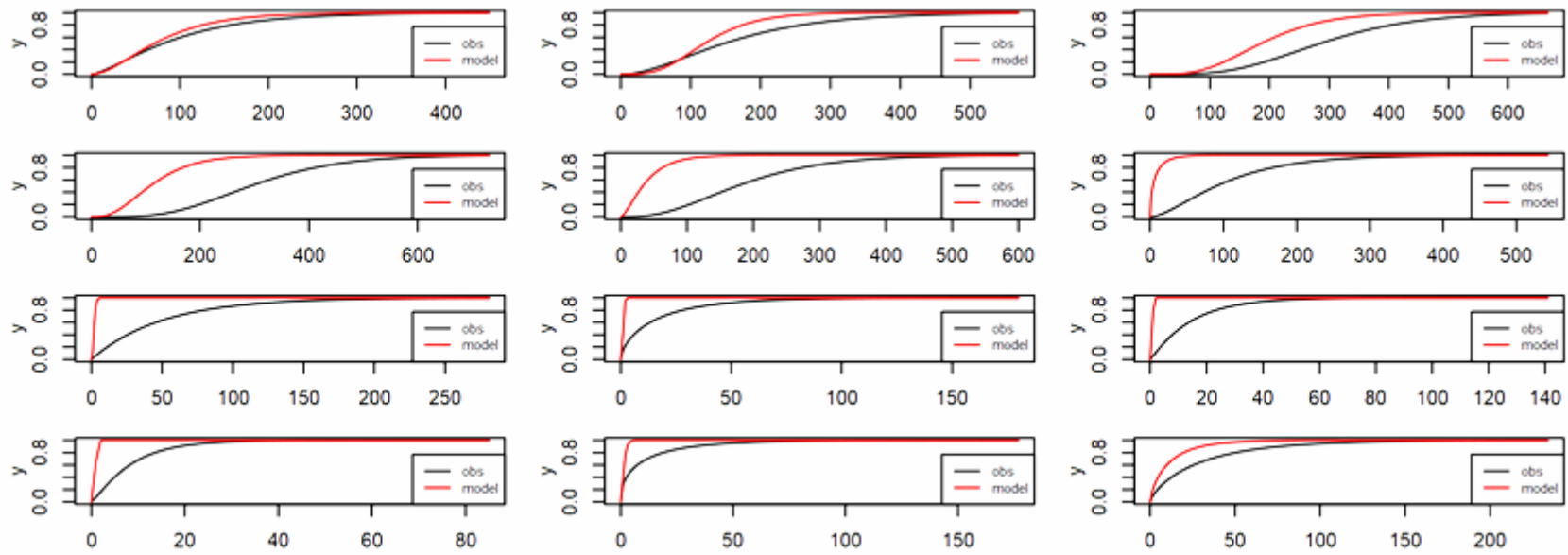


Figura A.3 – Correção Gama: Modelo CESM1-CAM5

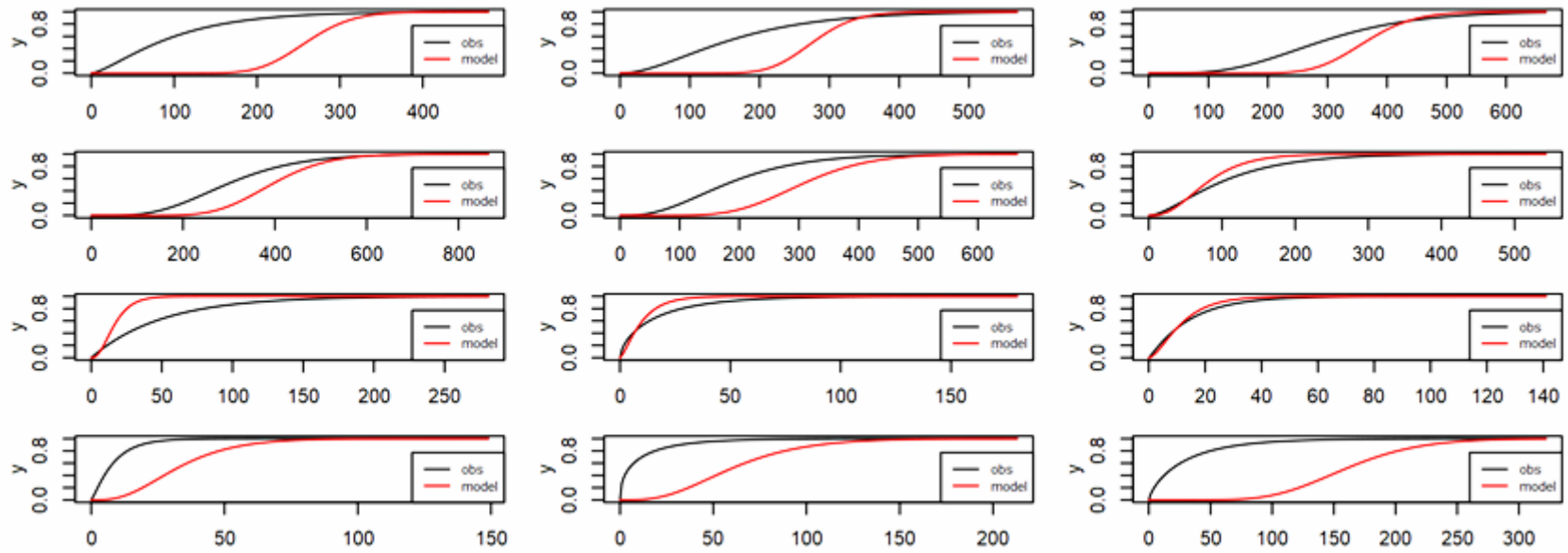


Figura A.4 – Correção Gama: Modelo inmc4

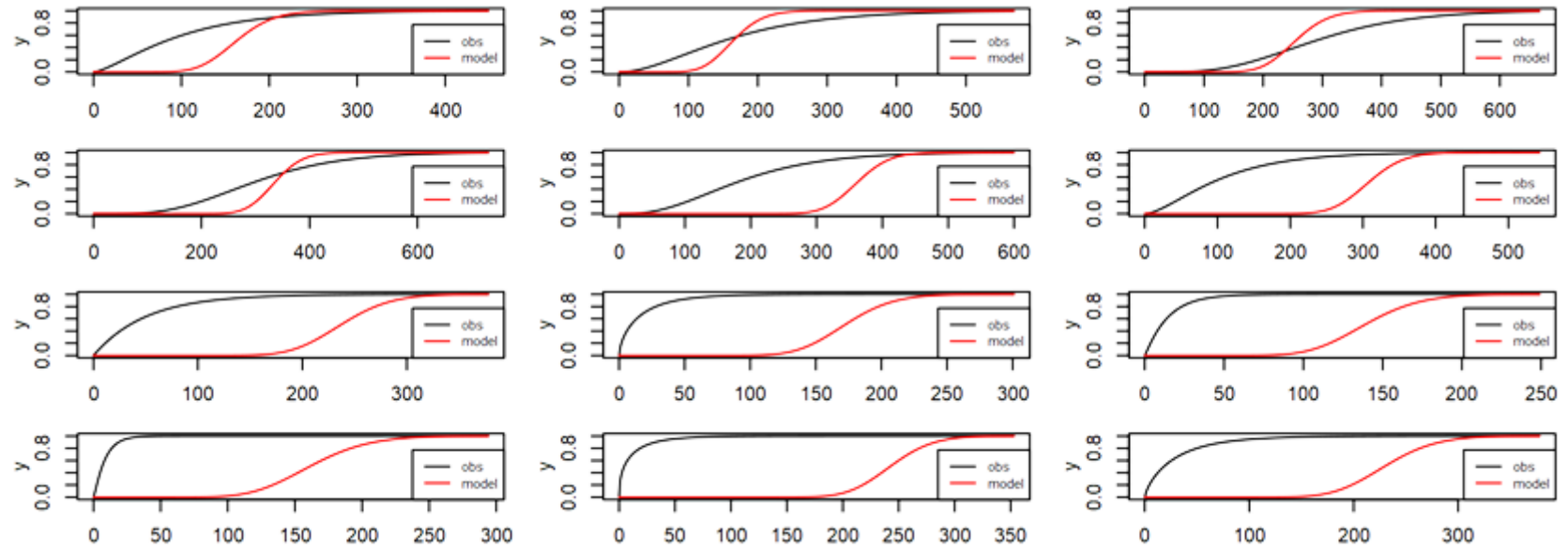
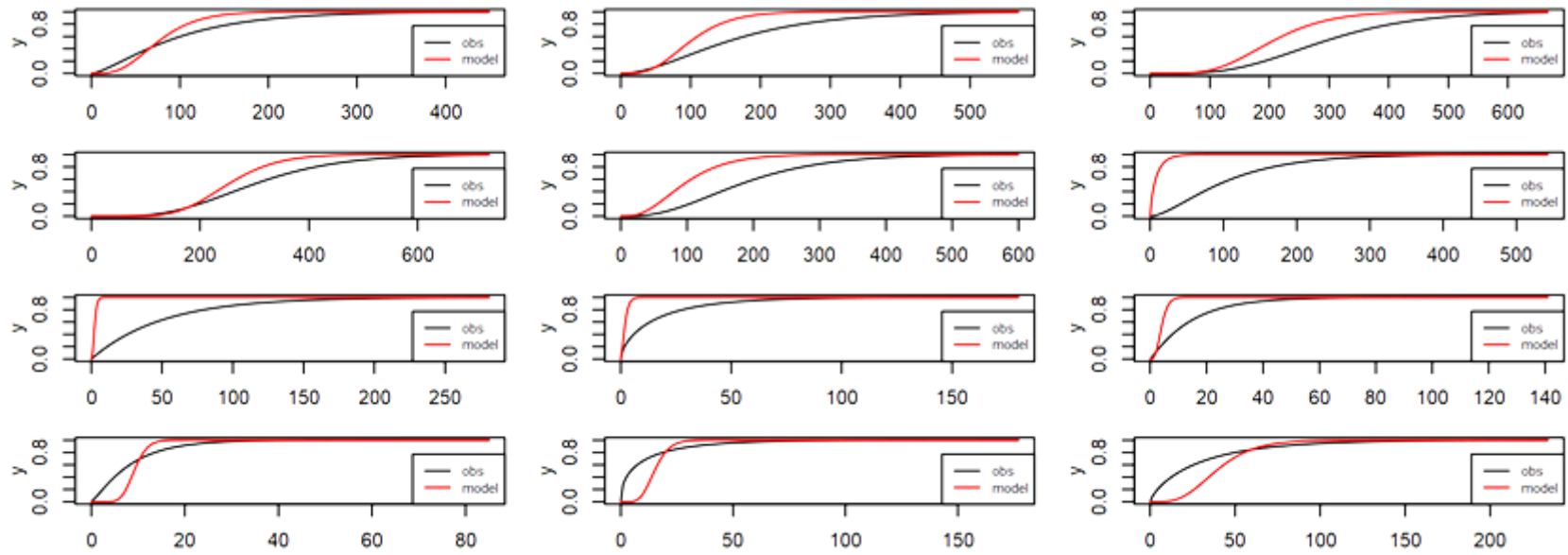


Figura A.5 – Correção Gama: Modelo MIROC5



APÊNDICE B – HIETOGRAMAS

Figura B.1 – Hietograma AUMEF (TR 25 anos)

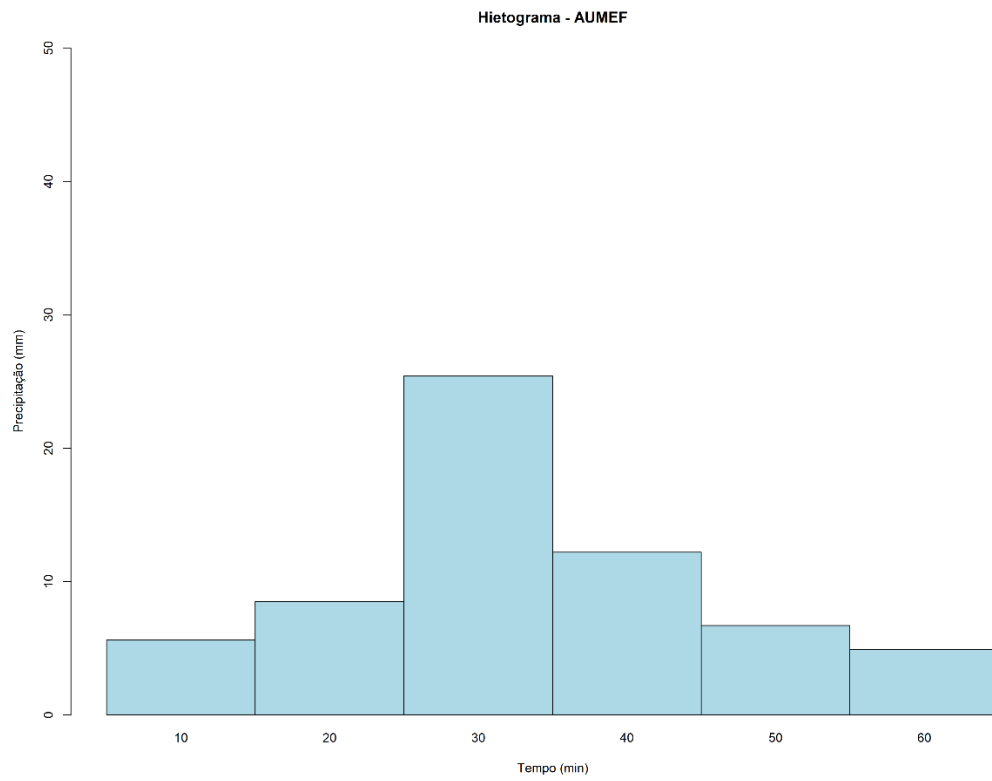


Figura B.2 – Hietograma RCP4.5.Bcc.csm1 (TR 25 anos)

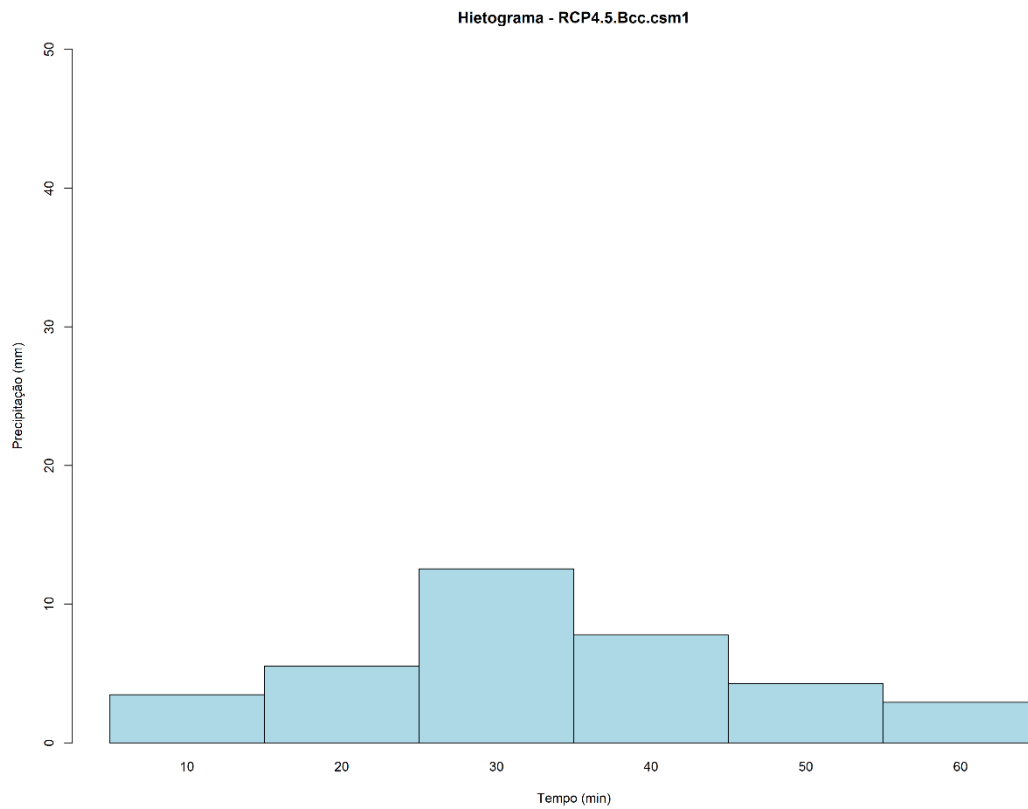


Figura B.3 – Hietograma RCP4.5.CanESM2 (TR 25 anos)

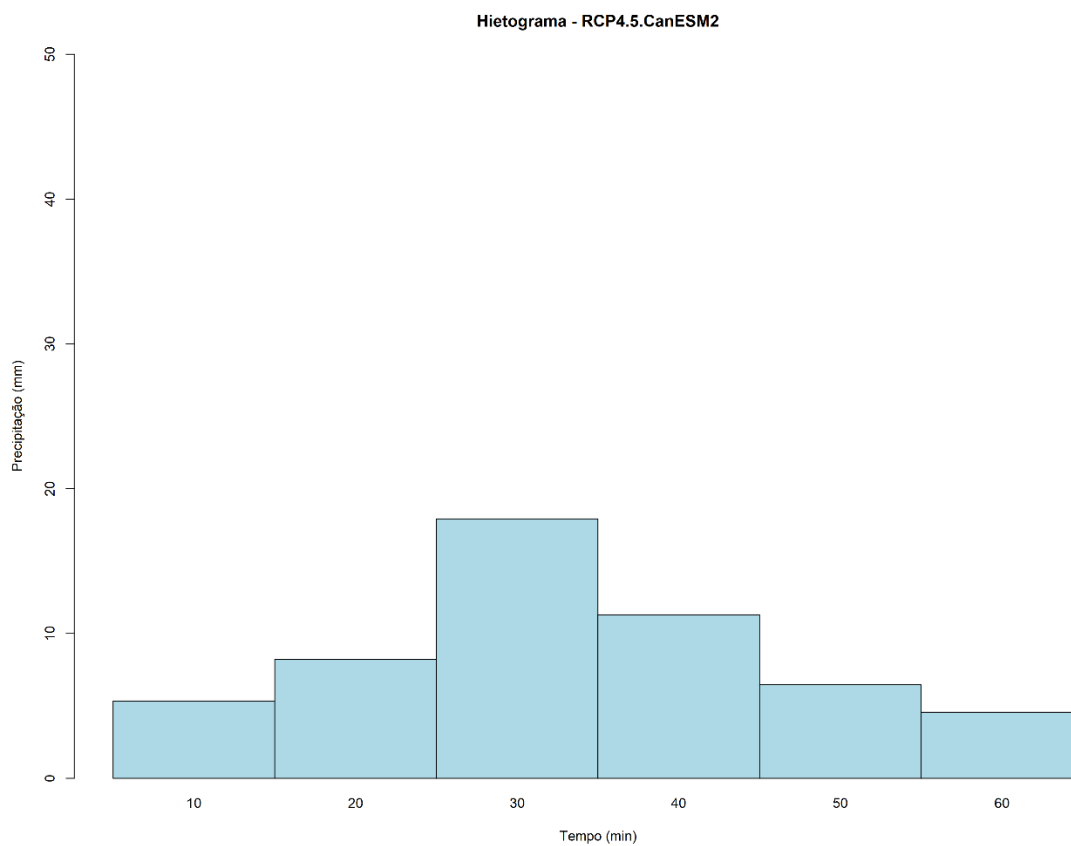


Figura B.4 – Hietograma RCP4.5.CESM1.CAM5 (TR 25 anos)

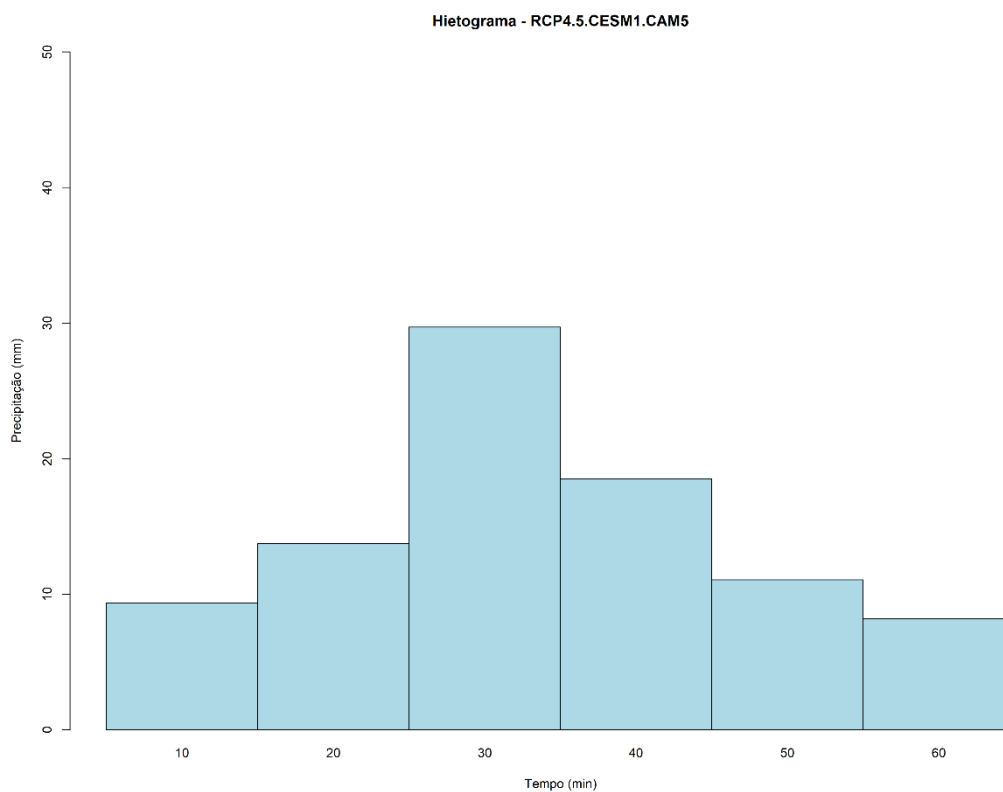


Figura B.5 – Hietograma RCP4.5.inmcm4 (TR 25 anos)

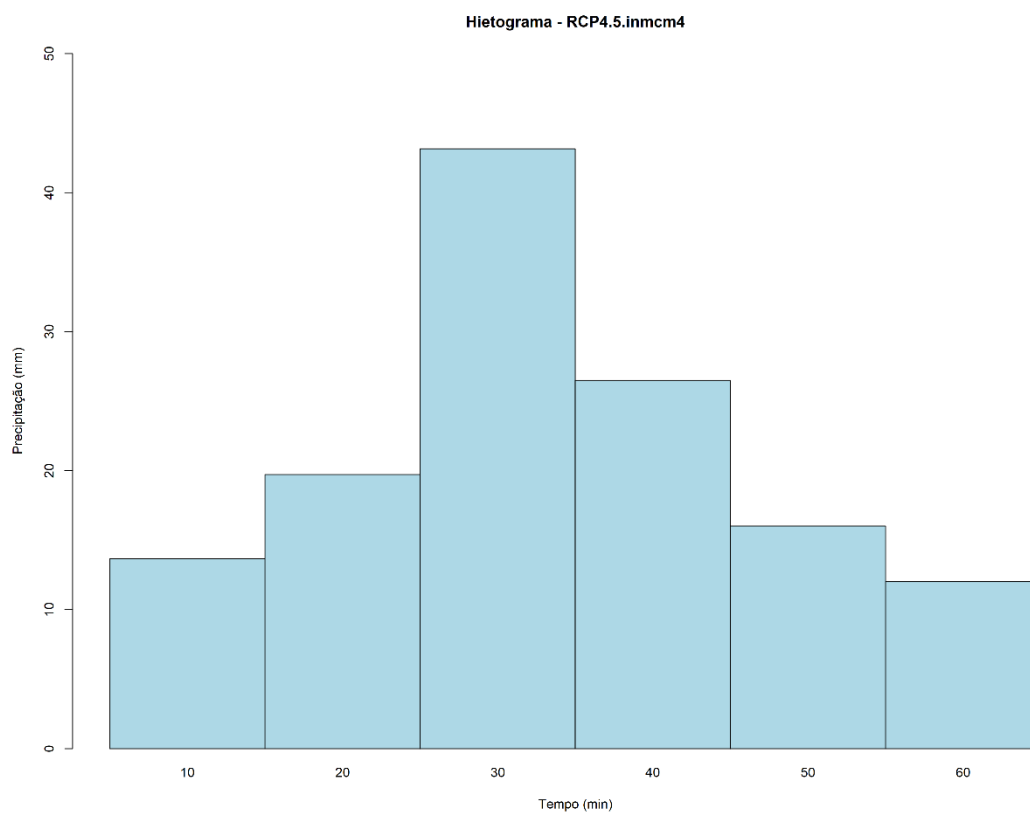


Figura B.6 – Hietograma RCP4.5.MIROC5 (TR 25 anos)

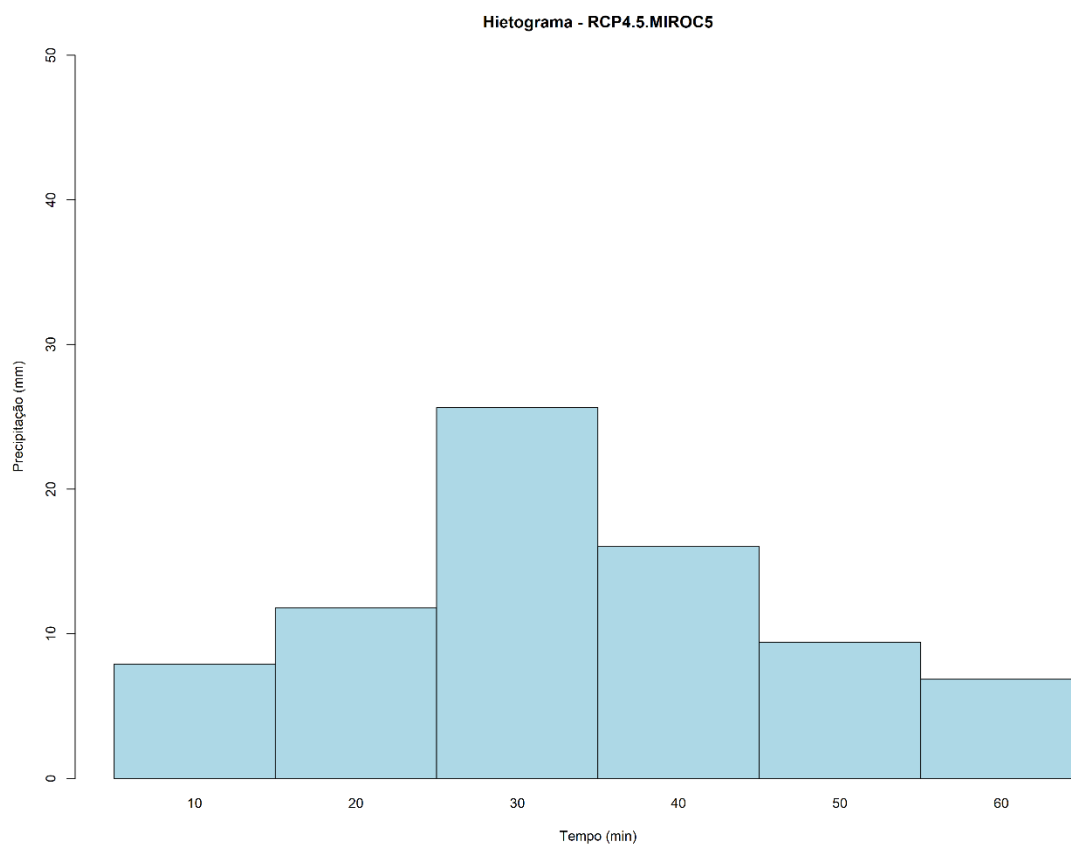


Figura B.7 – Hietograma RCP8.5.Bcc.csm1 (TR 25 anos)

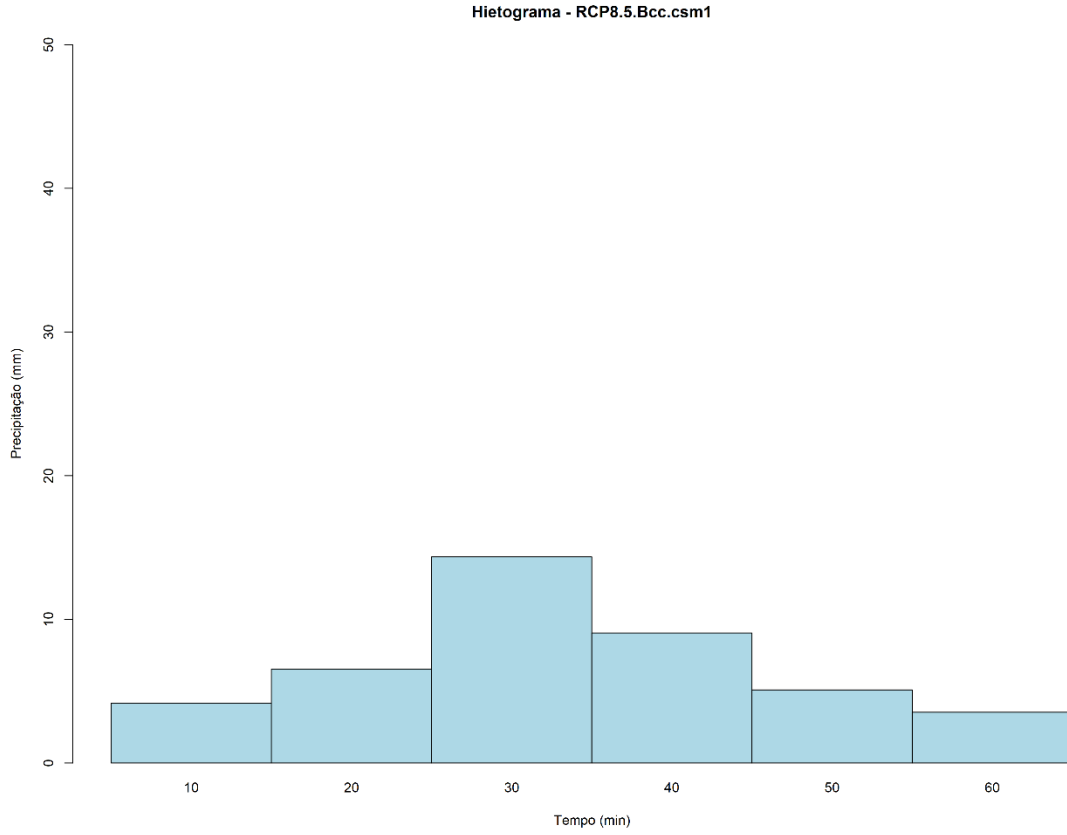


Figura B.8 – Hietograma RCP8.5.CanESM2 (TR 25 anos)

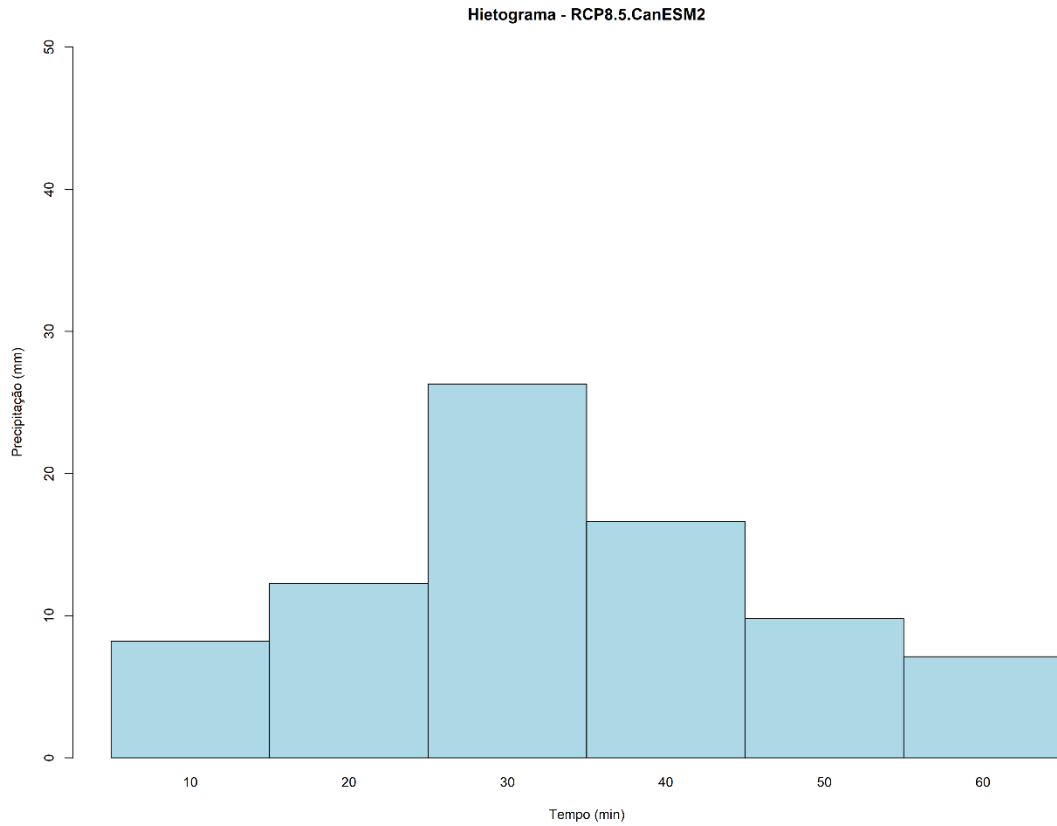


Figura B.9 – Hietograma RCP8.5.CESM1.CAM5 (TR 25 anos)

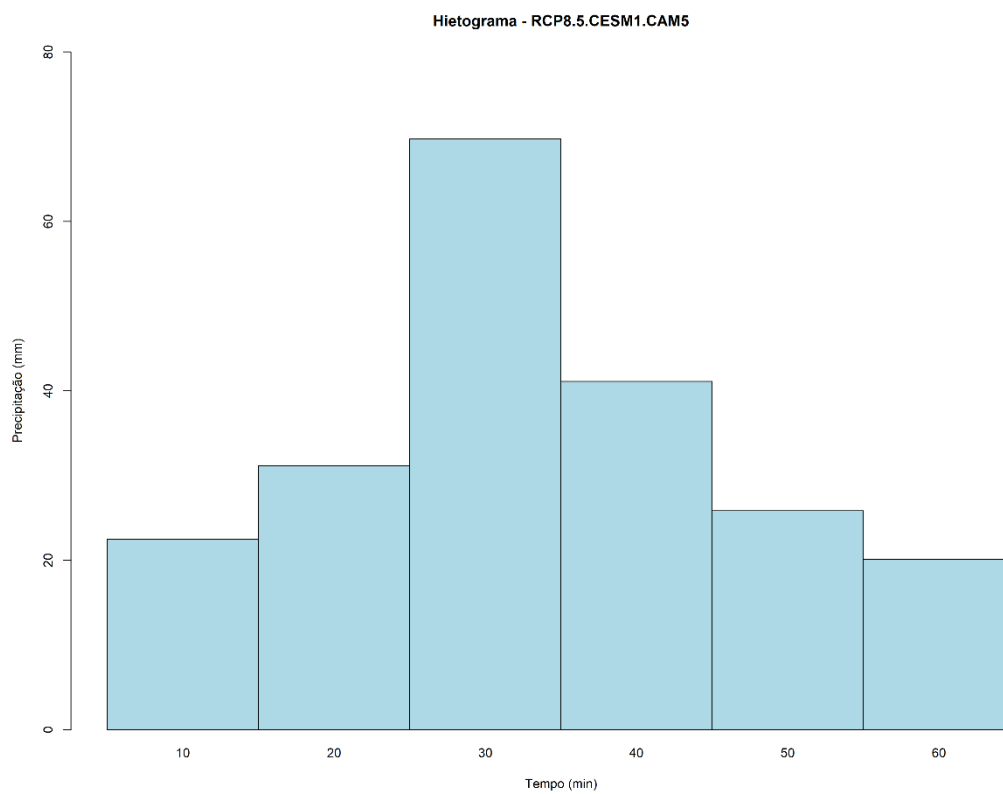


Figura B.10 – Hietograma RCP8.5.inmcm4 (TR 25 anos)

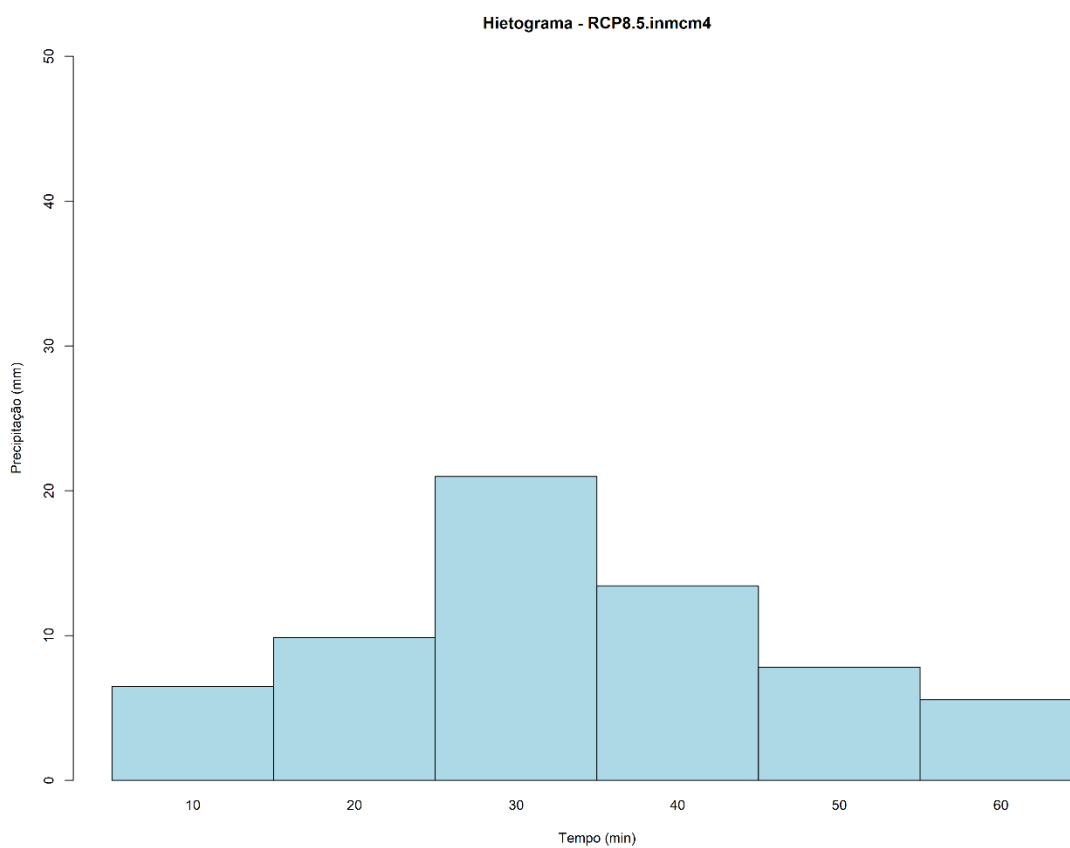


Figura B.11 – Hietograma RCP8.5.MIROC5 (TR 25 anos)

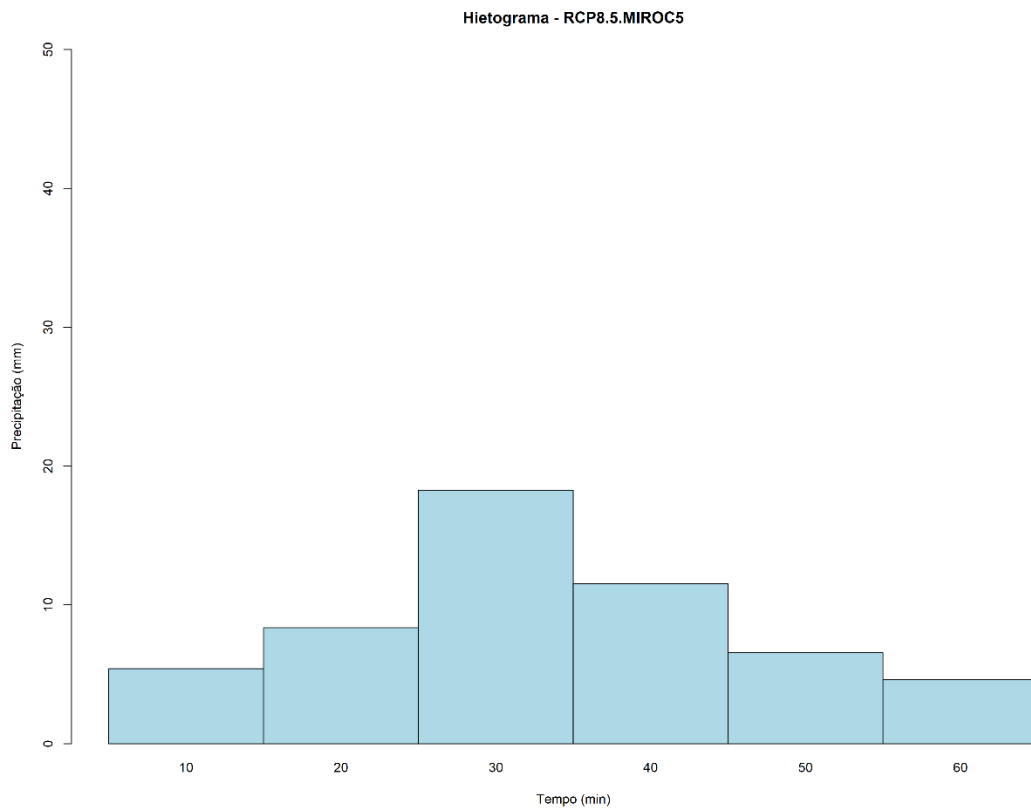


Figura B.12 – Hietograma AUMEF (TR 50 anos)

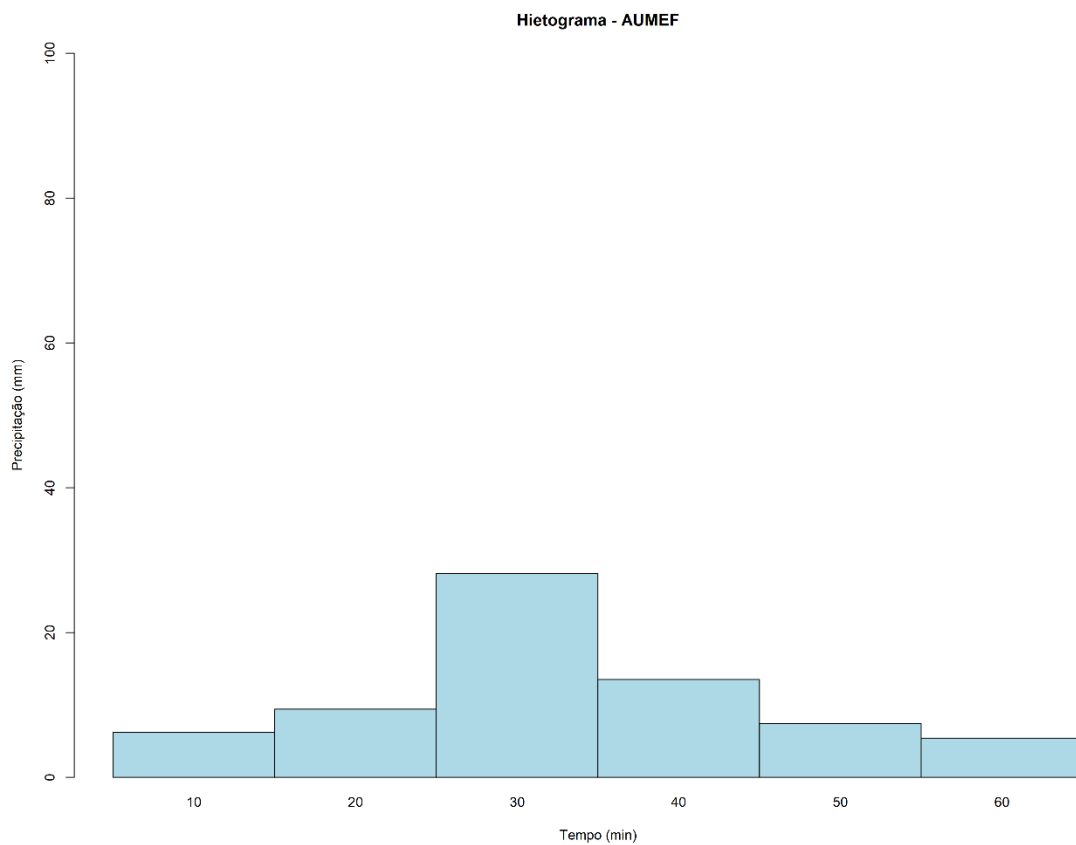


Figura B.13 – Hietograma RCP4.5.Bcc.csm1 (TR 50 anos)

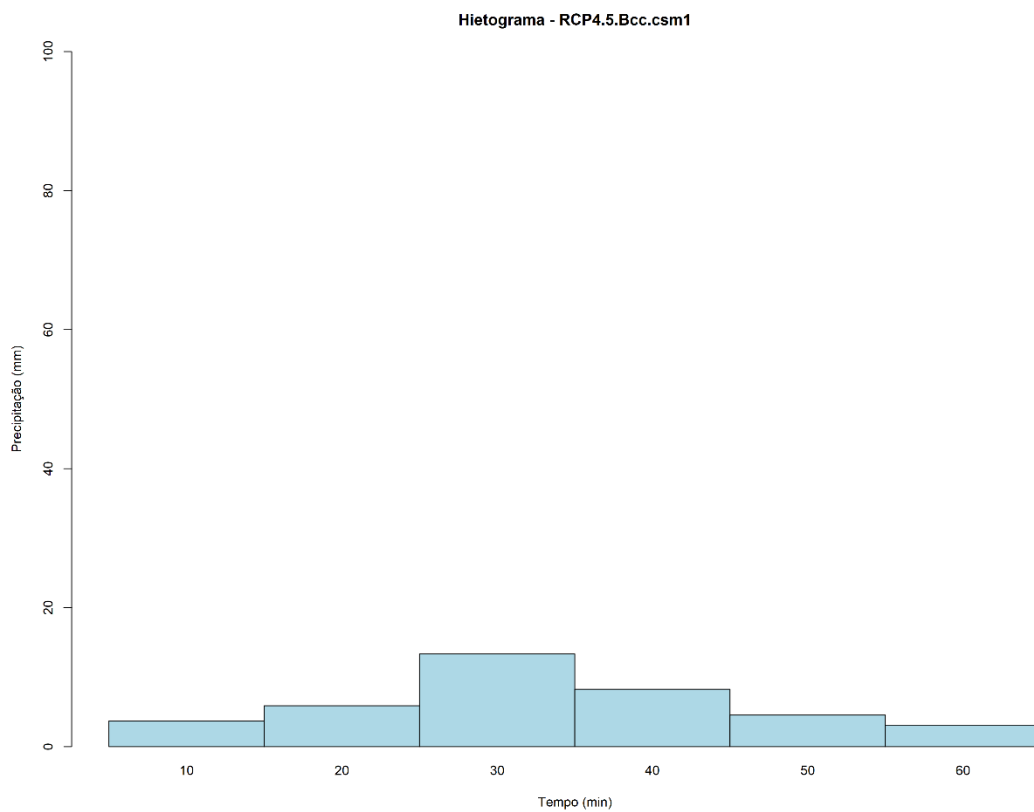


Figura B.14 – Hietograma RCP4.5.CanESM2 (TR 50 anos)

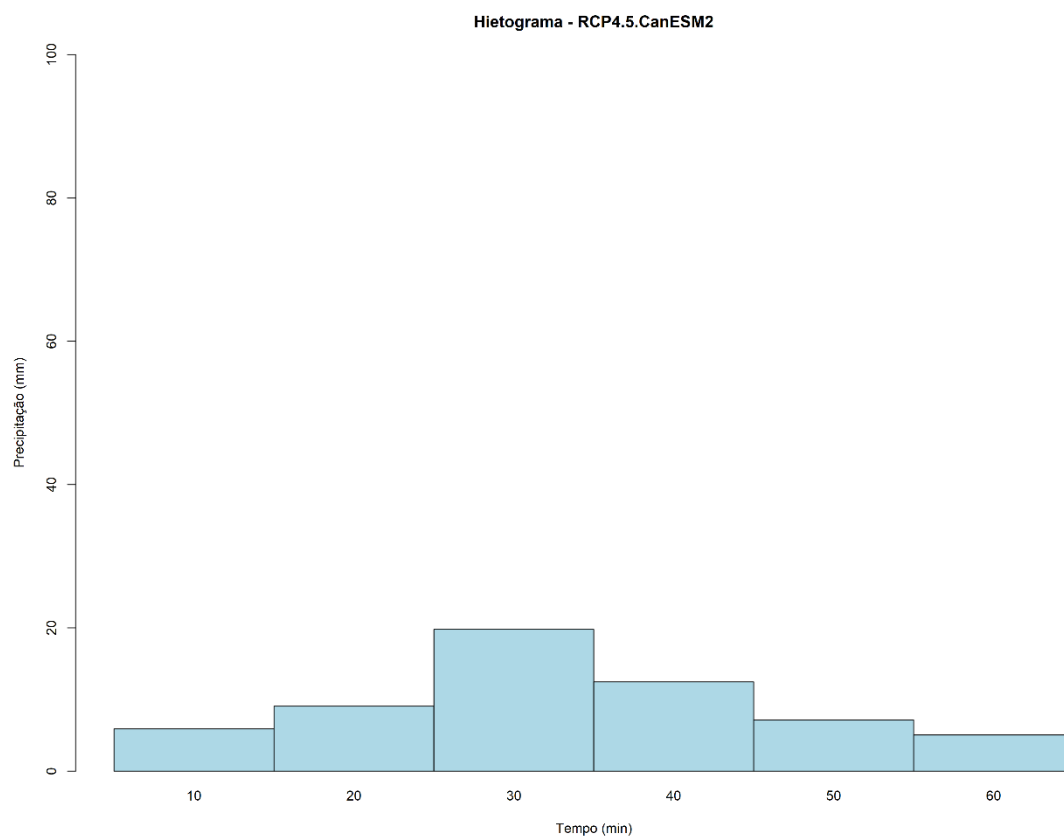


Figura B.15 – Hietograma RCP4.5.CESM1.CAM5 (TR 50 anos)

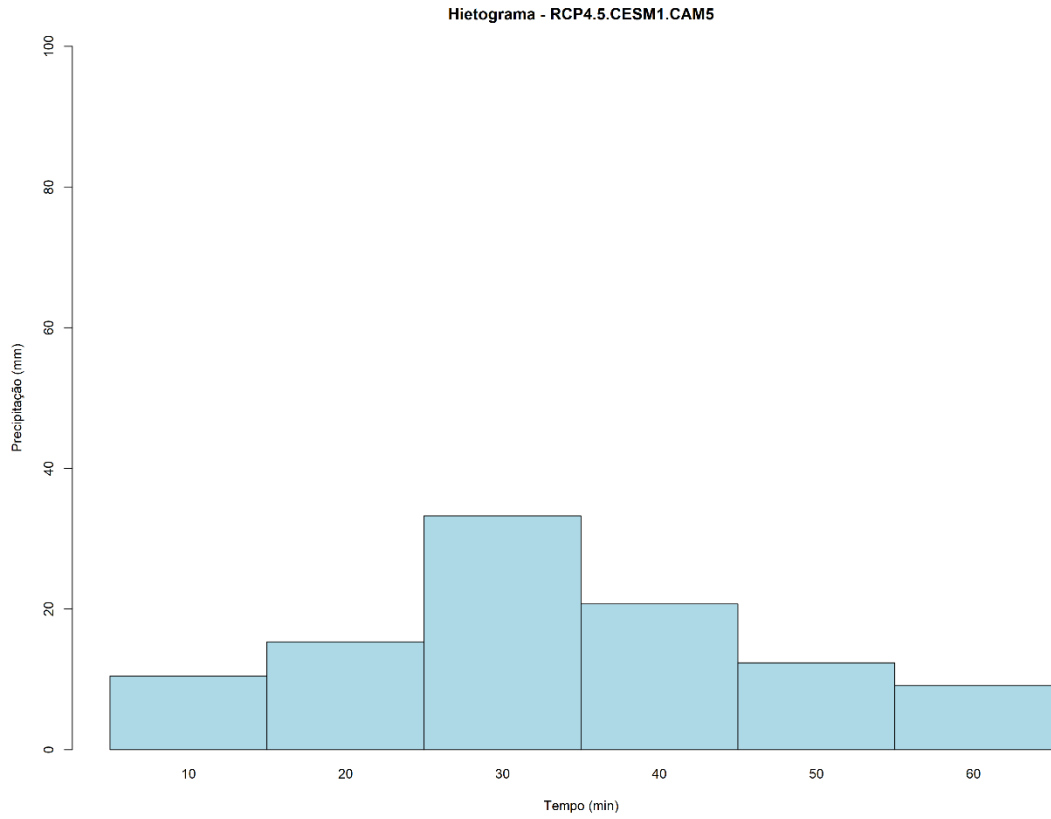


Figura B.16 – Hietograma RCP4.5.inmcm4 (TR 50 anos)

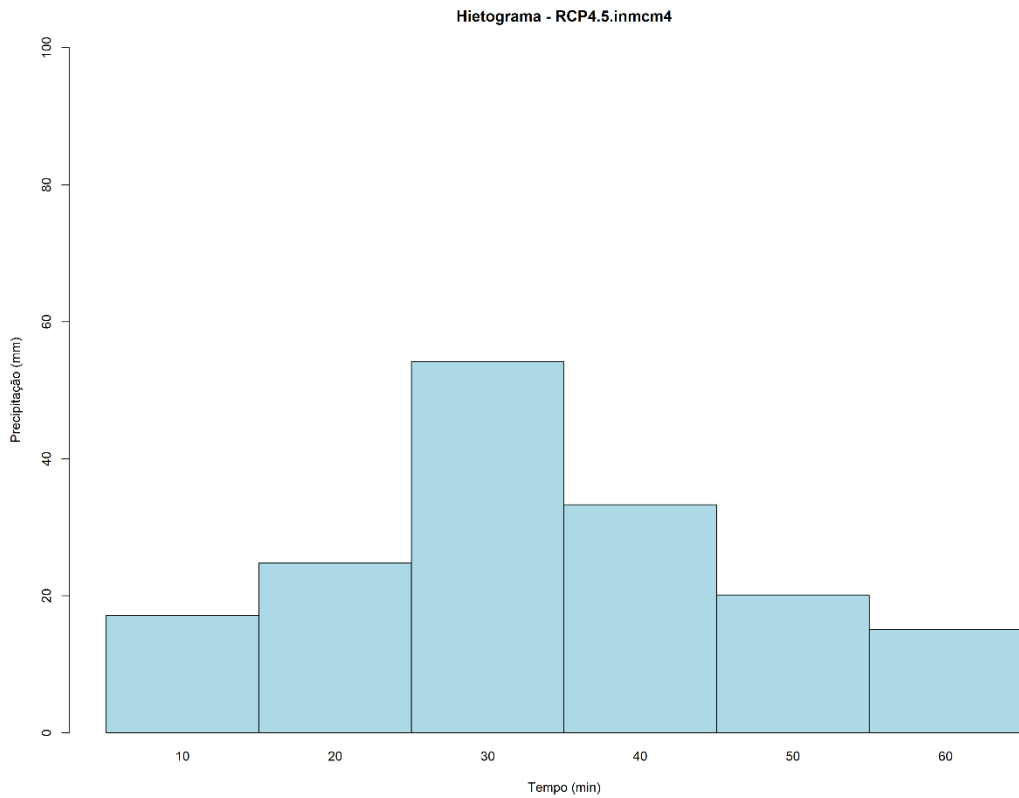


Figura B.17 – Hietograma RCP4.5.MIROC5 (TR 50 anos)

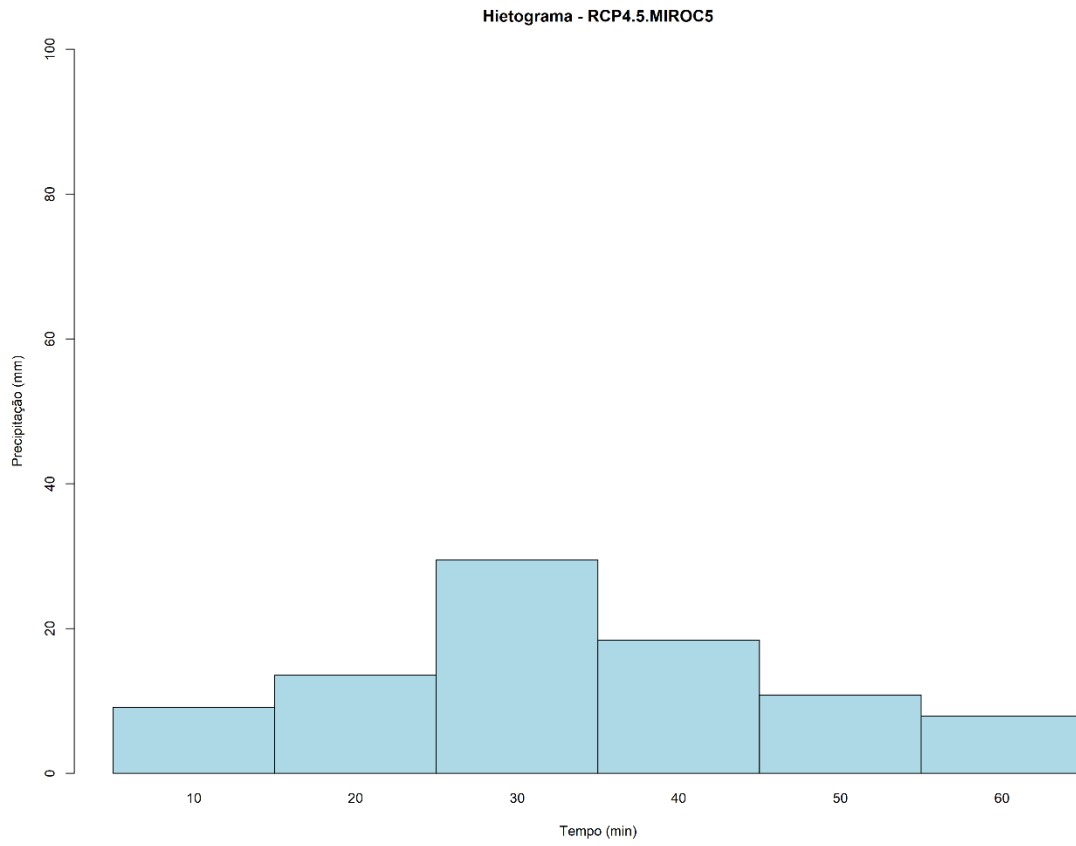


Figura B.18 – Hietograma RCP8.5.Bcc.csm1 (TR 50 anos)

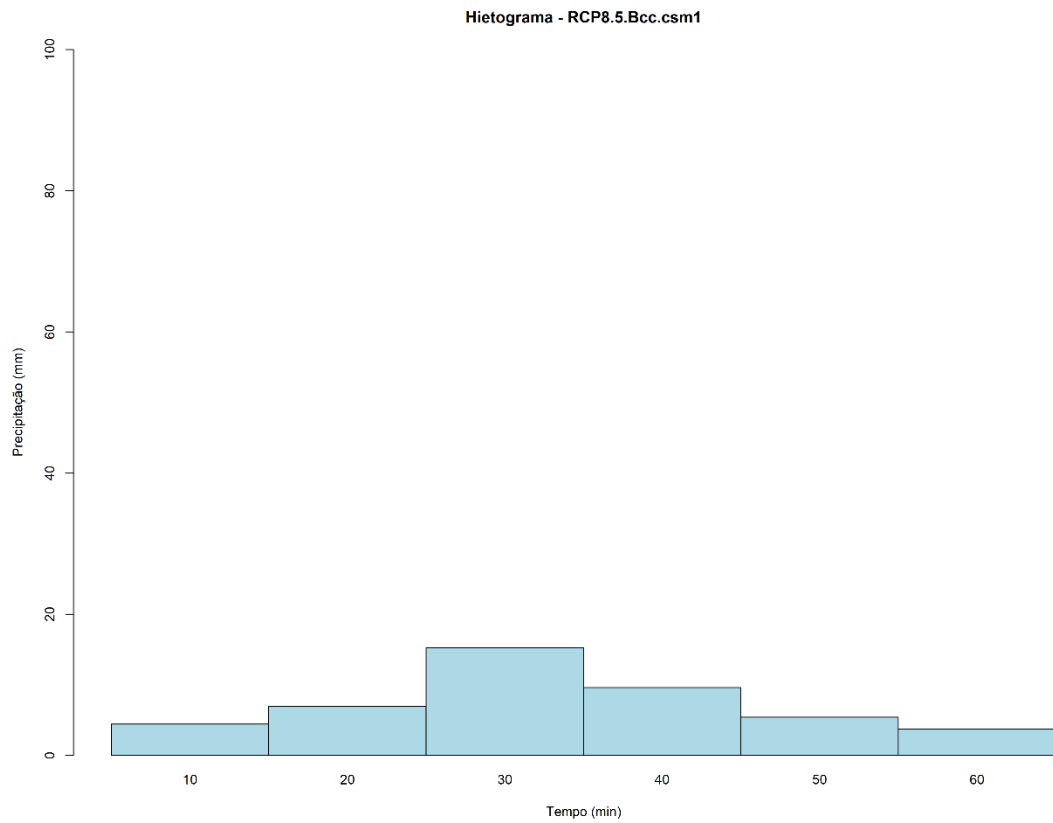


Figura B.19 – Hietograma RCP8.5.CanESM2 (TR 50 anos)

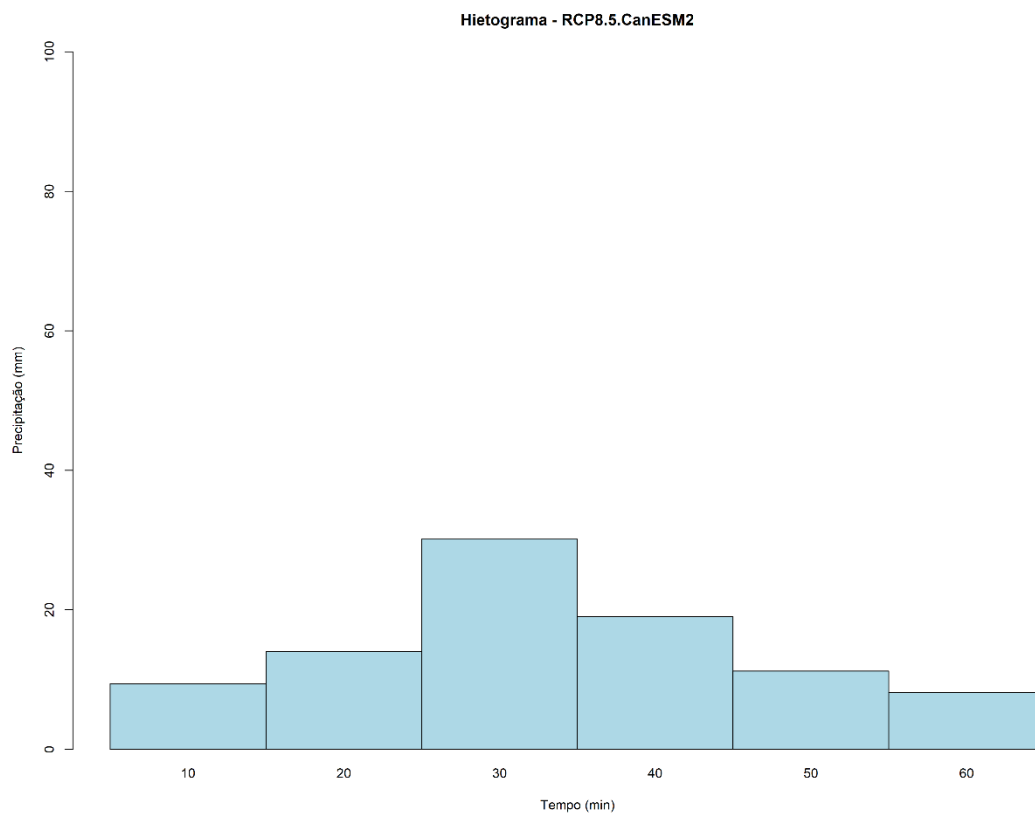


Figura B.20 – Hietograma RCP8.5.CESM1.CAM5 (TR 50 anos)

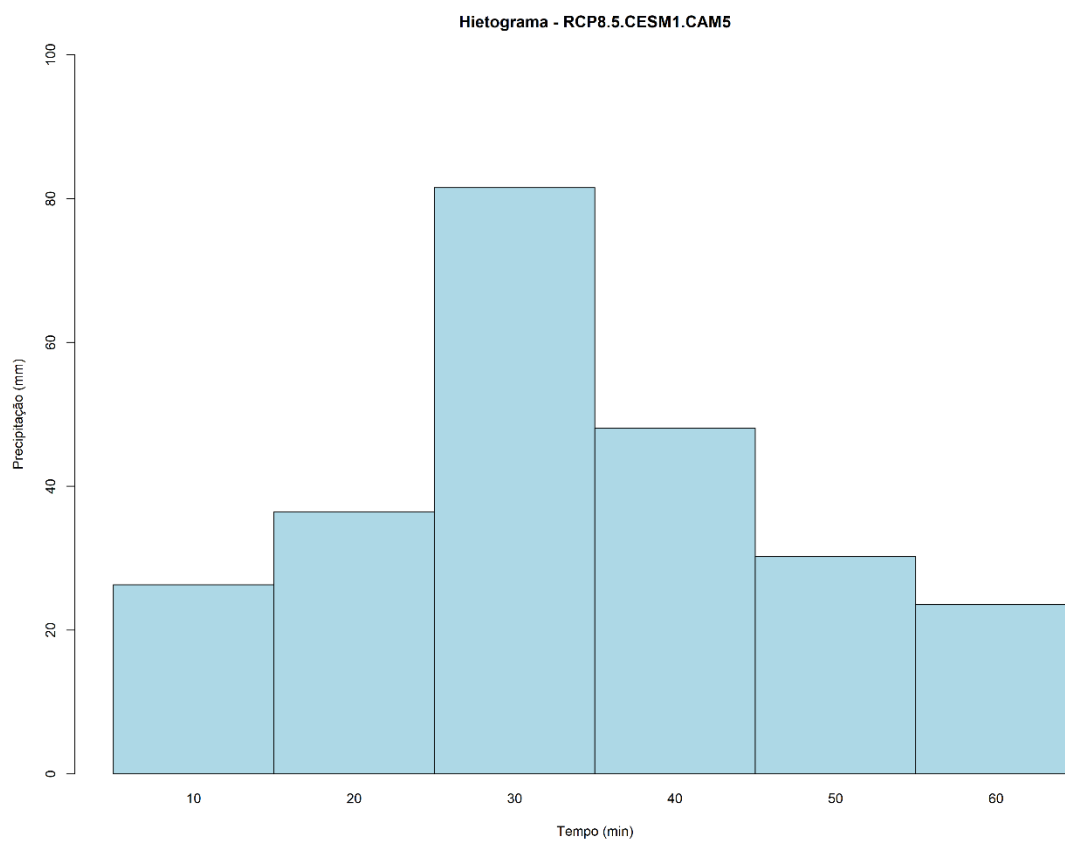


Figura B.21 – Hietograma RCP8.5.inmcm4 (TR 50 anos)

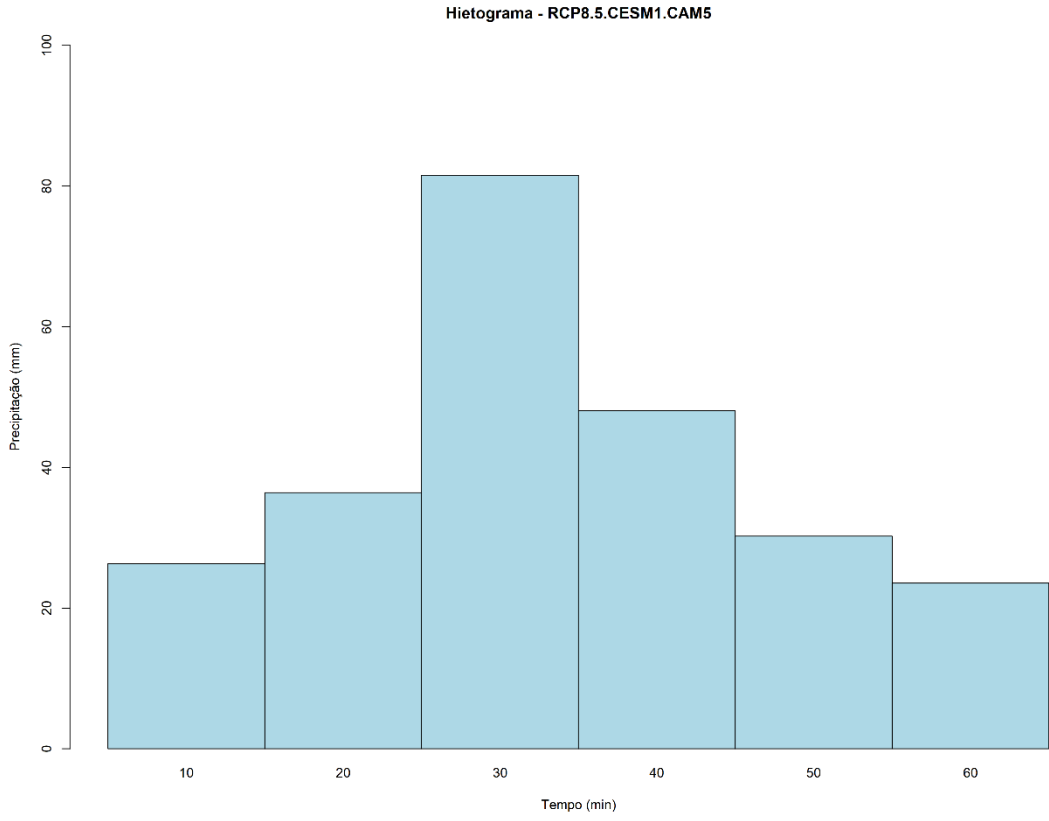


Figura B.22 – Hietograma RCP8.5.MIROC5 (TR 50 anos)

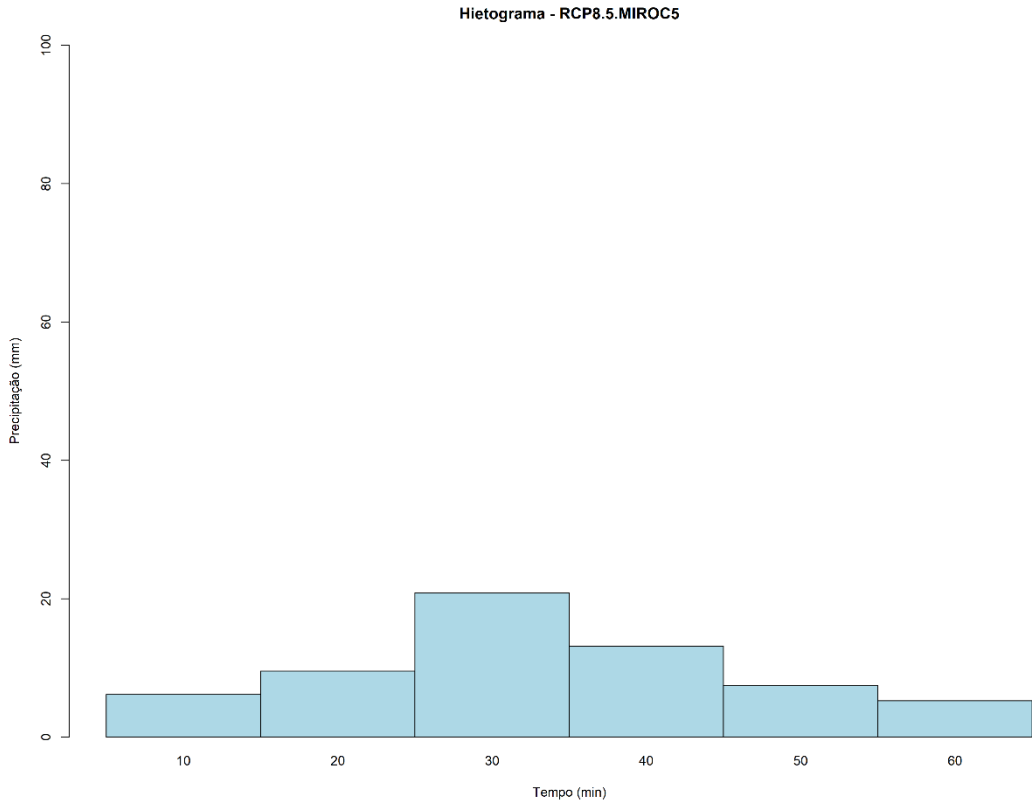


Figura B.23 – Hietograma AUMEF (TR 100 anos)

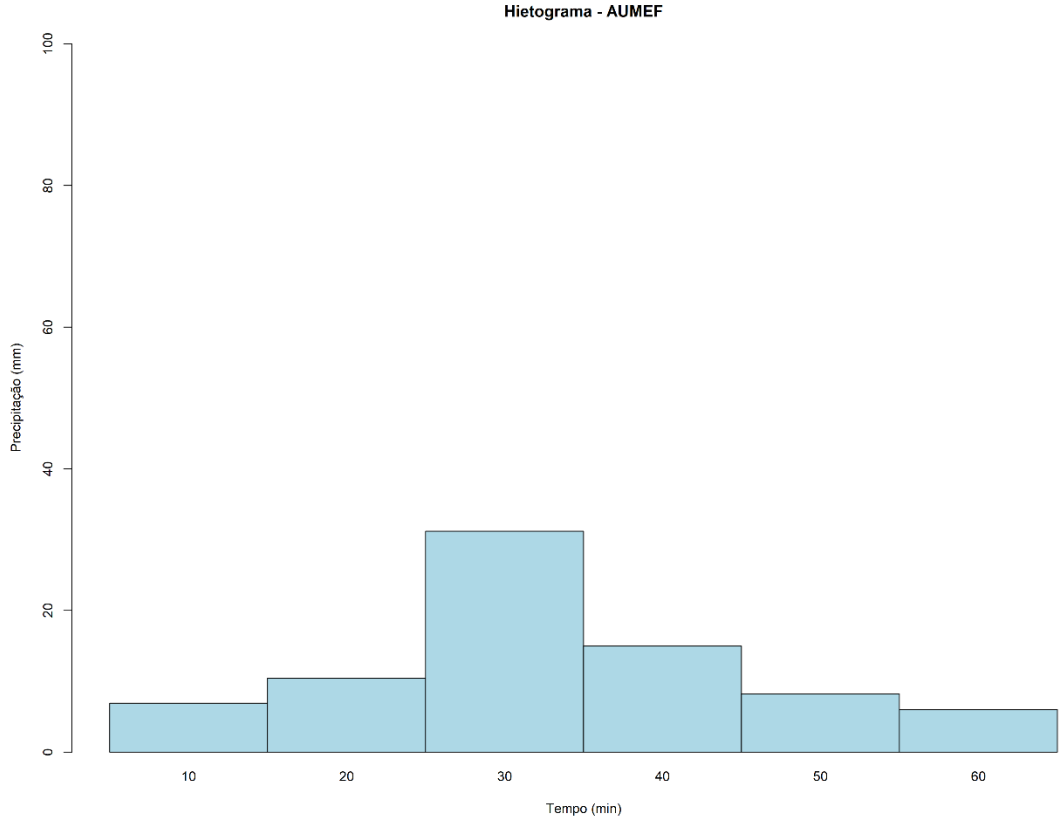


Figura B.24 – Hietograma RCP4.5.Bcc.csm1 (TR 100 anos)

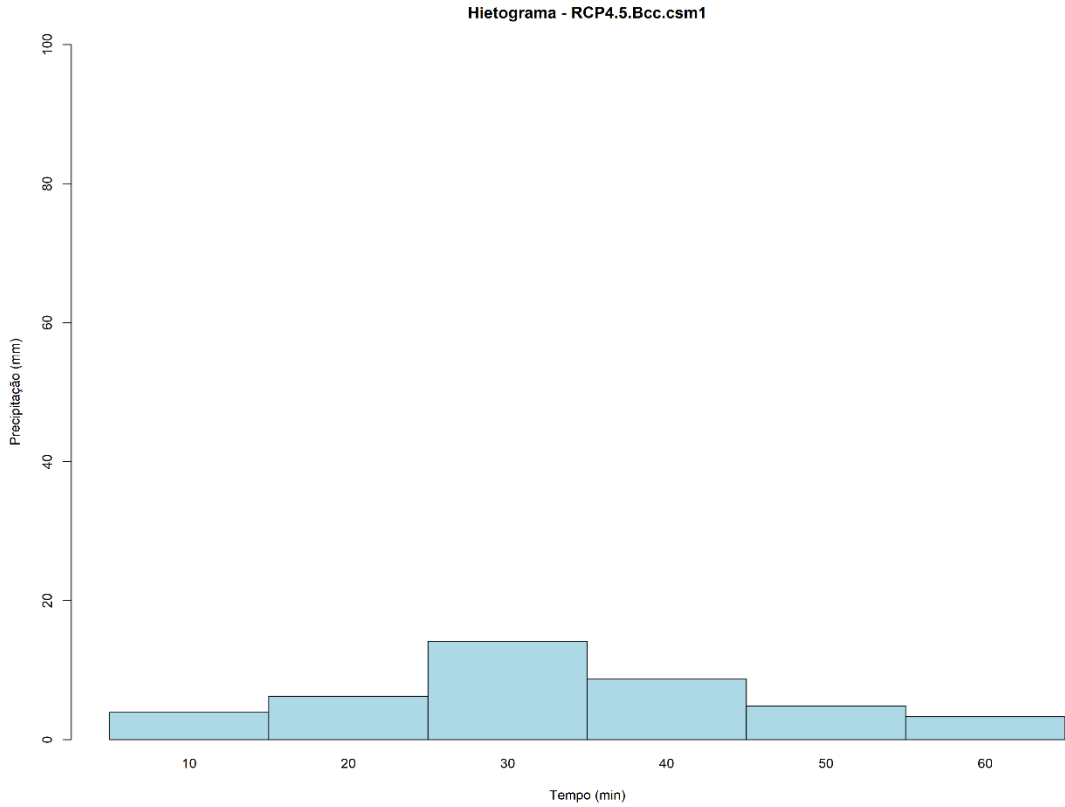


Figura B.25 – Hietograma RCP4.5.CanESM2 (TR 100 anos)

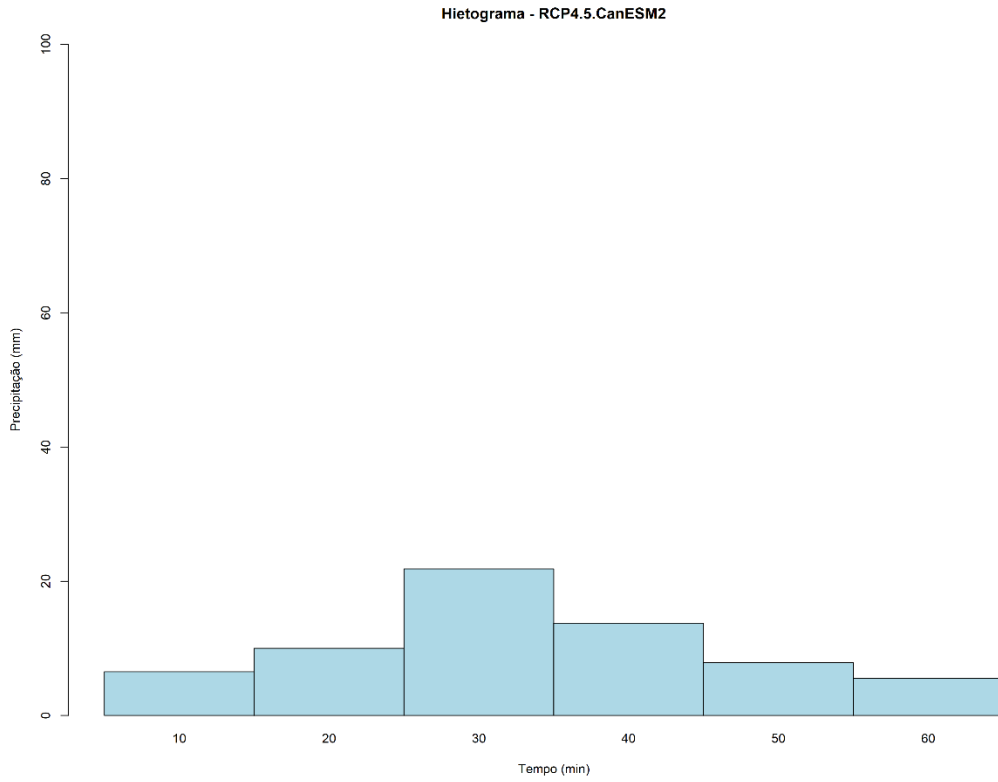


Figura B.26 – Hietograma RCP4.5.CESM1.CAM5 (TR 100 anos)

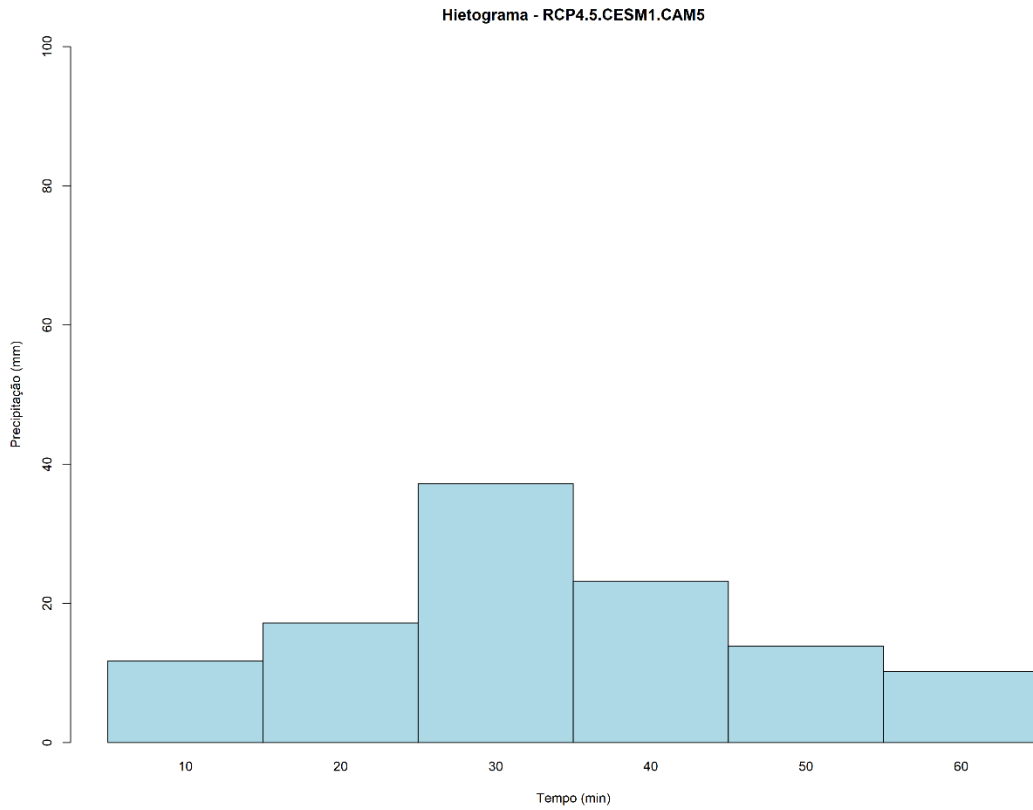


Figura B.27 – Hietograma RCP4.5.inmcm4 (TR 100 anos)

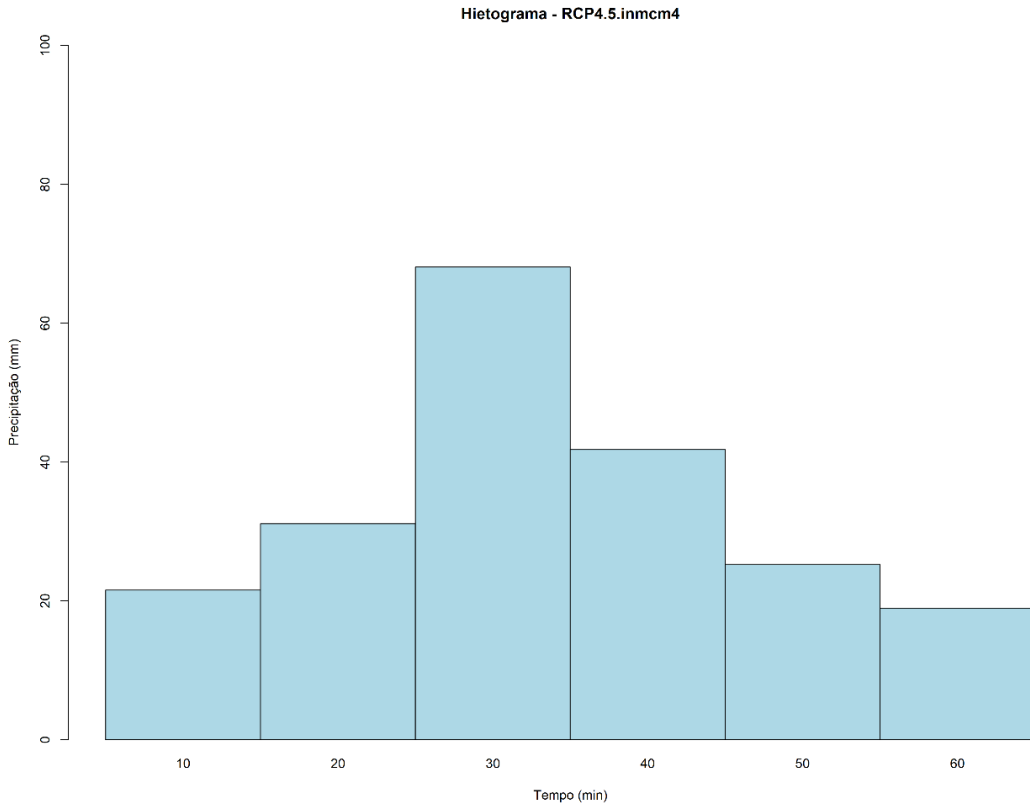


Figura B.28 – Hietograma RCP4.5.MIROC5 (TR 100 anos)

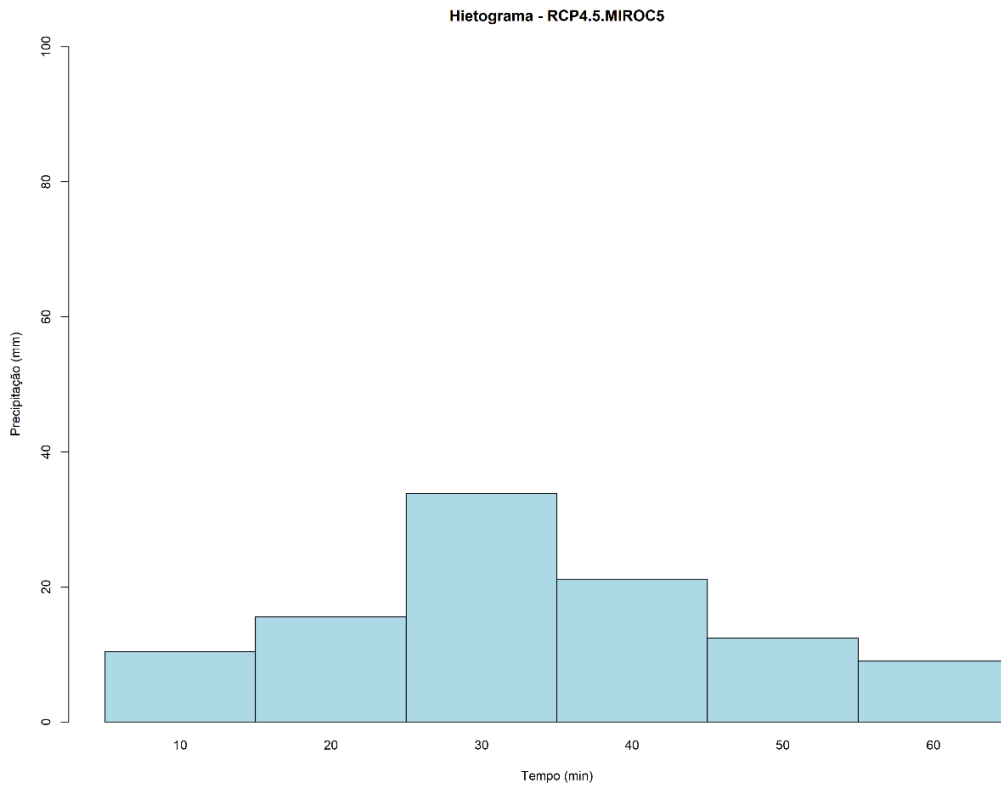


Figura B.29 – Hietograma RCP8.5.Bcc.csm1 (TR 100 anos)

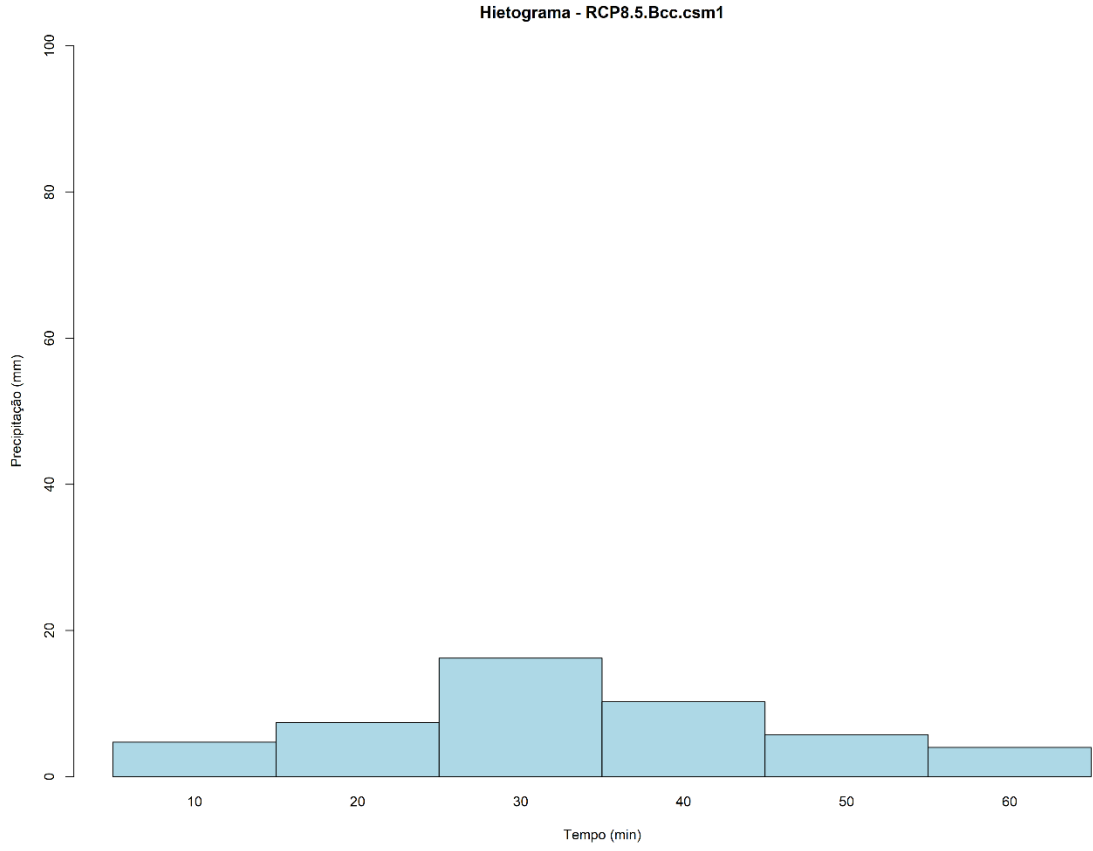


Figura B.30 – Hietograma RCP8.5.CanESM2 (TR 100 anos)

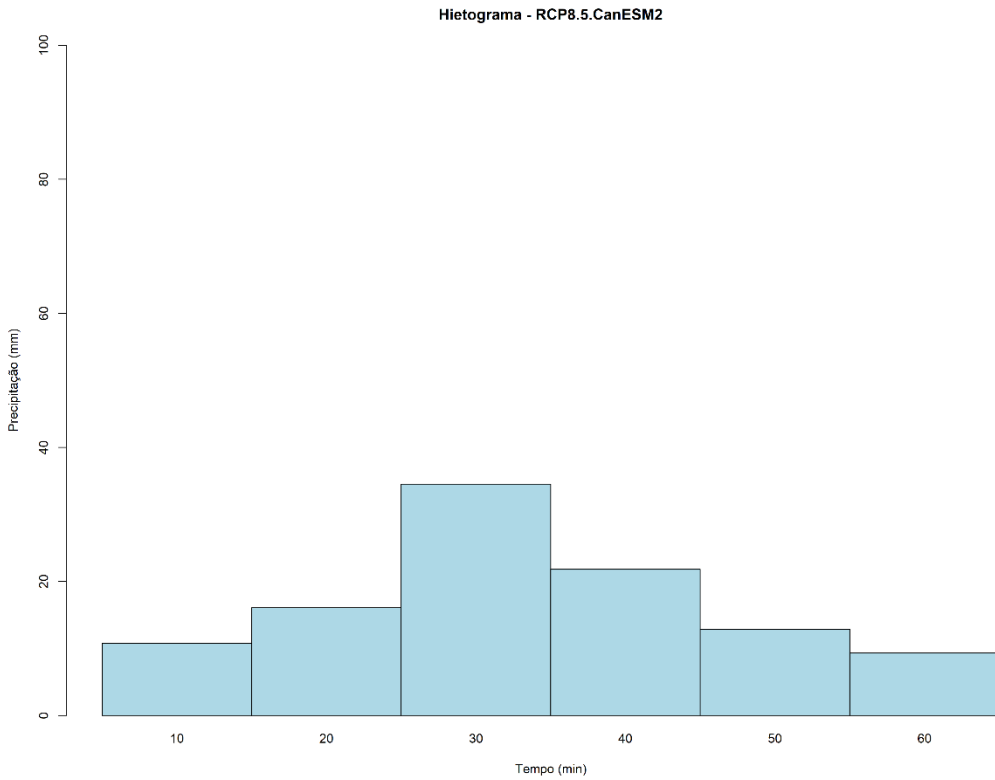


Figura B.31 – Hietograma RCP8.5.CESM1.CAM5 (TR 100 anos)

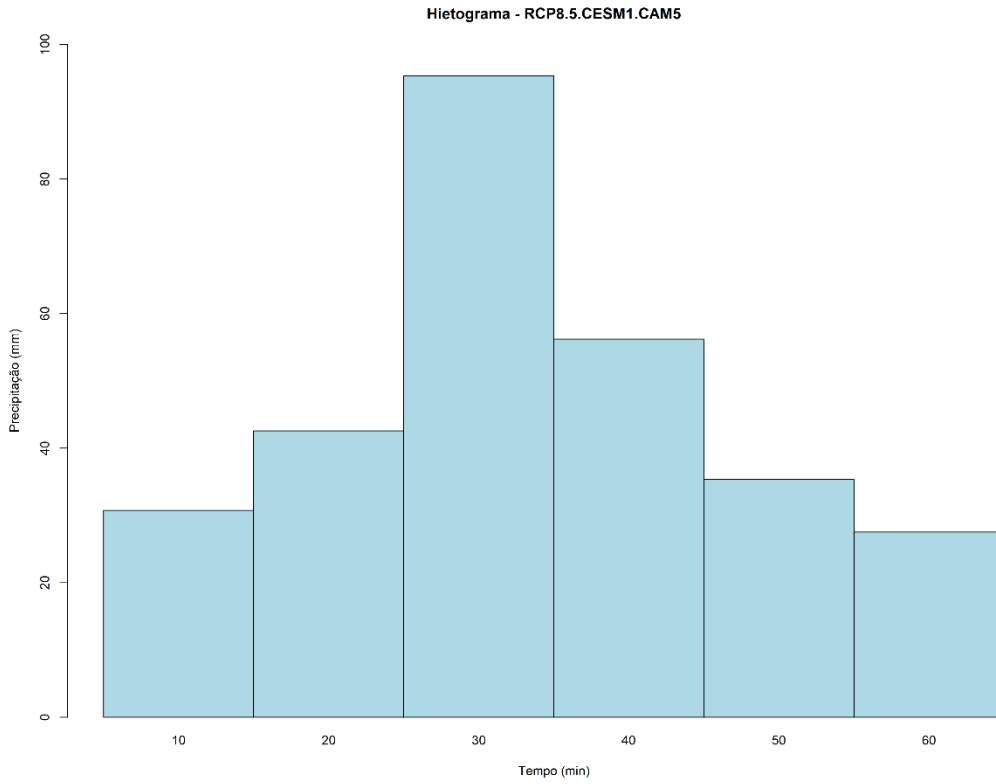


Figura B.32 – Hietograma RCP8.5.inmcm4 (TR 100 anos)

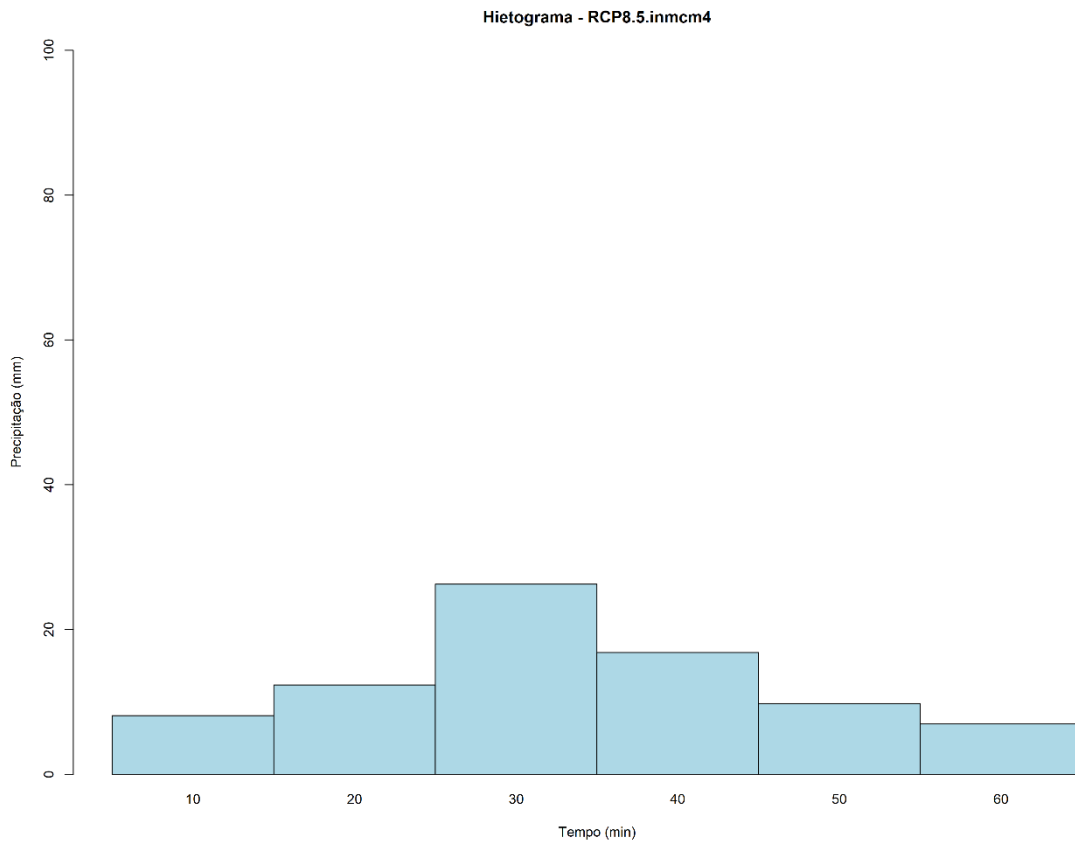
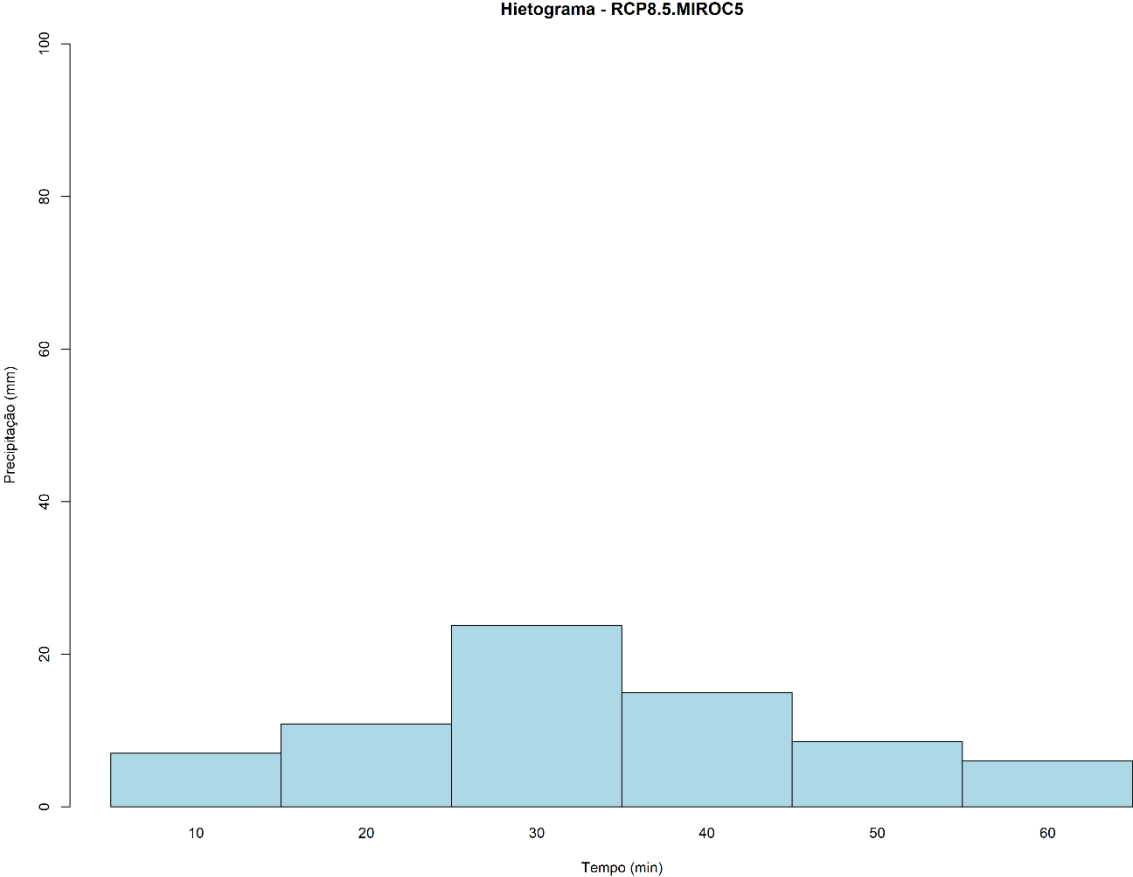


Figura B.33 – Hietograma RCP8.5.MIROC5 (TR 100 anos)



APÊNDICE C – TESTE DE ADERÊNCIA

C.1 – INTRODUÇÃO

Para a determinação do intervalo de confiança dos resultados calculados para o modelo de previsão do módulo de resiliência foi feita a hipótese de que os resíduos apresentados por esse modelo, calculados segundo a Equação 4.26, distribuíam-se segundo a Distribuição de Probabilidades Normal.

Esta hipótese foi confirmada por meio de testes de aderência. Segundo Assis *et al.* (2001), os testes de aderência, com emprego da estatística χ_{φ}^2 (“qui-quadrado”), são realizados quando se deseja colocar à prova a forma de distribuição de uma determinada população, por isto, foram utilizados neste trabalho para se verificar a normalidade ou não dos resíduos entre os valores gerados pela equação do módulo de resiliência do ensaio e os valores calculados pelo modelo de previsão do módulo de resiliência incluindo a variável de umidade.

C.2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considere-se uma amostra de tamanho n , e E_1, E_2, \dots, E_k , um conjunto de possíveis eventos da amostra. Sejam $F_{O1}, F_{O2}, \dots, F_{Ok}$, as frequências observadas na amostra dos respectivos eventos. Mas, nem sempre essas frequências concordam com as esperadas na população. Dessa forma, pode-se, então, estabelecer algumas hipóteses sobre as frequências esperadas $F_{E1}, F_{E2}, \dots, F_{Ek}$ e efetuar um teste de adequação de aderência para se verificar se os dados da amostra se ajustam com as hipóteses feitas (DANTAS NETO, 2004).

Segundo Assis *et al.* (2001), para realização dos testes de aderência é utilizada a seguinte estatística:

$$\chi_{\varphi}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{oi} - F_{ei})^2}{F_{ei}} \quad (C.1)$$

Onde:

χ_{φ}^2 = estatística “qui-quadrado” para φ graus de liberdade;

F_{oi} = frequência observada para o elemento i ;

F_{ei} = frequência esperada, ou teórica, para o elemento i ;

k = número das classes de frequência da distribuição para a amostra.

O número de graus de liberdade é calculado segundo a seguinte expressão (ASSIS *et al.*, 2001):

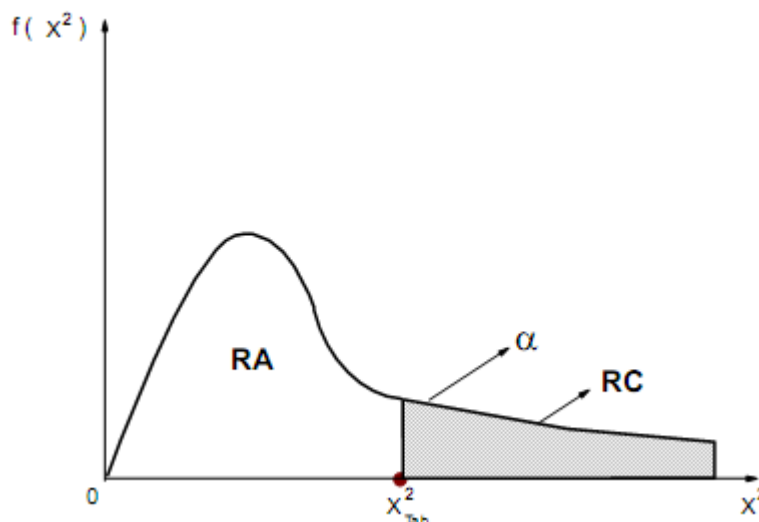
$$\varphi = k - 3 \quad (\text{C.2})$$

Neste trabalho, a determinação das frequências esperadas foi feita a partir da estimativa de dois parâmetros populacionais baseados nos dados amostrais (média e desvio-padrão), sendo, portanto, o valor do número de graus de liberdade calculado conforme a Equação C.2.

A seguir são destacados os principais procedimentos para a realização de um teste de aderência (ASSIS *et al.*, 2001):

- Enunciar as hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_1): neste caso a hipótese nula corresponde à afirmação de que não existe diferença entre as F_{ei} (frequências esperadas), calculadas por um dado modelo de distribuição de probabilidades, e as F_{oi} (frequências observadas). Já a hipótese alternativa afirmará que se as F_{ei} e F_{oi} diferem, o modelo testado é inadequado para representar a distribuição da população;
- Fixar o nível de significância α , bem como a variável χ_φ^2 com φ graus de liberdade;
- Determinar a região crítica (RC) e a região de aceitação (RA): para que H_0 seja aceita, ao nível de significância fixado, é esperado que as frequências observadas sejam bem próximas das frequências esperadas; portanto, o valor de χ_φ^2 será pequeno. Logo, valores baixos de χ_φ^2 conduzem à aceitação de H_0 . A região crítica deverá estar concentrada a direita de certo valor crítico χ_φ^2 tabelado, conforme ilustrado na Figura B.1.

Figura C.1 – Ilustração das regiões crítica (RC) e região de aceitação (RA)



Fonte: Dantas Neto, 2004

A partir dos procedimentos descritos anteriormente, a aceitação da hipótese nula (H_0), ocorre quando:

$$(\chi^2)_{cal} \leq (\chi^2)_{tab} \quad (B.3)$$

Onde:

$(\chi^2)_{cal}$ = valor calculado da estatística “qui-quadrado” com φ graus de liberdade;

$(\chi^2)_{tab}$ = valor tabelado da estatística “qui-quadrado” com φ graus de liberdade.

C.3 – RESÍDUOS DO MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

As Tabelas C.1, C.2 e C.3 apresentam o cálculo de $(\chi^2)_{cal}$ para a distribuição dos resíduos calculados para o modelo de previsão do módulo de resiliência para as camadas de base, sub-base e subleito apresentado no Capítulo 4. Para a normalização dos limites dos intervalos de classe foram empregados os valores de média e desvio-padrão dos resíduos.

Considerando o número de graus de liberdade igual a 2, calculado pela Equação C.2 para o número de classes de frequência igual a 5, foi obtido para $(\chi^2)_{tab}$ o valor de 5,991, superior ao valor obtido para $(\chi^2)_{cal}$ em todas as camadas estudadas, conforme apresentado nas tabelas (Tabelas B.1, B.2 e B.3) a seguir. Esses resultados mostram que os resíduos do

modelo de previsão do módulo de resiliência distribuem-se segundo o modelo de probabilidade Gaussiano.

Tabela C.1 – Cálculo de $(\chi_{\phi^2})_{cal}$ para os resíduos do modelo do módulo de resiliência da camada de base

Classes		Foi		Cálculo de z		Fei		(Foi-Fei) ² /Fei
		n	%	Classes		n	%	
-37.42	-17.83	8	17.8%	-1.71	-0.82	7.3	16.3%	0.06
-17.83	1.75	17	37.8%	-0.82	0.08	11.8	26.2%	2.30
1.75	21.34	11	24.4%	0.08	0.98	16.6	36.8%	1.88
21.34	40.92	7	15.6%	0.98	1.87	6.0	13.3%	0.18
40.92	60.50	2	4.4%	1.87	2.77	1.3	2.8%	0.44
Total		45	100%					4.86

Fonte: Elaboração própria

Tabela C.2 – Cálculo de $(\chi_{\phi^2})_{cal}$ para os resíduos do modelo do módulo de resiliência da camada de sub-base

Classes		Foi		Cálculo de z		Fei		(Foi-Fei) ² /Fei
		n	%	Classes		n	%	
-217.84	-139.56	3	6.7%	-2.37	-1.55	2.3	5.2%	0.19
-139.56	-61.28	9	20.0%	-1.55	-0.73	7.7	17.2%	0.20
-61.28	17.00	10	22.2%	-0.73	0.10	13.8	30.7%	1.06
17.00	95.28	13	28.9%	0.10	0.92	12.7	28.1%	0.01
95.28	173.57	10	22.2%	0.92	1.74	6.2	13.8%	2.32
Total		45	100%					3.78

Fonte: Elaboração própria

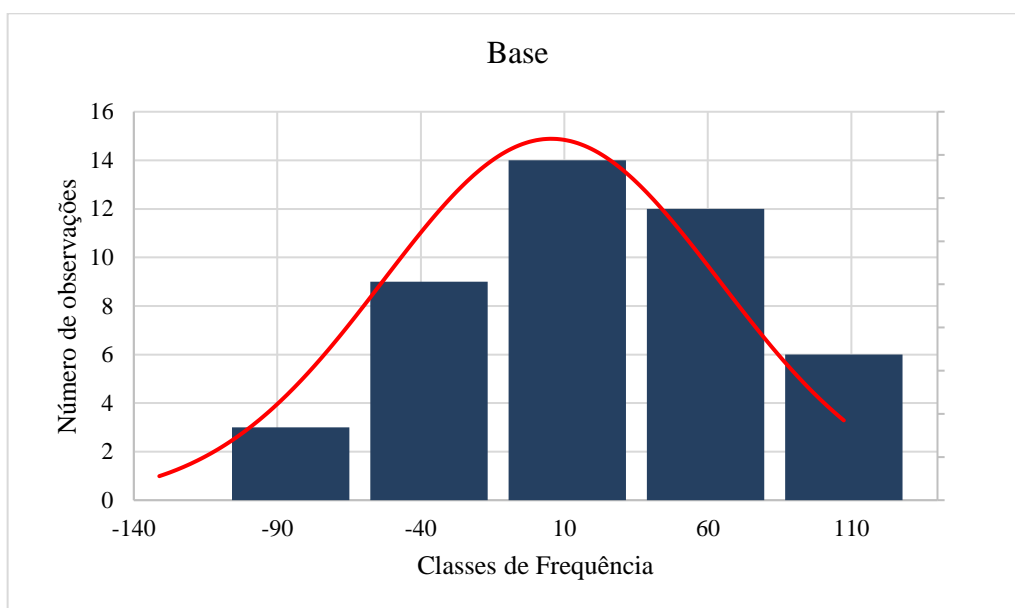
Tabela C.3 – Cálculo de $(\chi_{\phi^2})_{cal}$ para os resíduos do modelo do módulo de resiliência da camada de subleito

Classes		Foi		Cálculo de z		Fei		(Foi-Fei) ² /Fei
		n	%	Classes		n	%	
-133.53	-85.35	3	6.8%	-2.33	-1.49	2.6	5.8%	0.08
-85.35	-37.17	9	20.5%	-1.49	-0.66	8.2	18.7%	0.08
-37.17	11.01	14	31.8%	-0.66	0.18	13.9	31.7%	0.00
11.01	59.19	12	27.3%	0.18	1.01	12.0	27.2%	0.00
59.19	107.37	6	13.6%	1.01	1.85	5.5	12.4%	0.05
Total		44	100%					0.21

Fonte: Elaboração própria

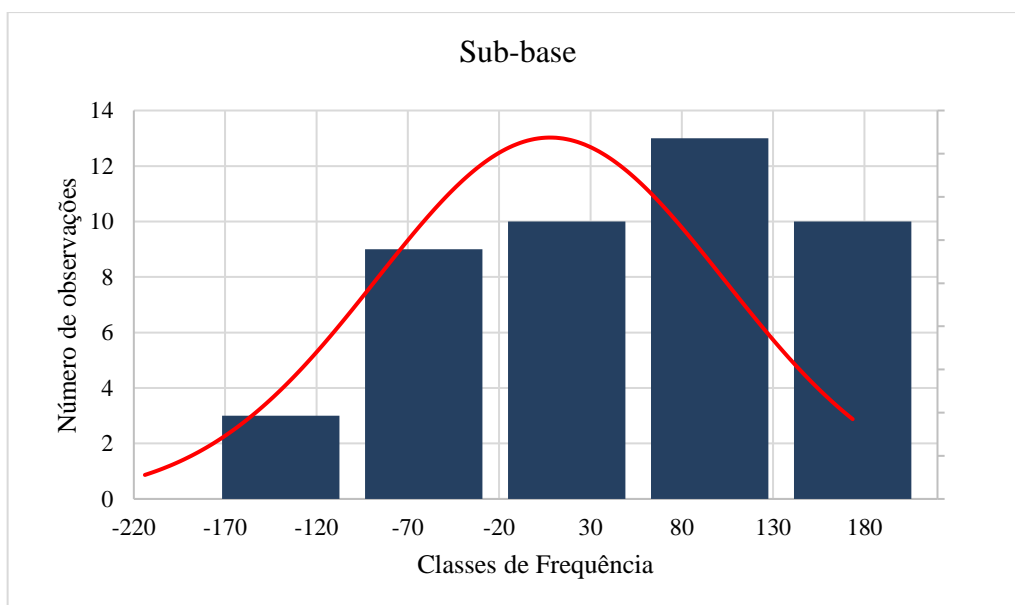
Nas Figura C.2, C.3 e C.4 são apresentados a distribuição dos resíduos para os modelos de previsão do módulo de resiliência das camadas de base, sub-base e subleito, respectivamente, em forma de histograma, e as curvas correspondentes à distribuição de probabilidades normal.

Figura C.2 – Distribuição de frequência dos resíduos do modelo de previsão do módulo de resiliência da base



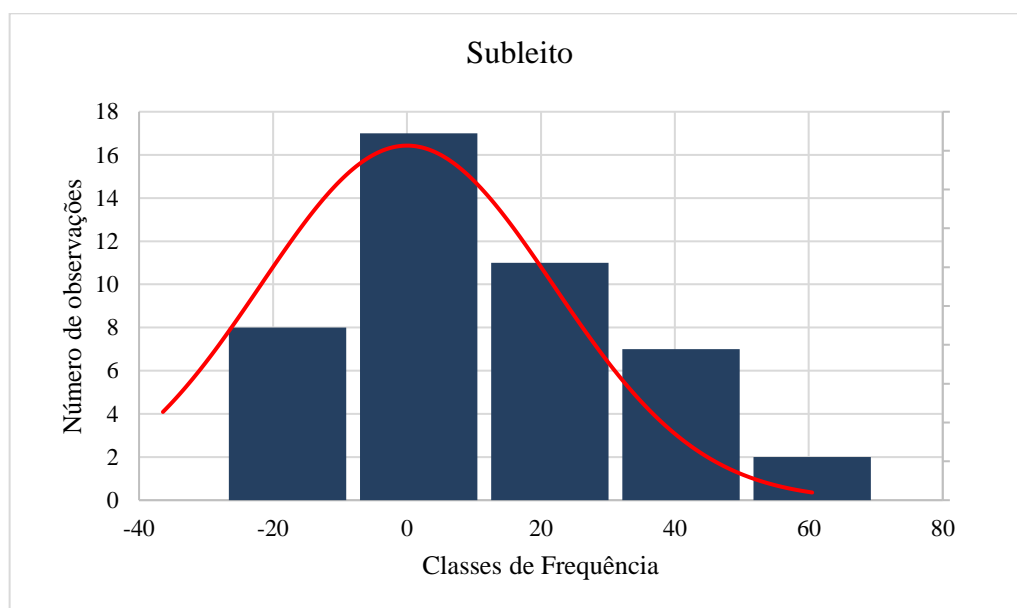
Fonte: Elaboração própria

Figura C.3 – Distribuição de frequência dos resíduos do modelo de previsão do módulo de resiliência da sub-base



Fonte: Elaboração própria

Figura C.4 – Distribuição de frequência dos resíduos do modelo de previsão do módulo de resiliência do subleito



Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE D – VARIAÇÕES DE UMIDADE VOLUMÉTRICA

D.1. Revestimento 10 cm

Figura D.1 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,0 m

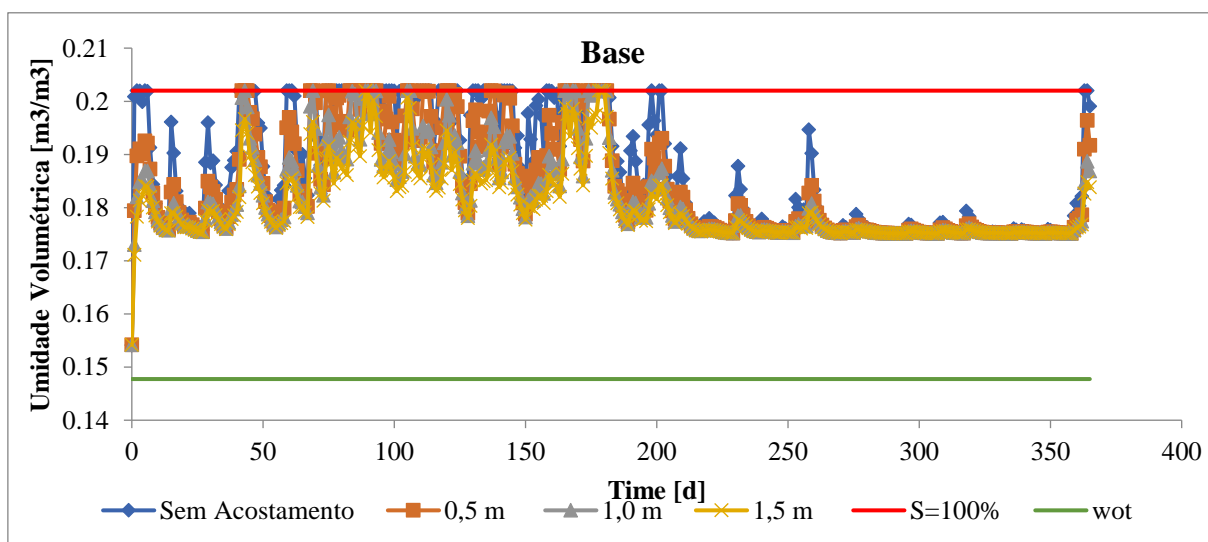
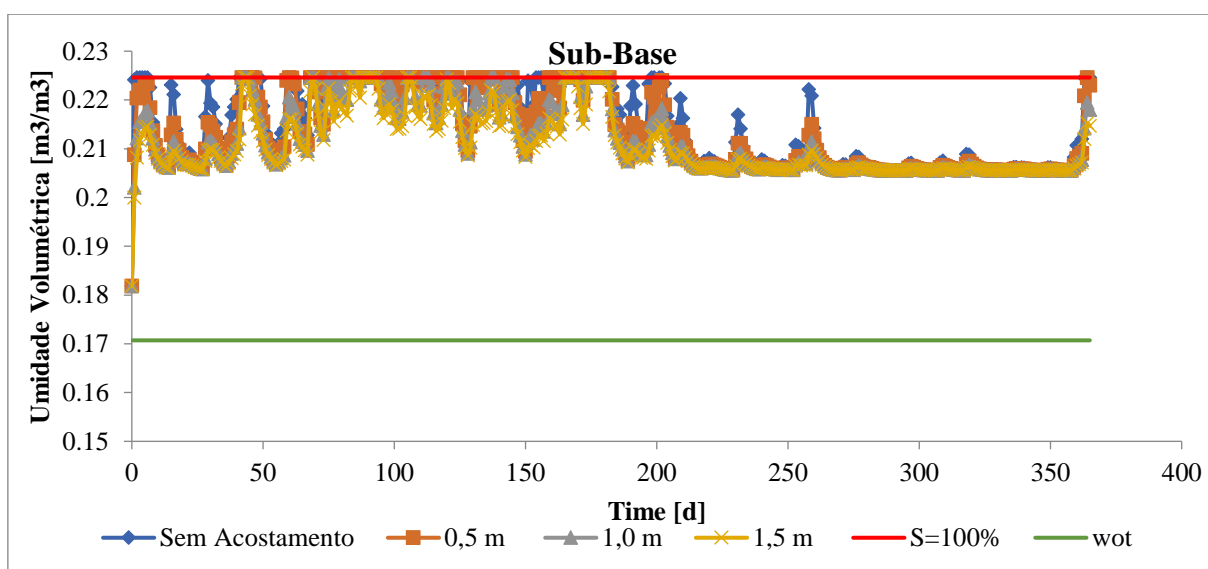
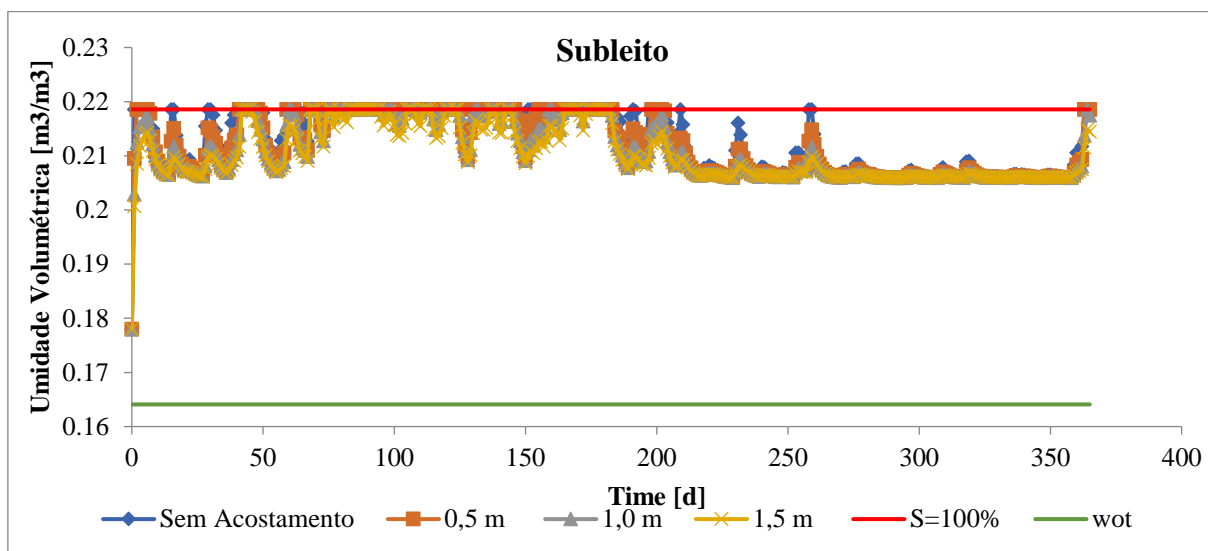


Figura D.2 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

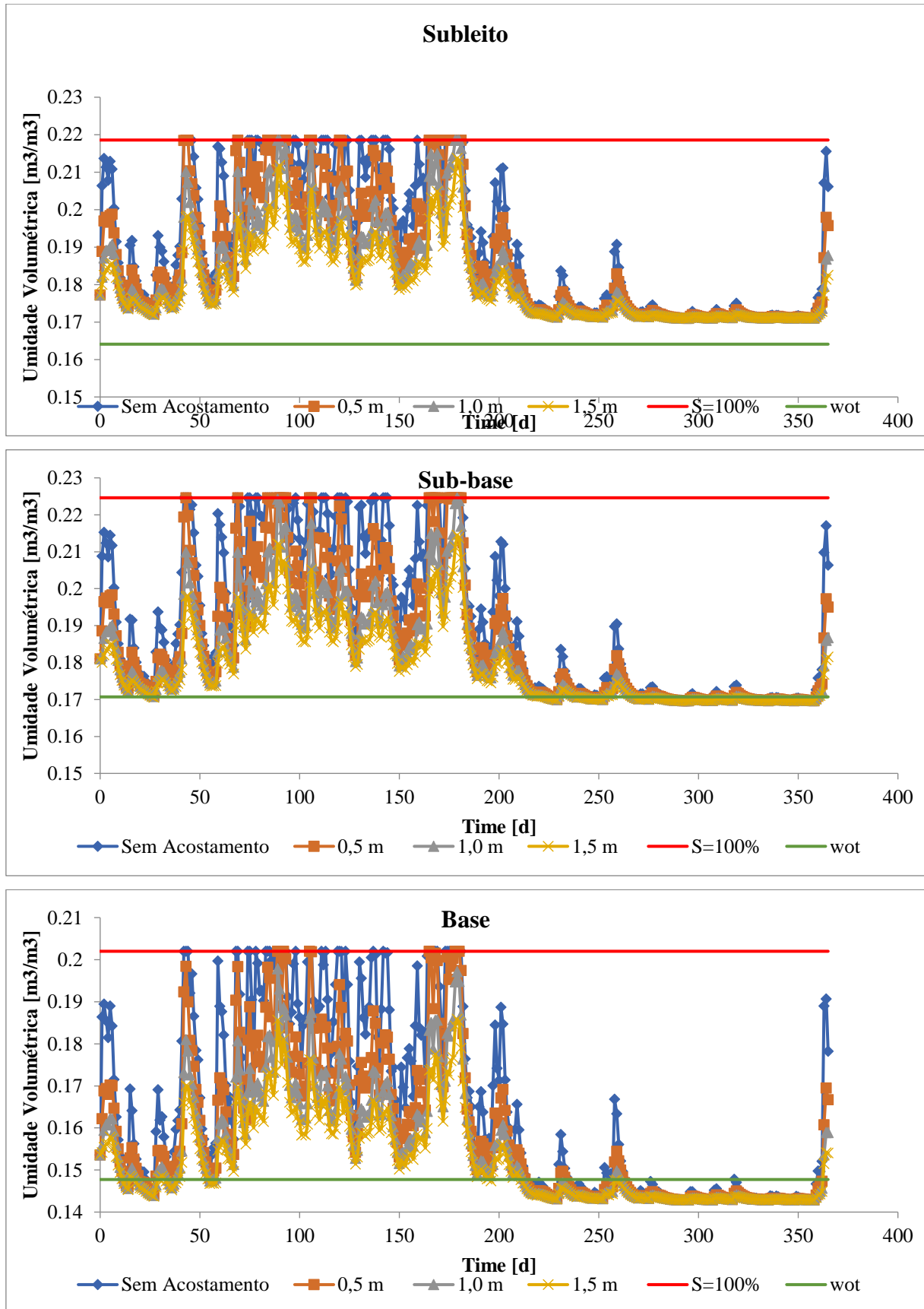


Figura D.3 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

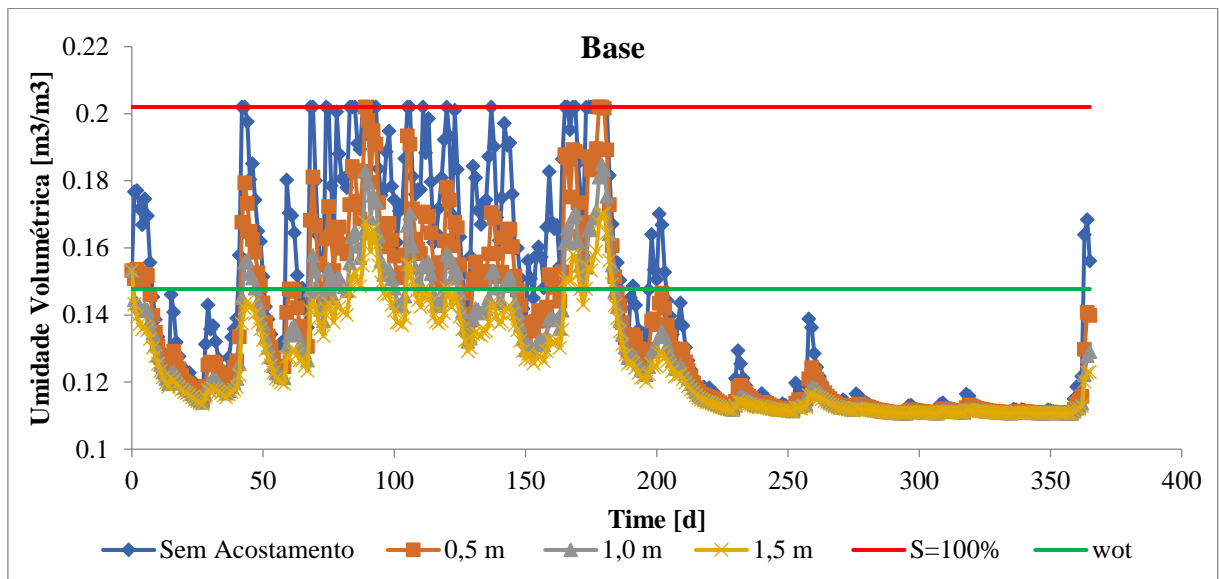
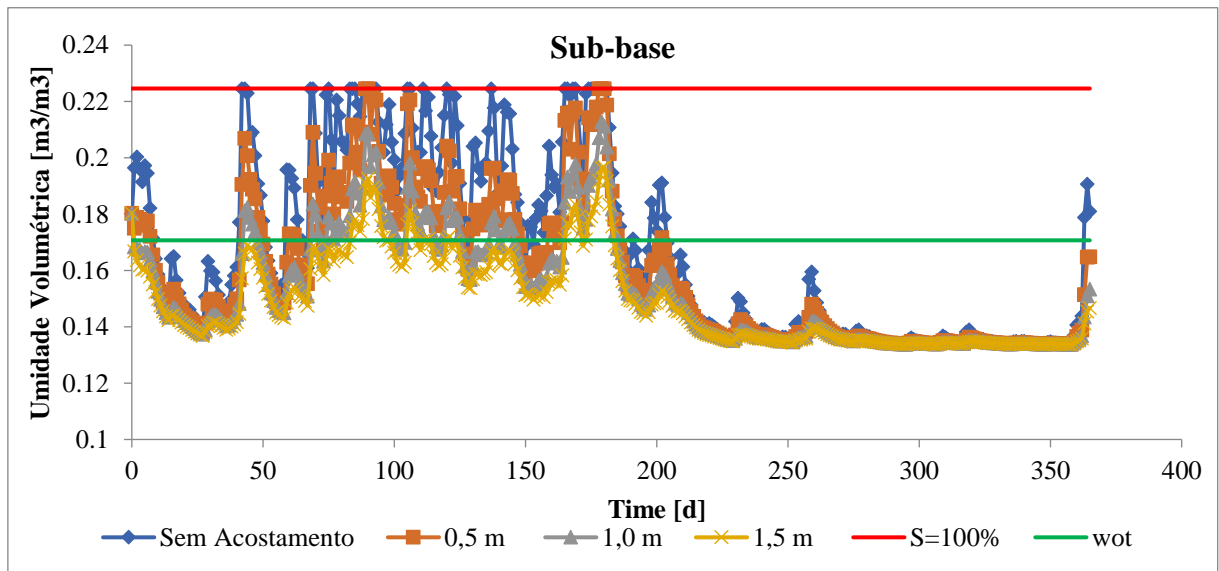
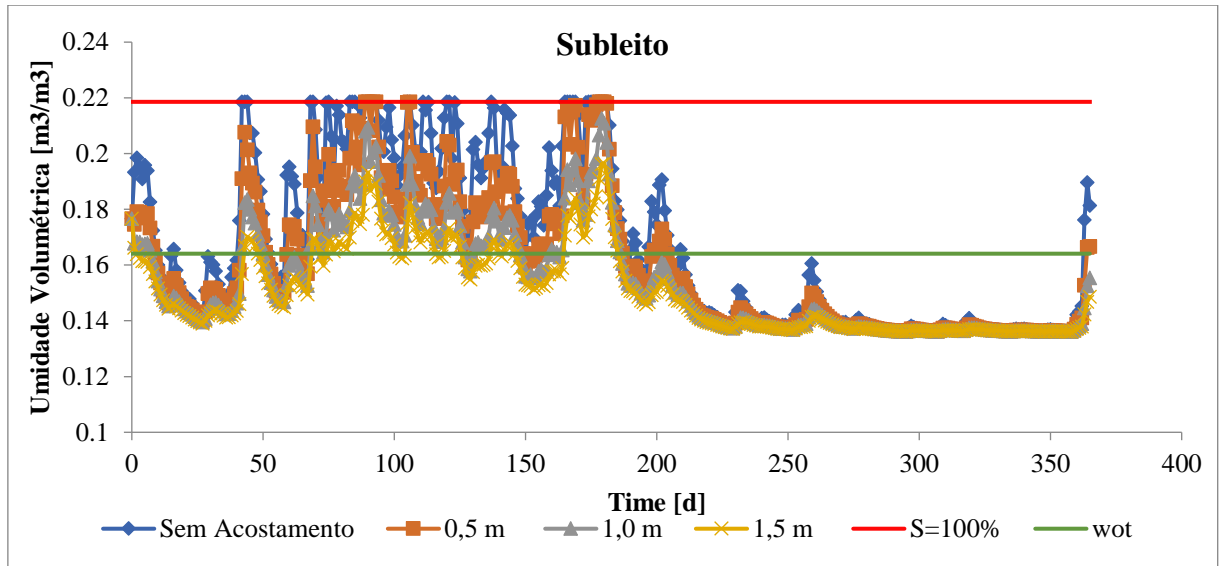


Figura D.4 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

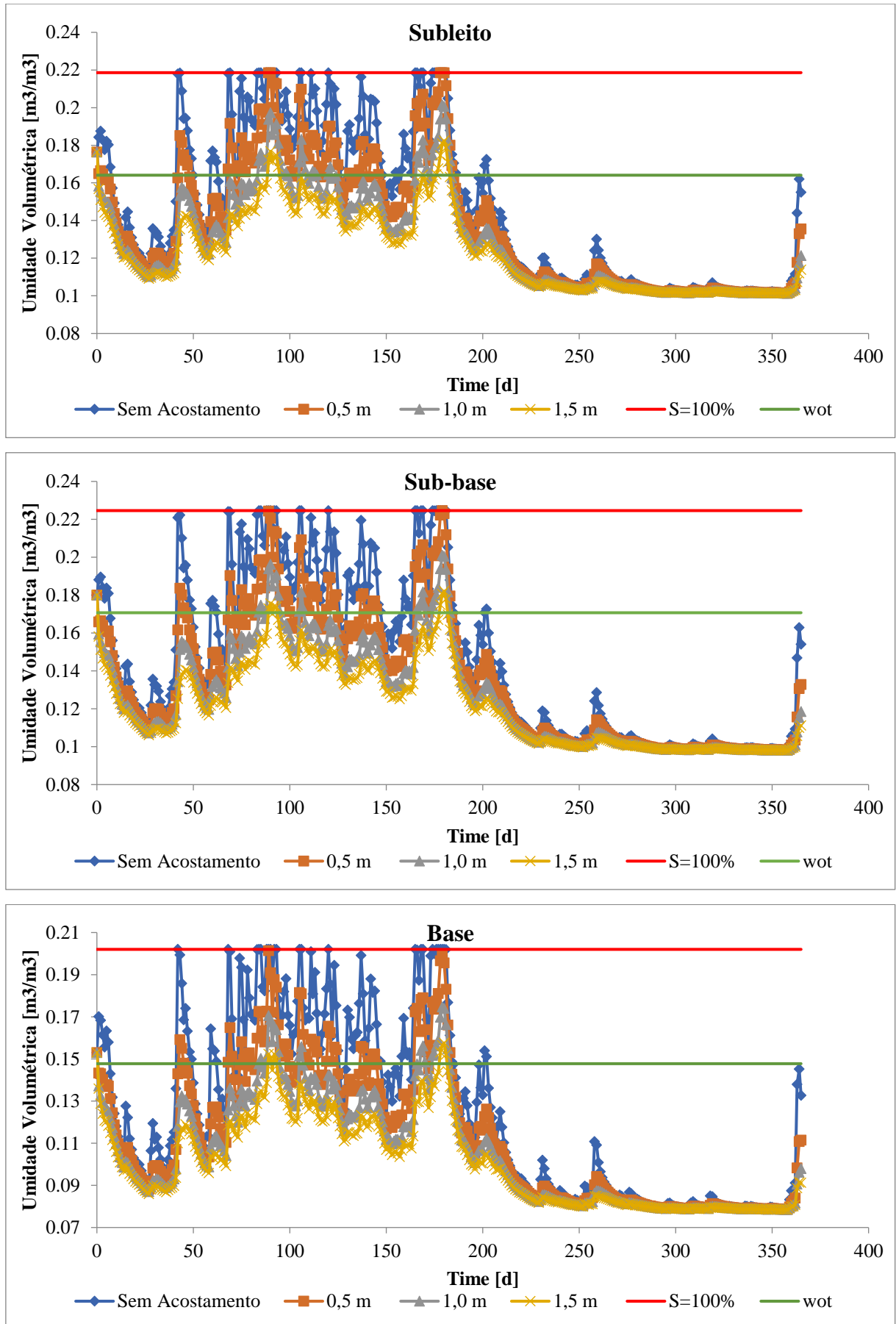


Figura D.5 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

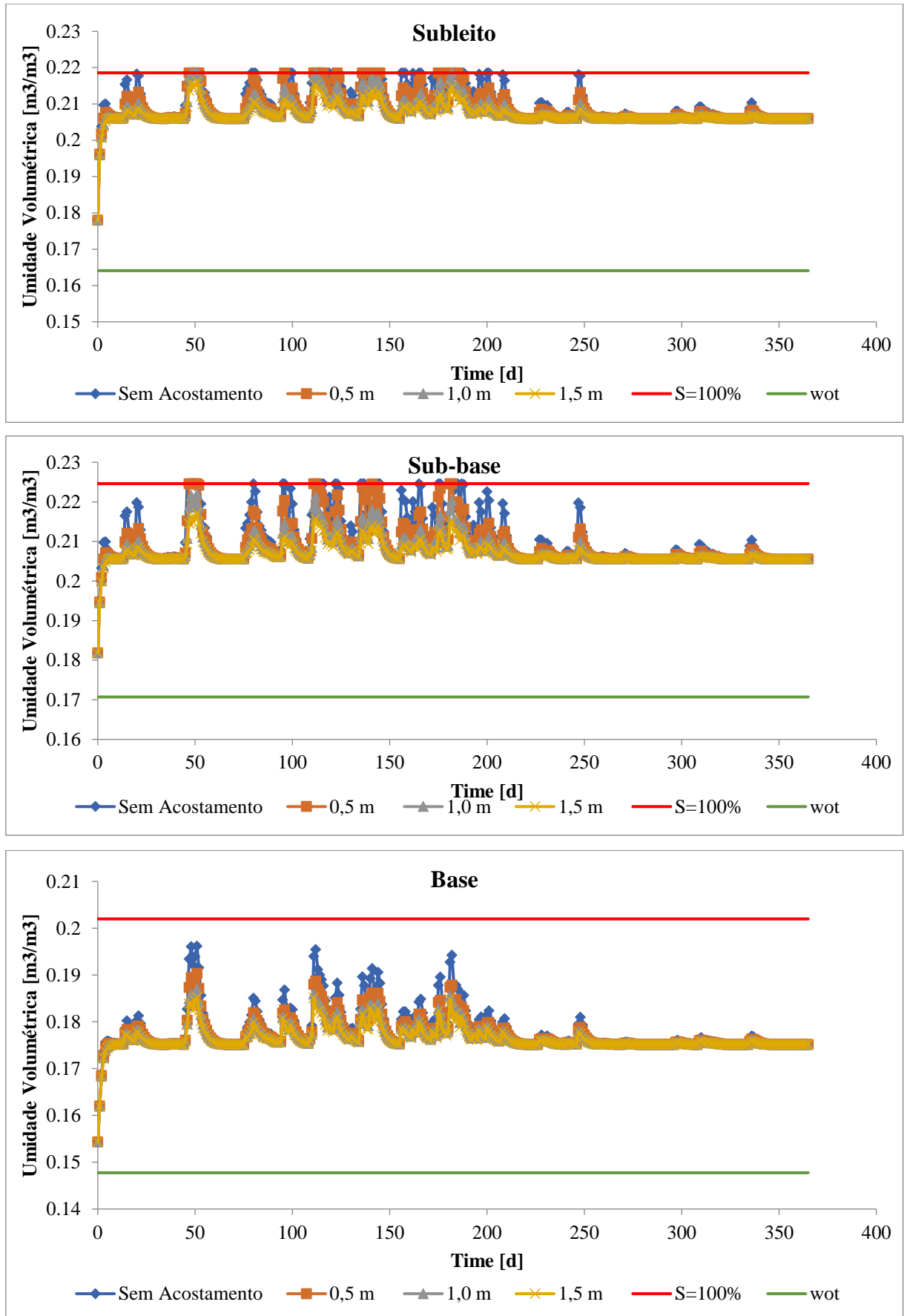


Figura D.6 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

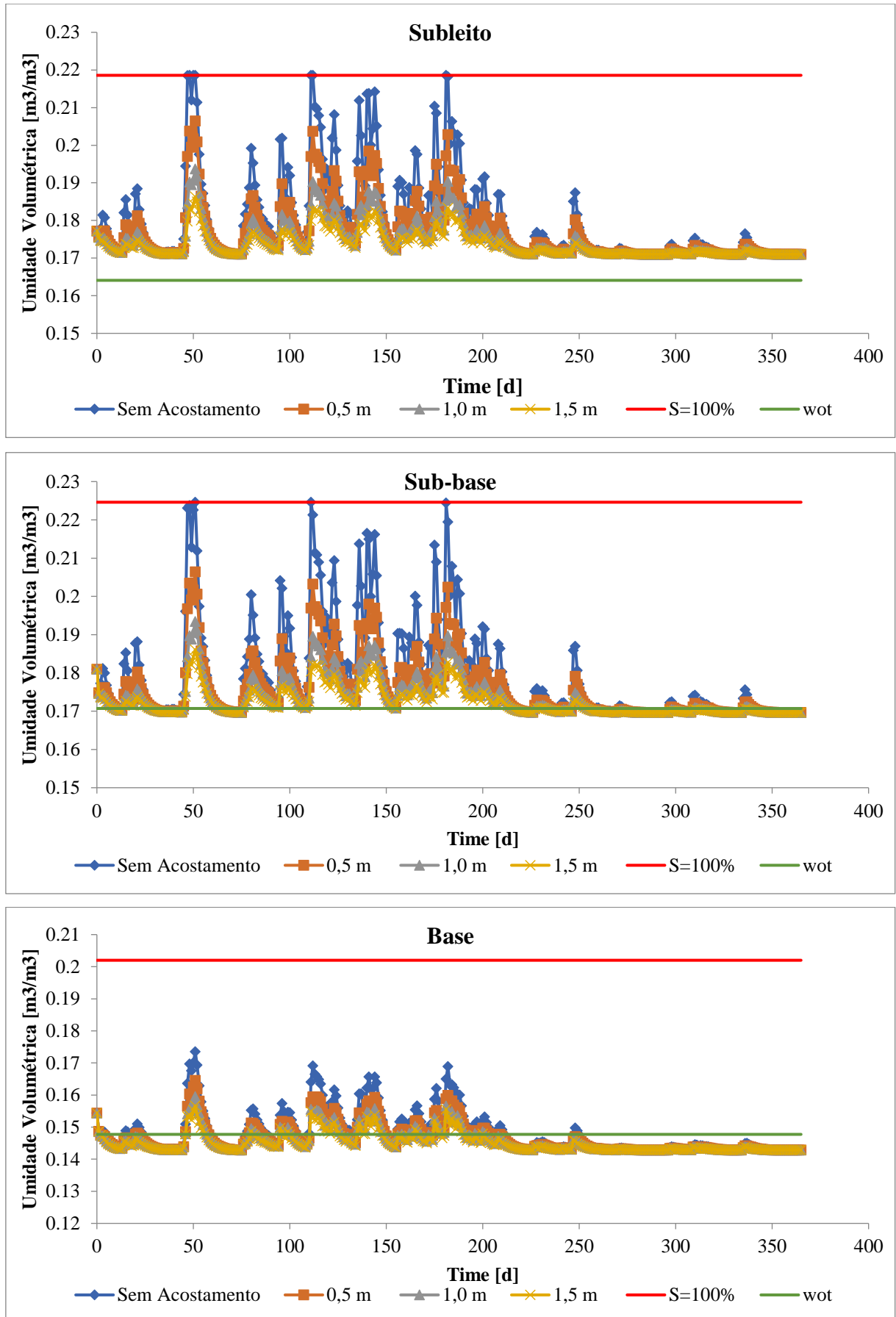


Figura D.7 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

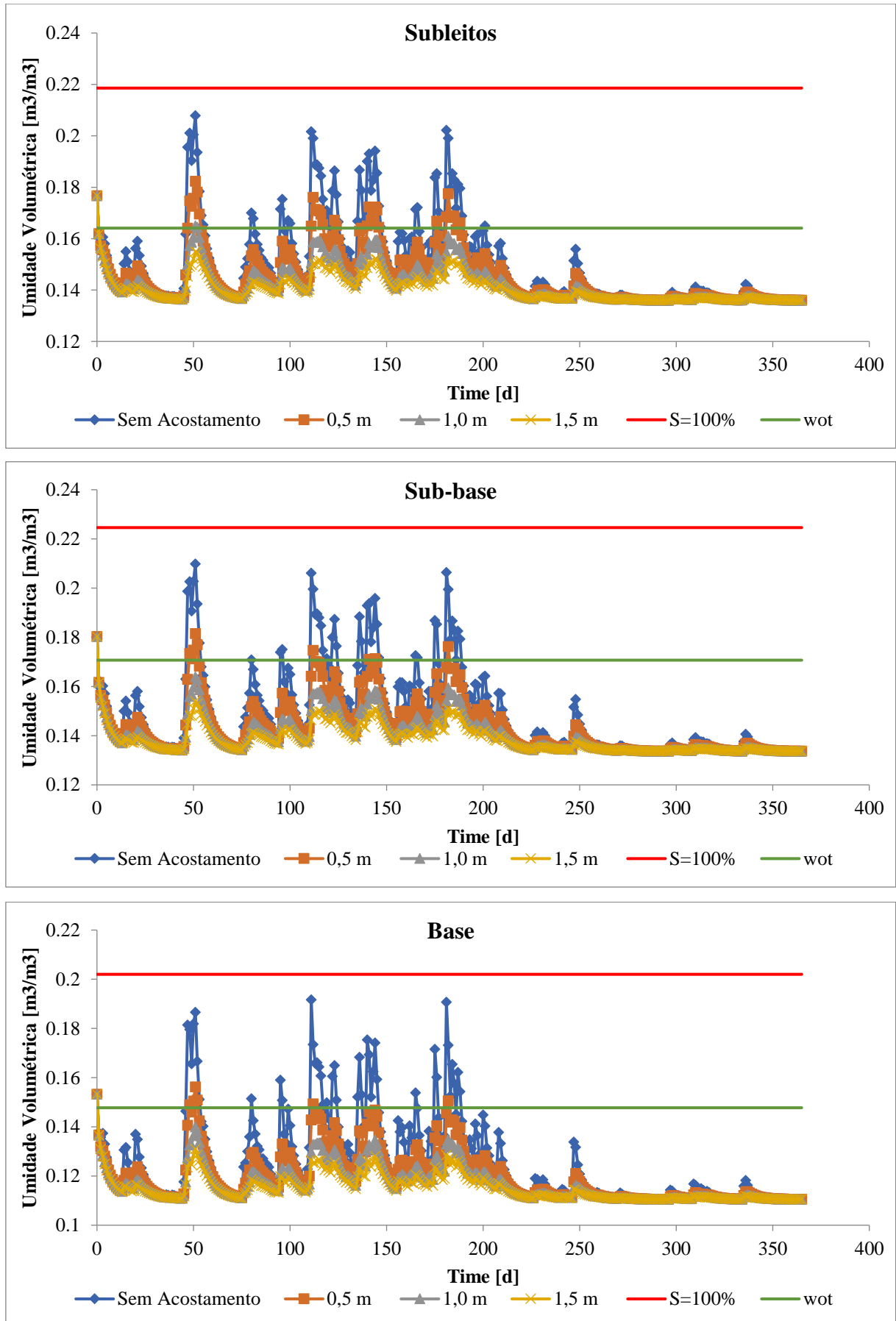


Figura D.8 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

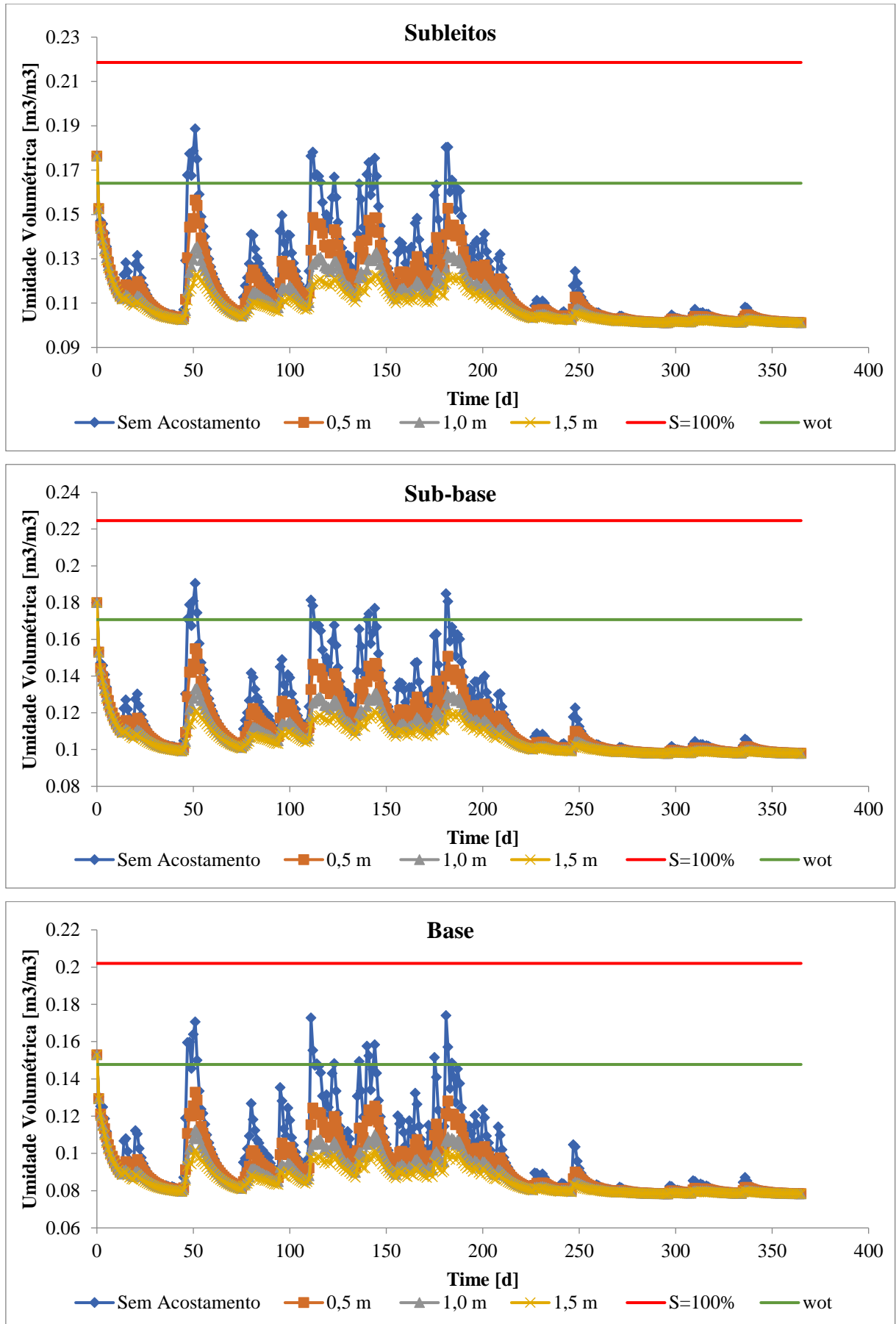


Figura D.9 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,0 m

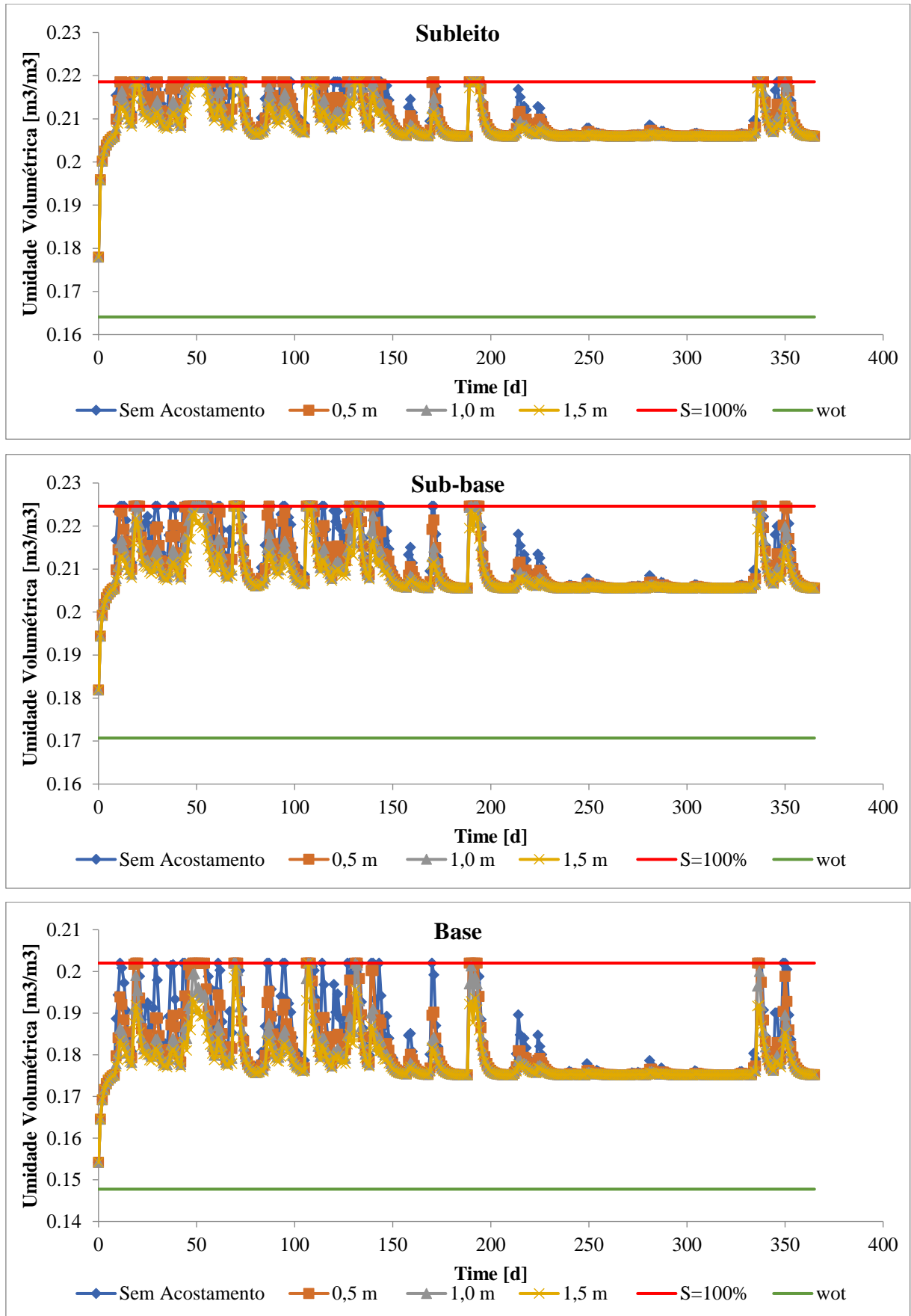


Figura D.10 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

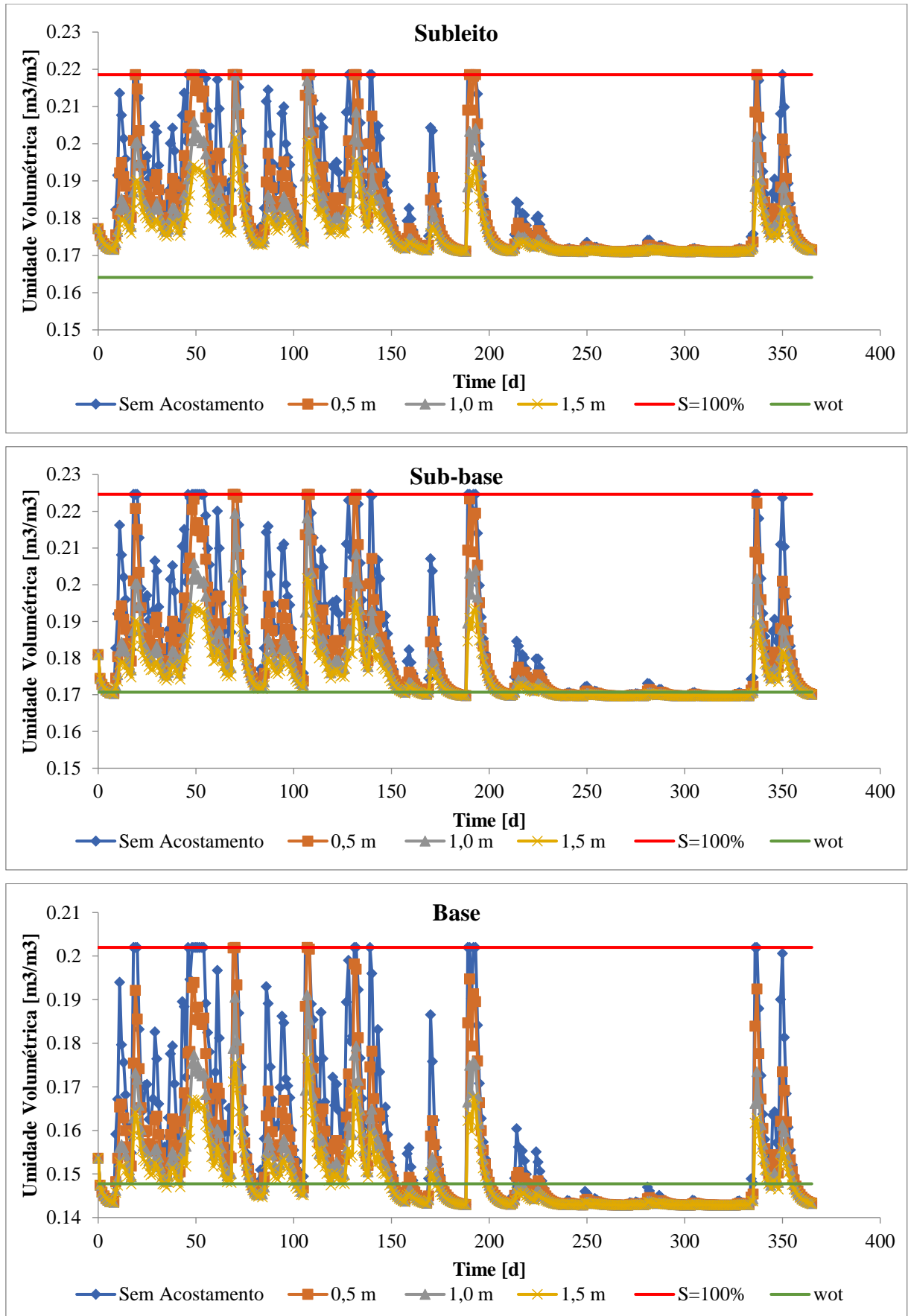


Figura D.11 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

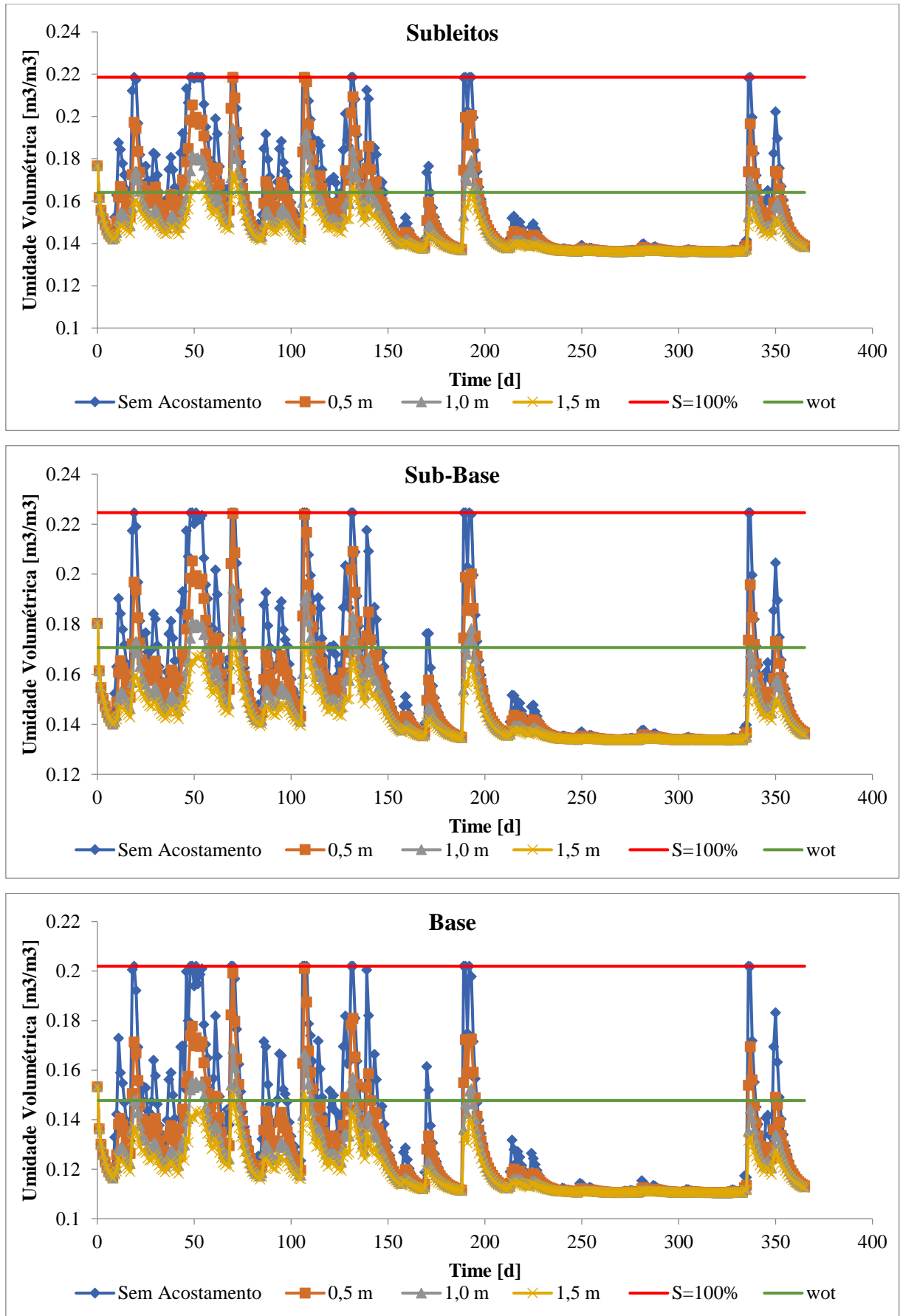
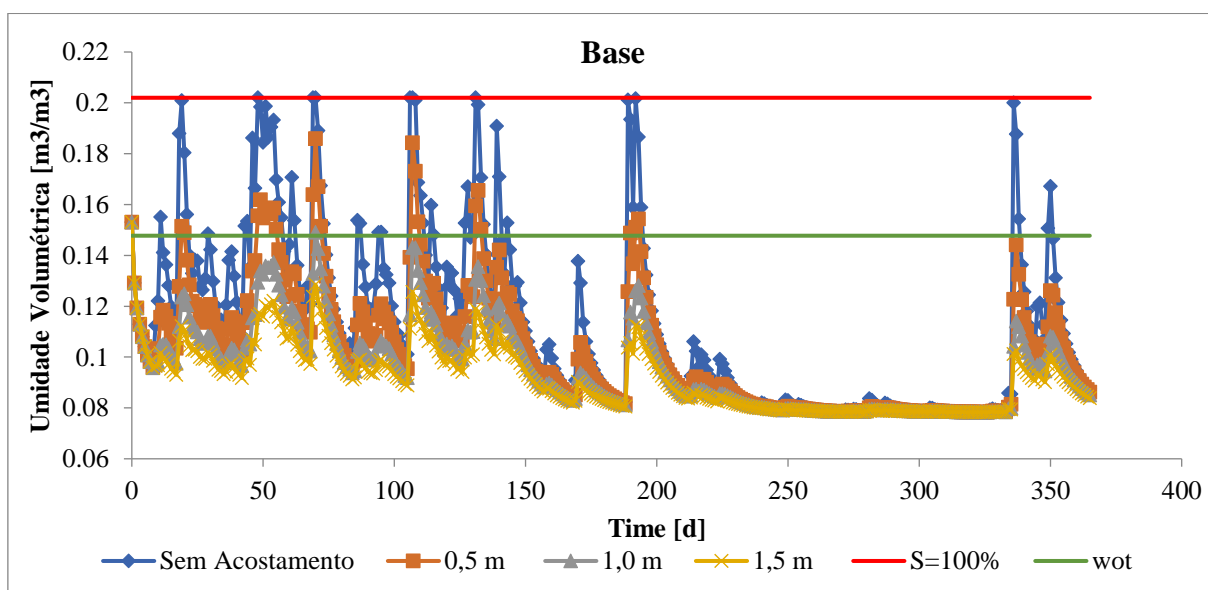
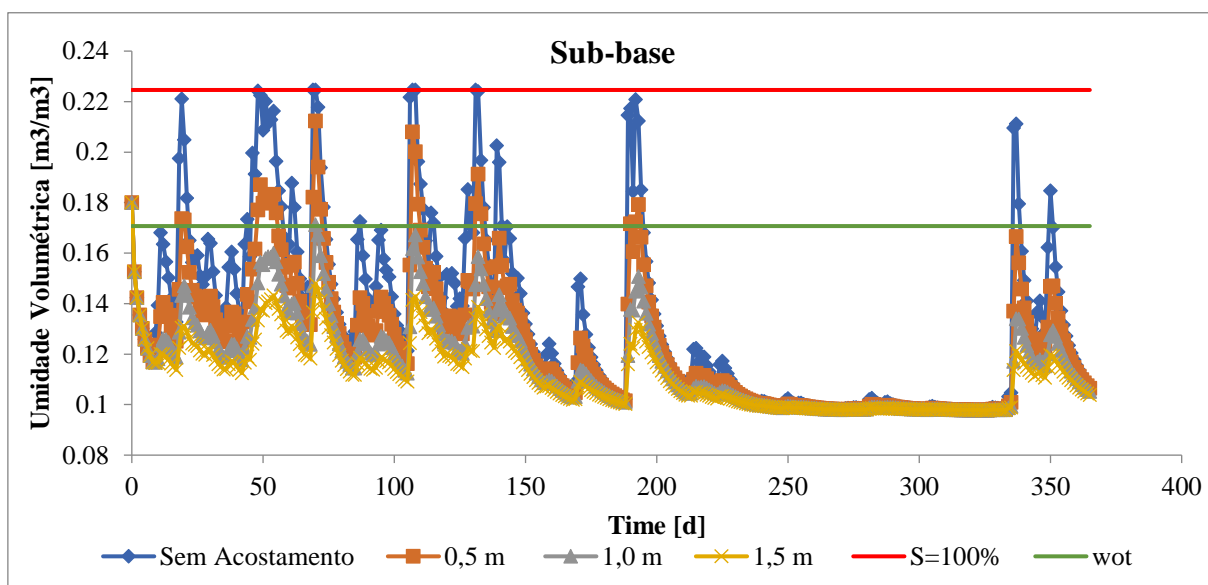
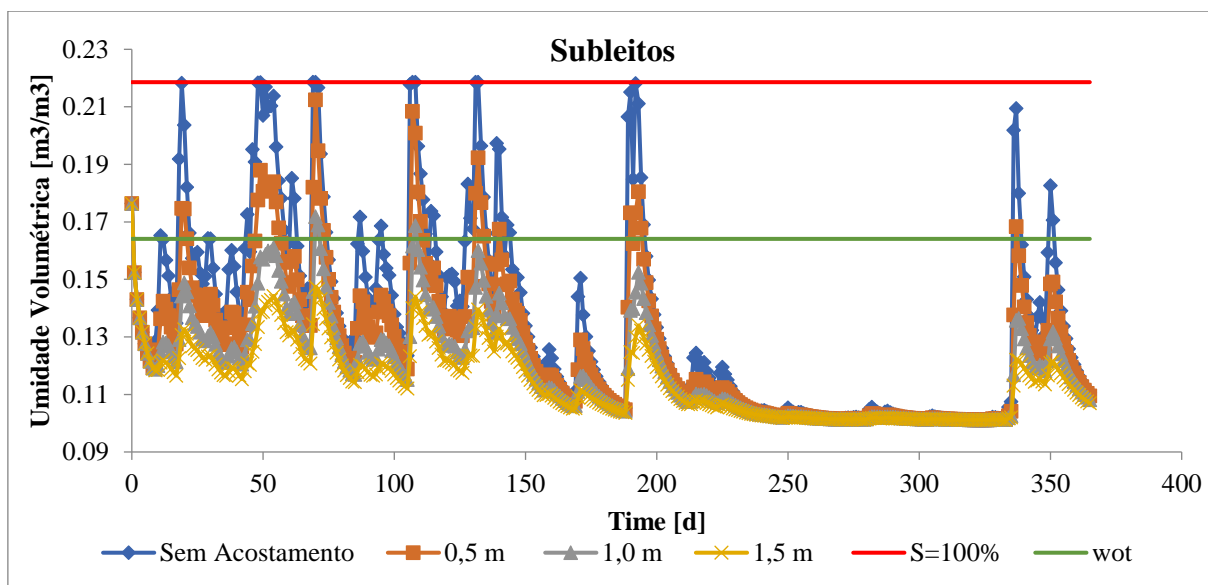


Figura D.12 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m



A.2. Revestimento 5 cm

Figura D.13 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,0 m

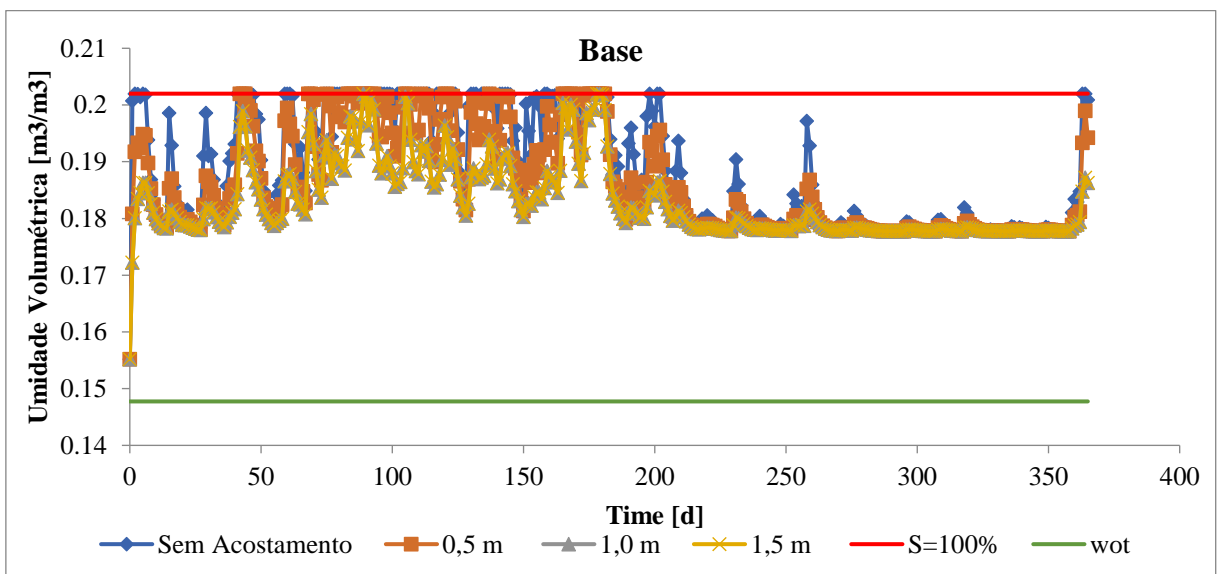
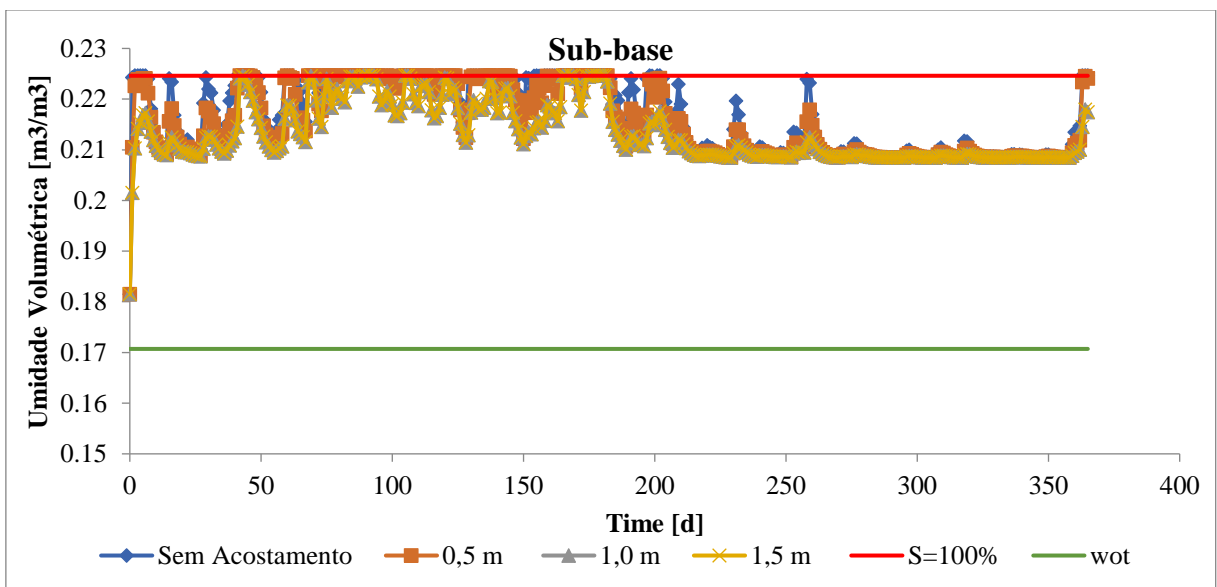
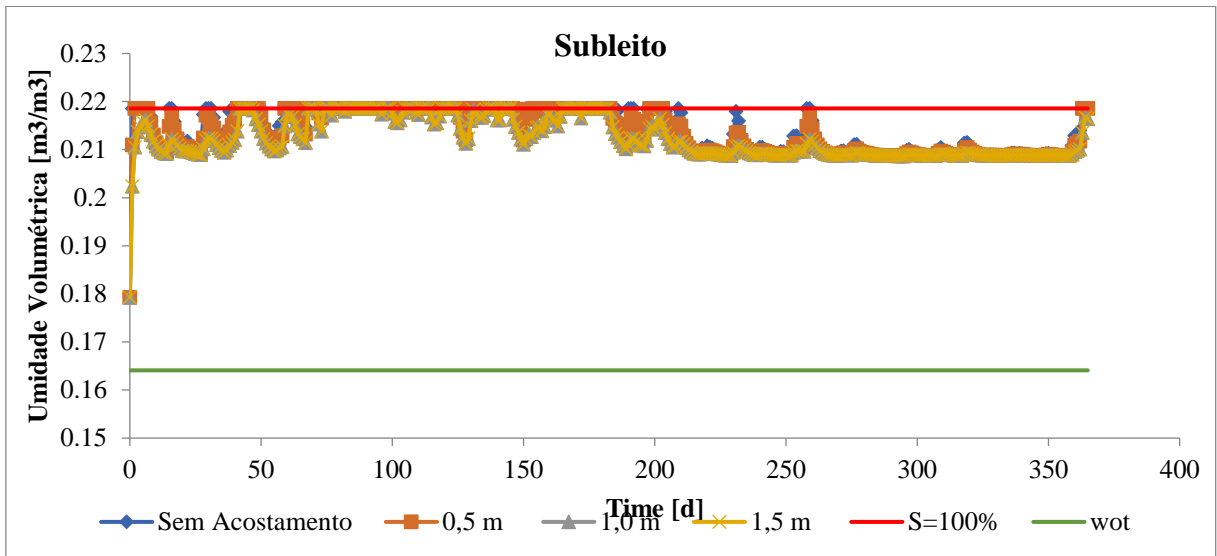


Figura D.14 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

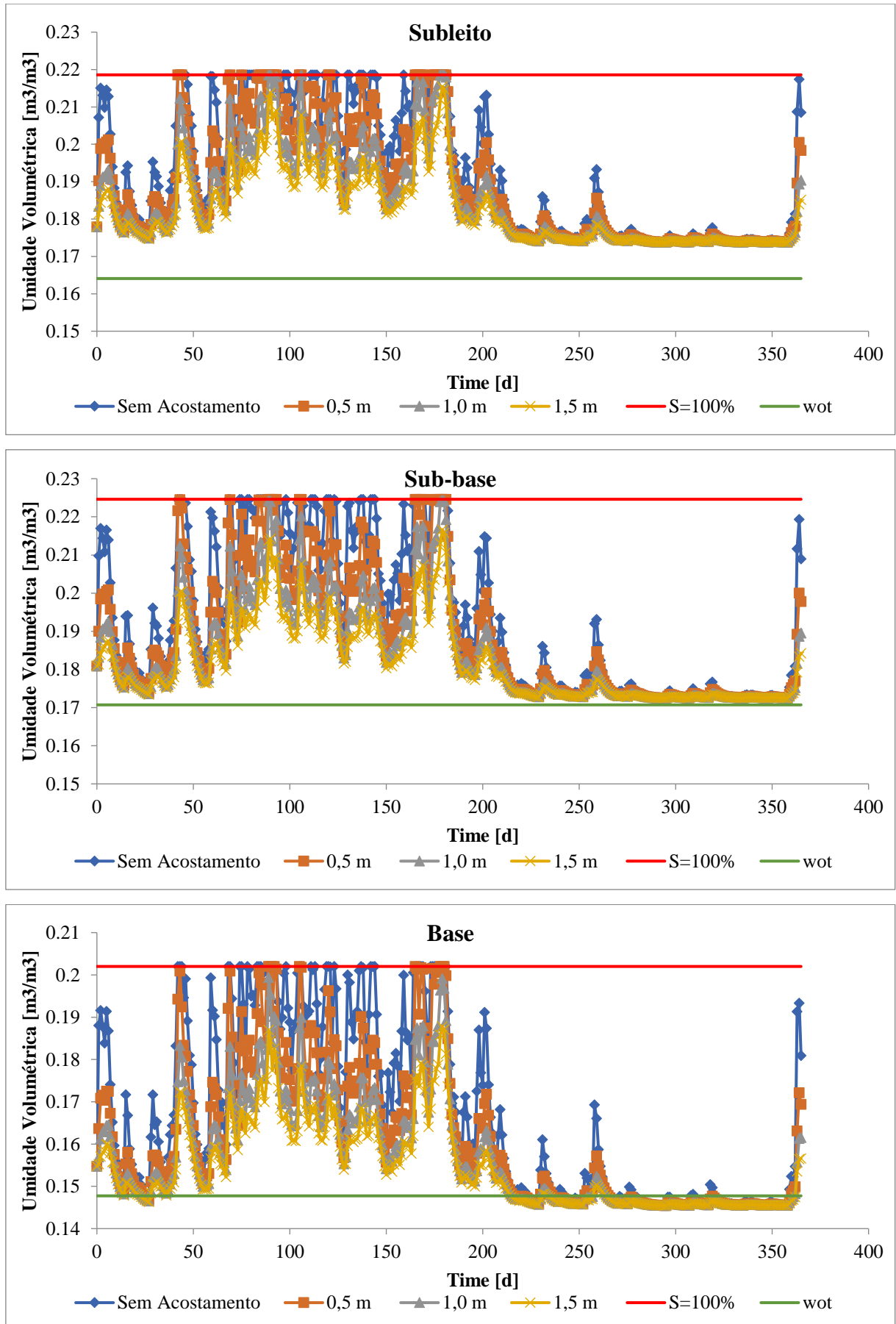


Figura D.15 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

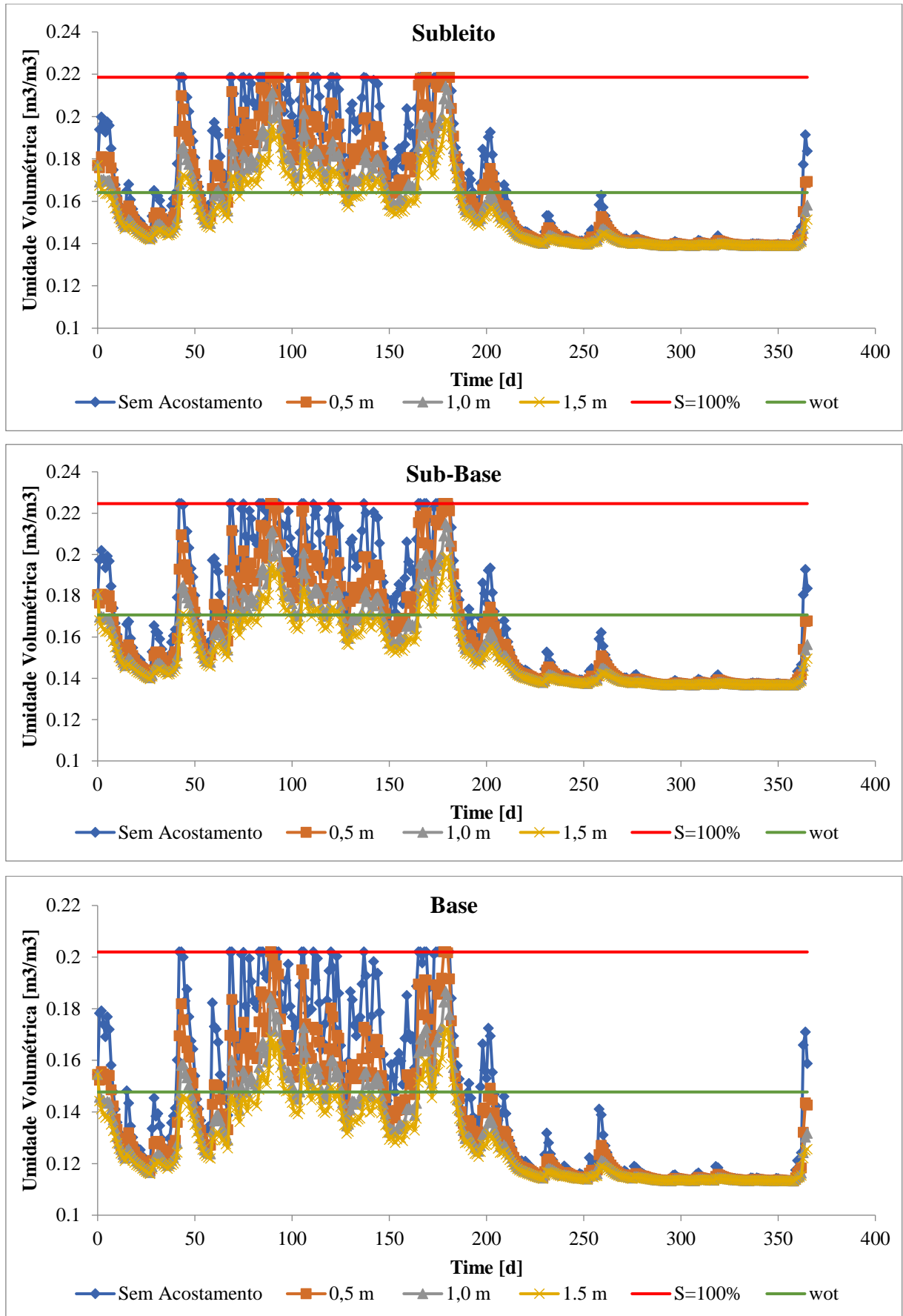


Figura D.16 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

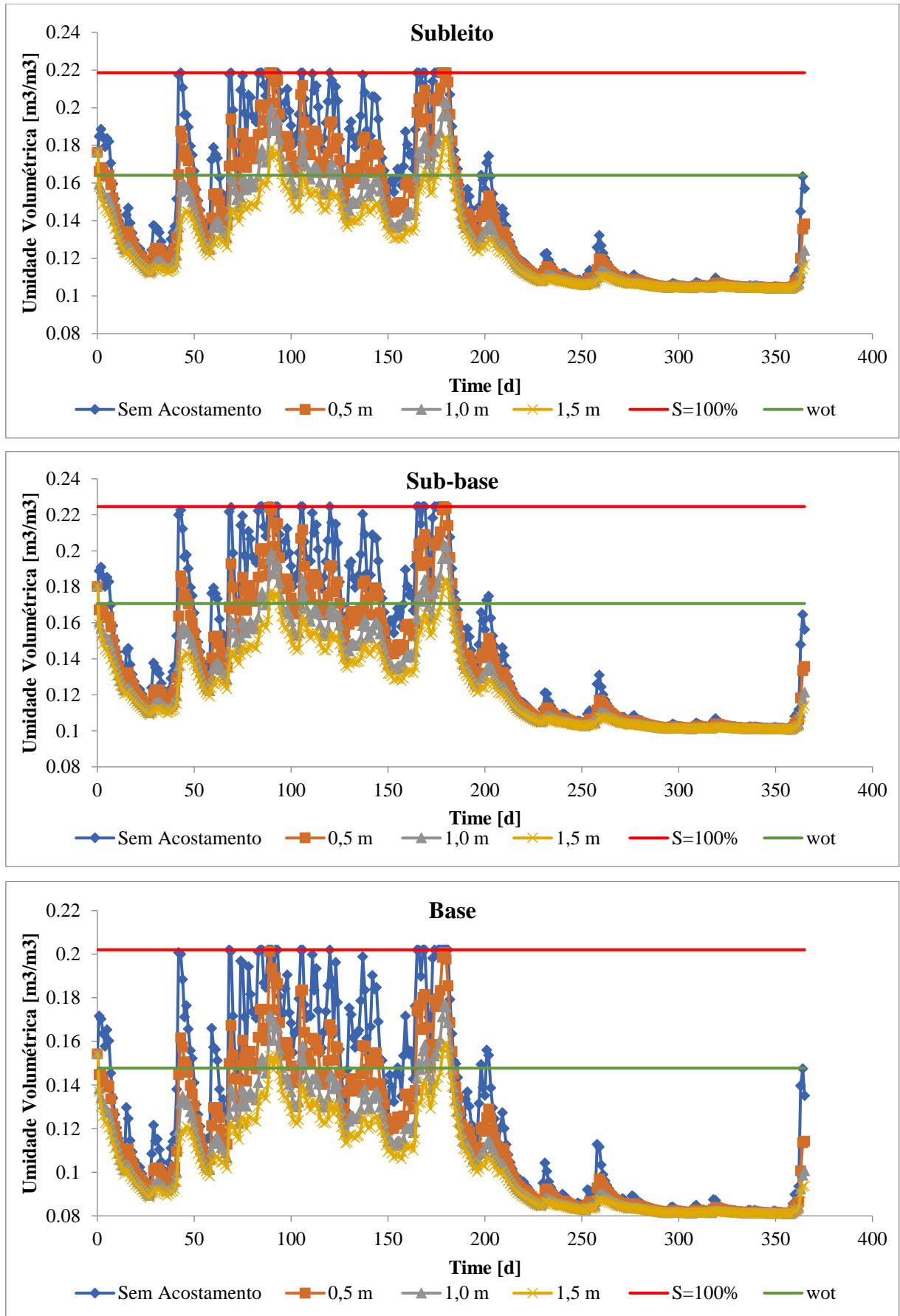


Figura D.17 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

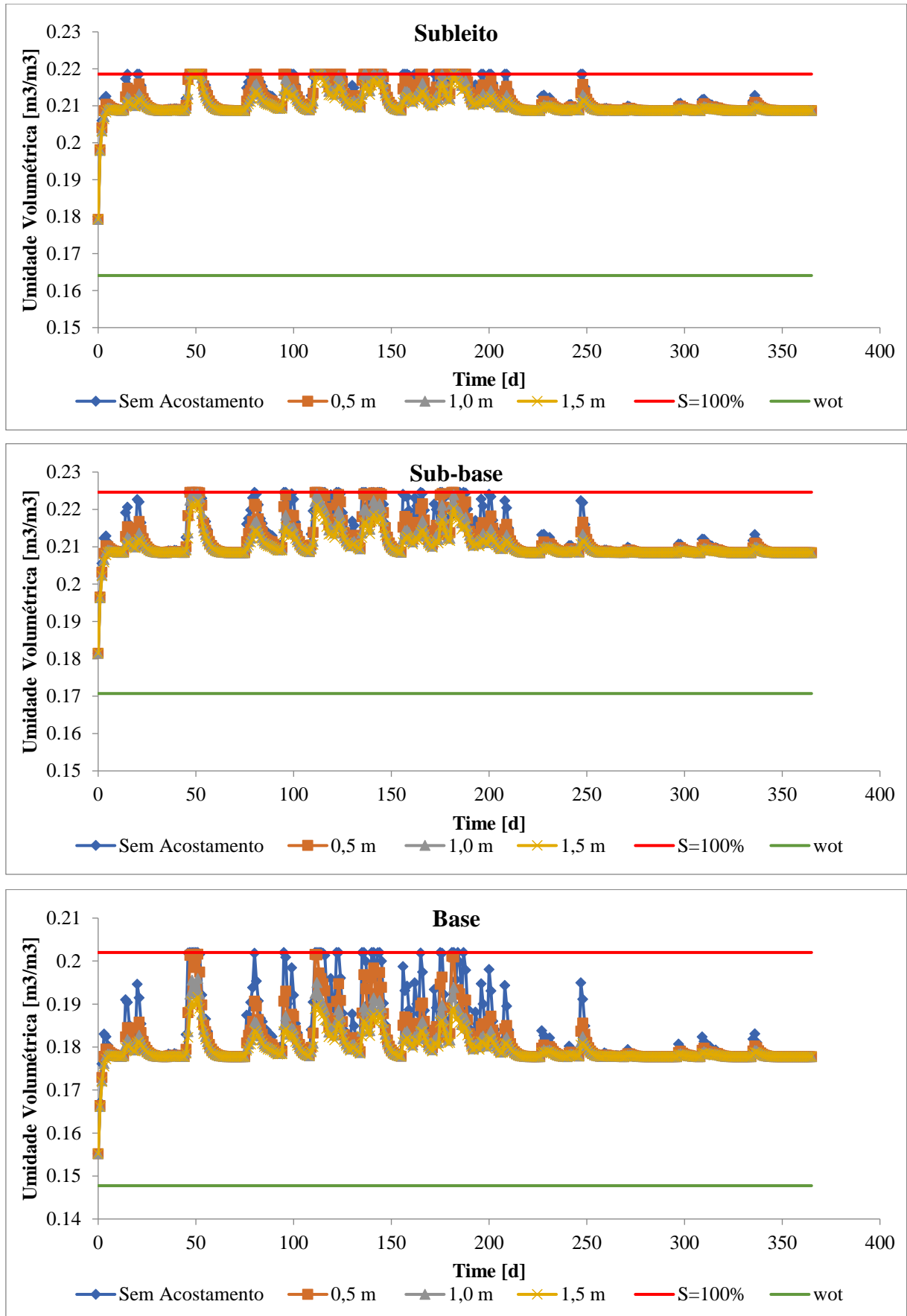


Figura D.18 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

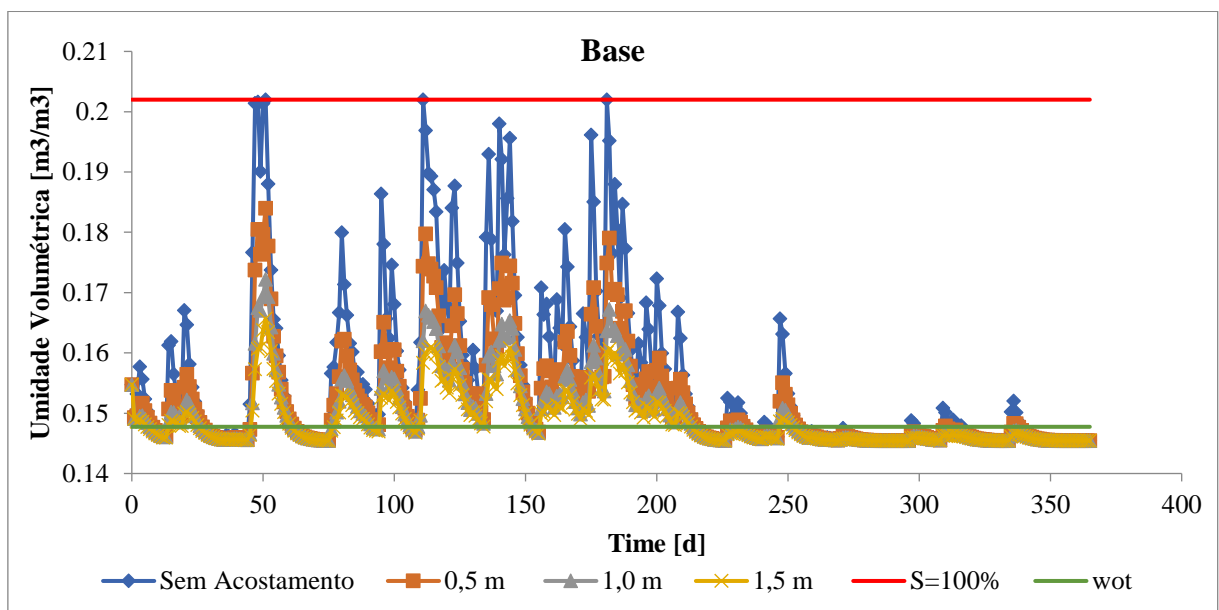
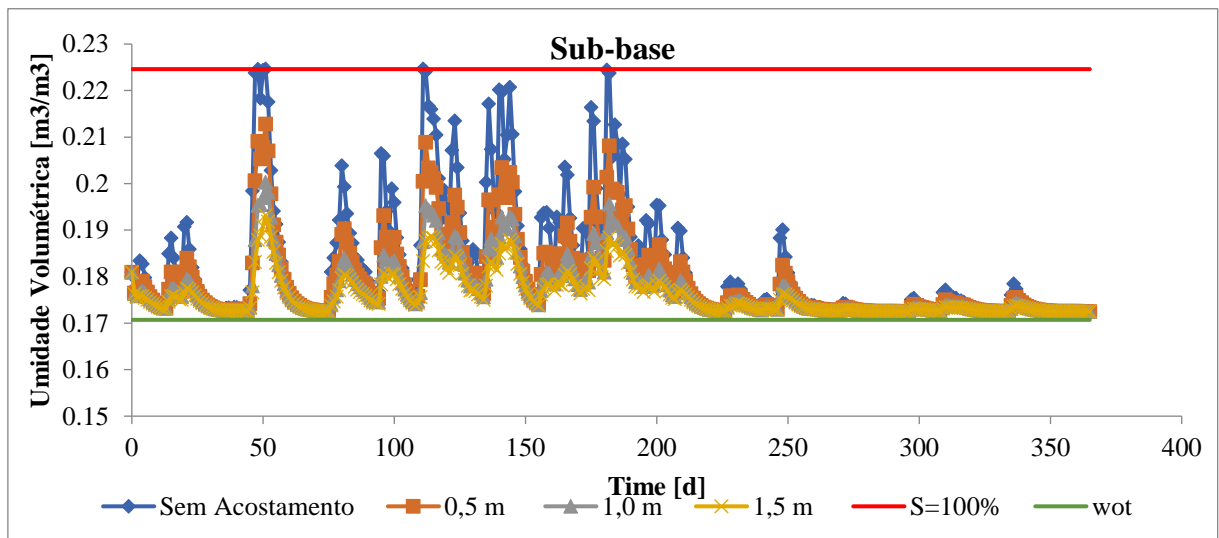
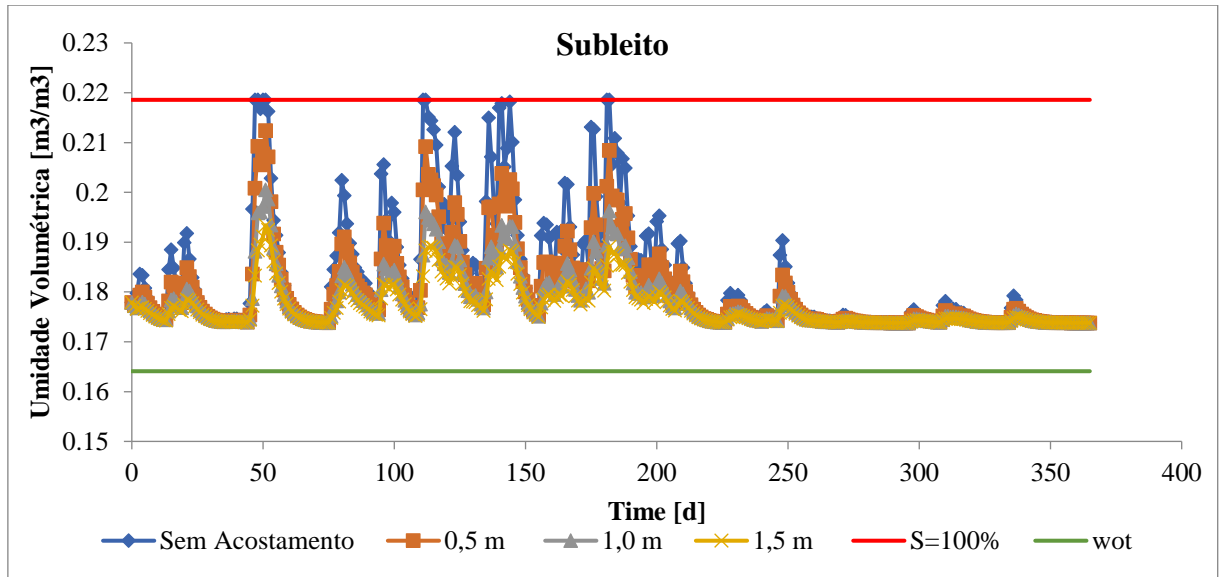


Figura D.19 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

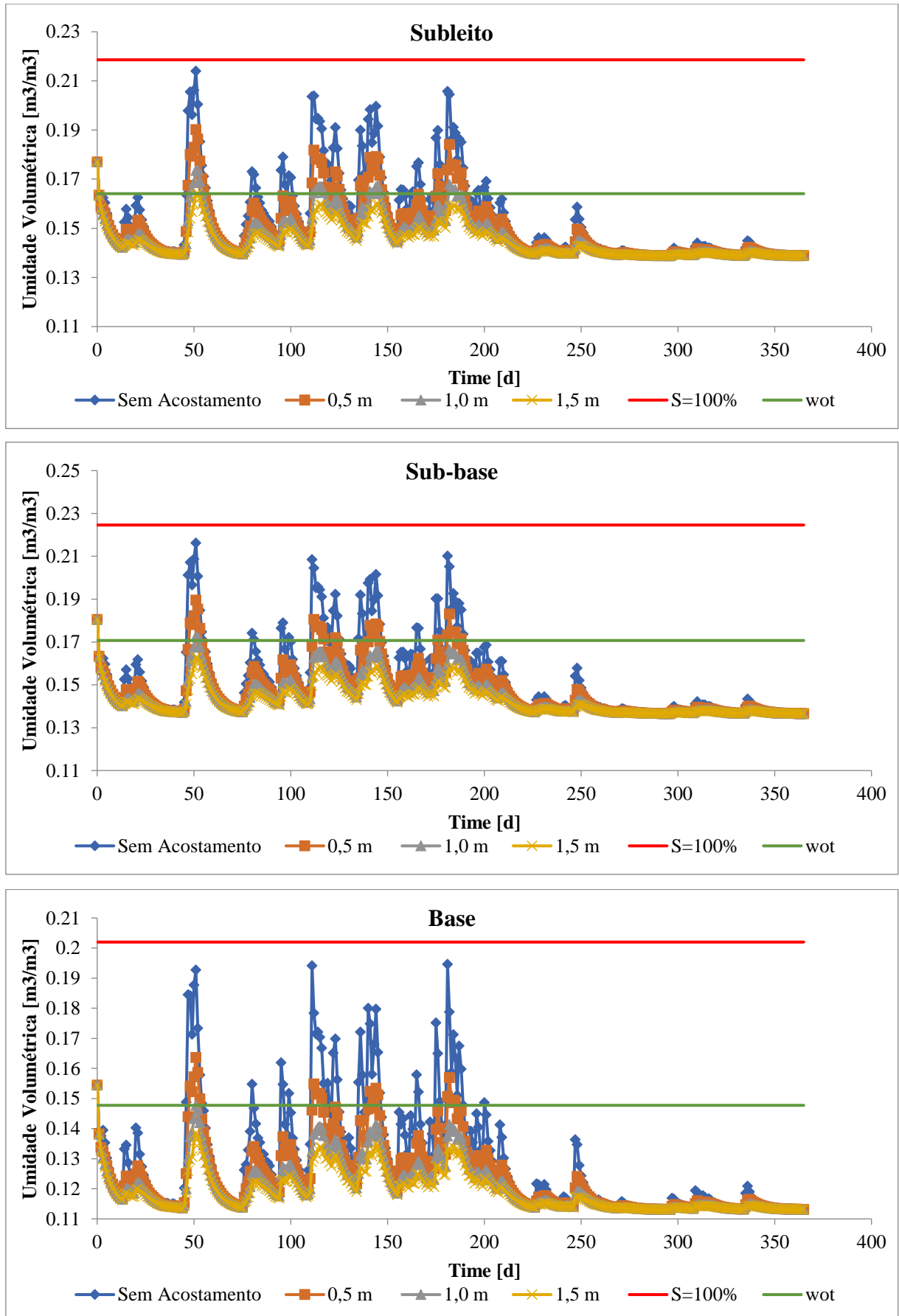


Figura D.20 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

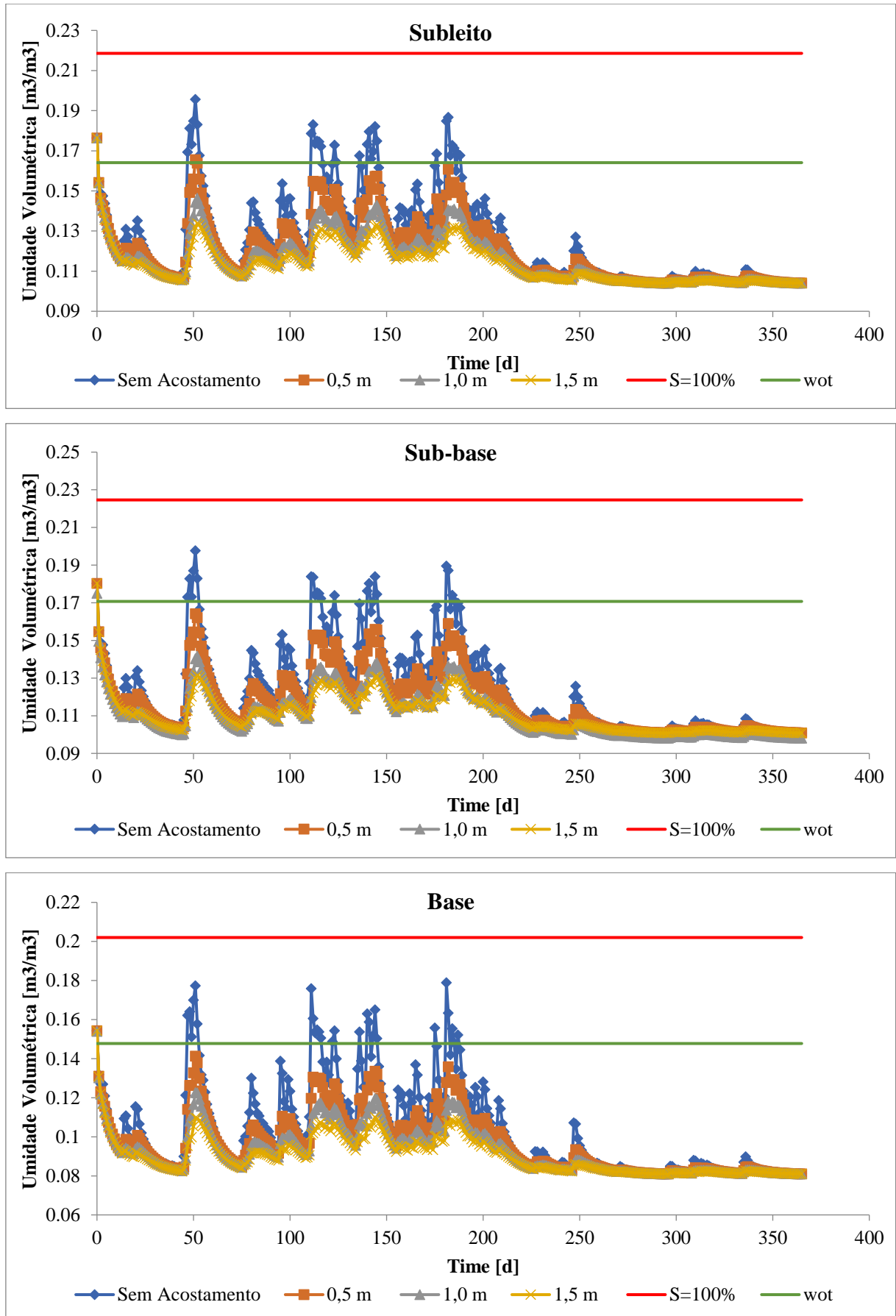


Figura D.21 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,0 m

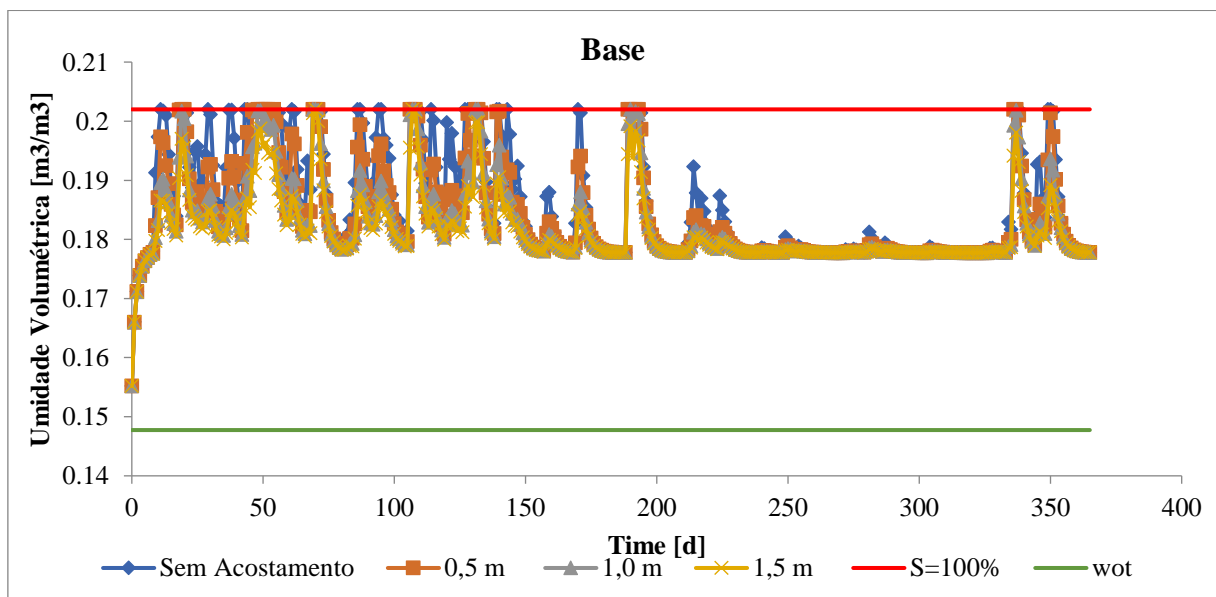
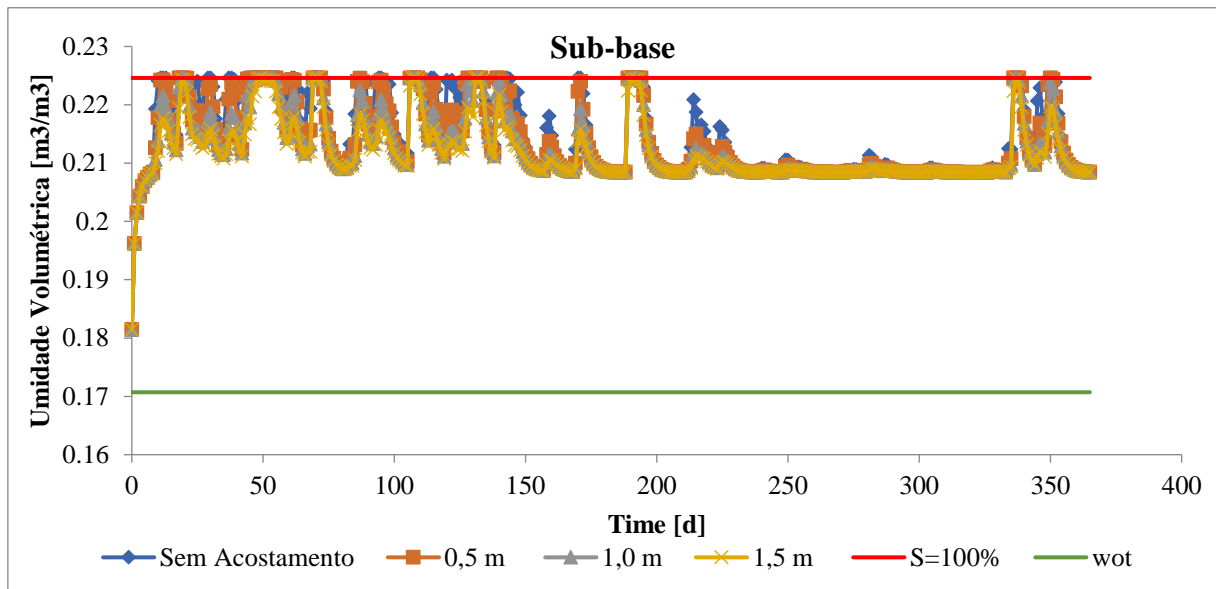
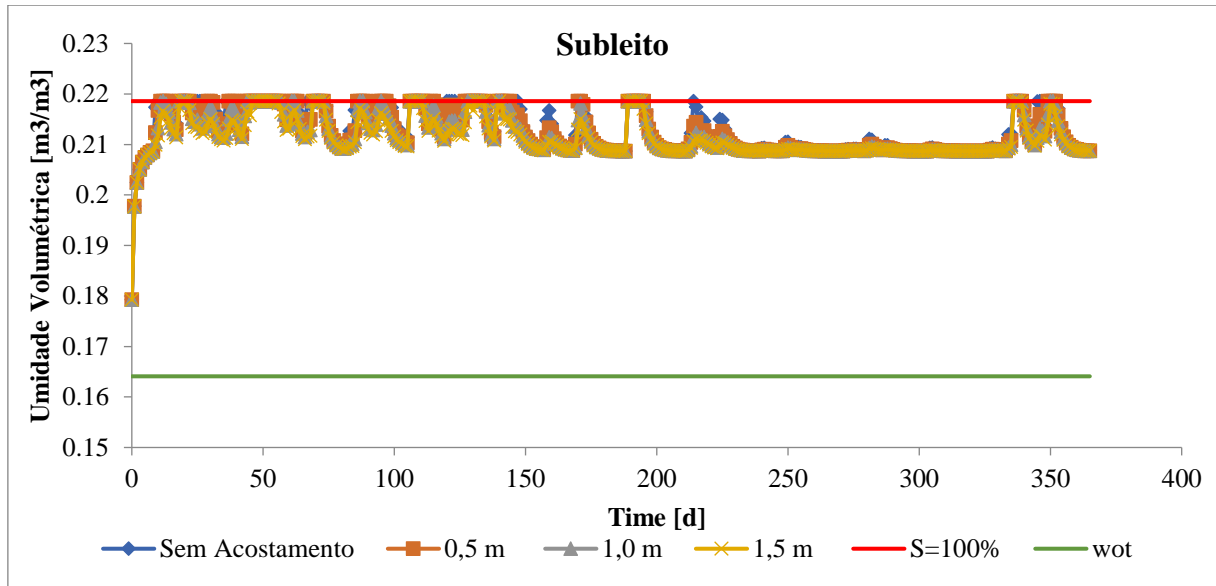


Figura D.22 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

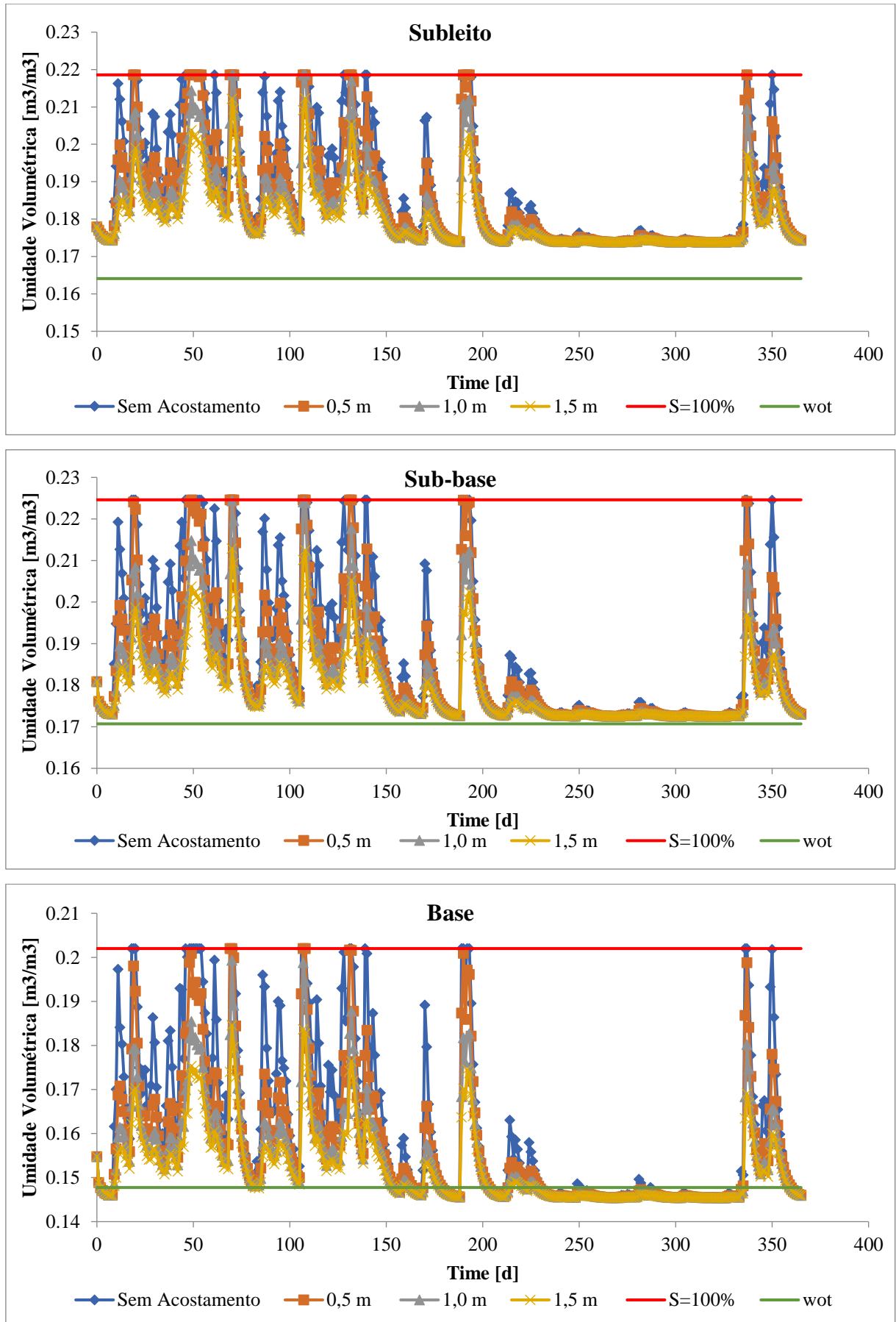


Figura D.23 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

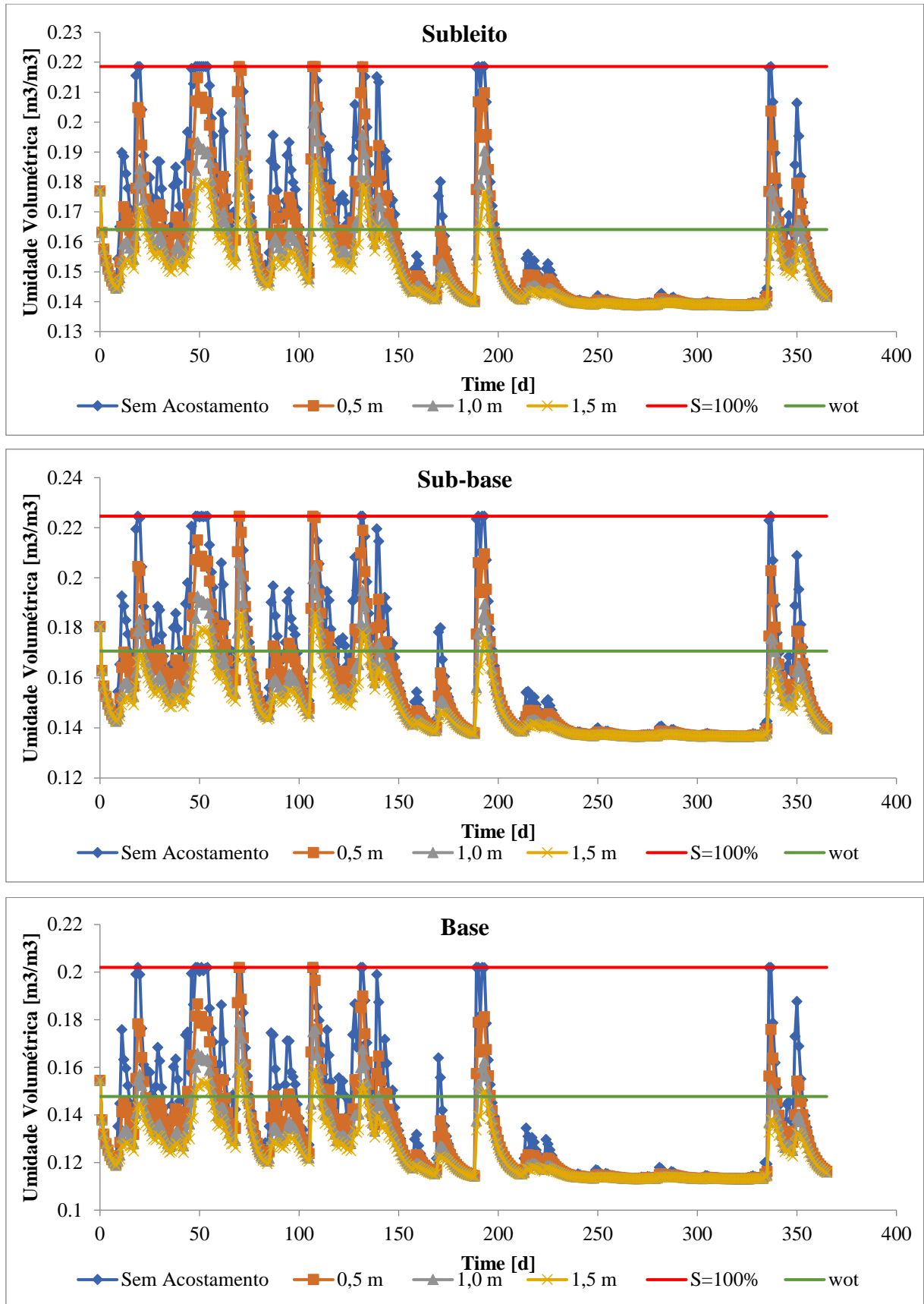
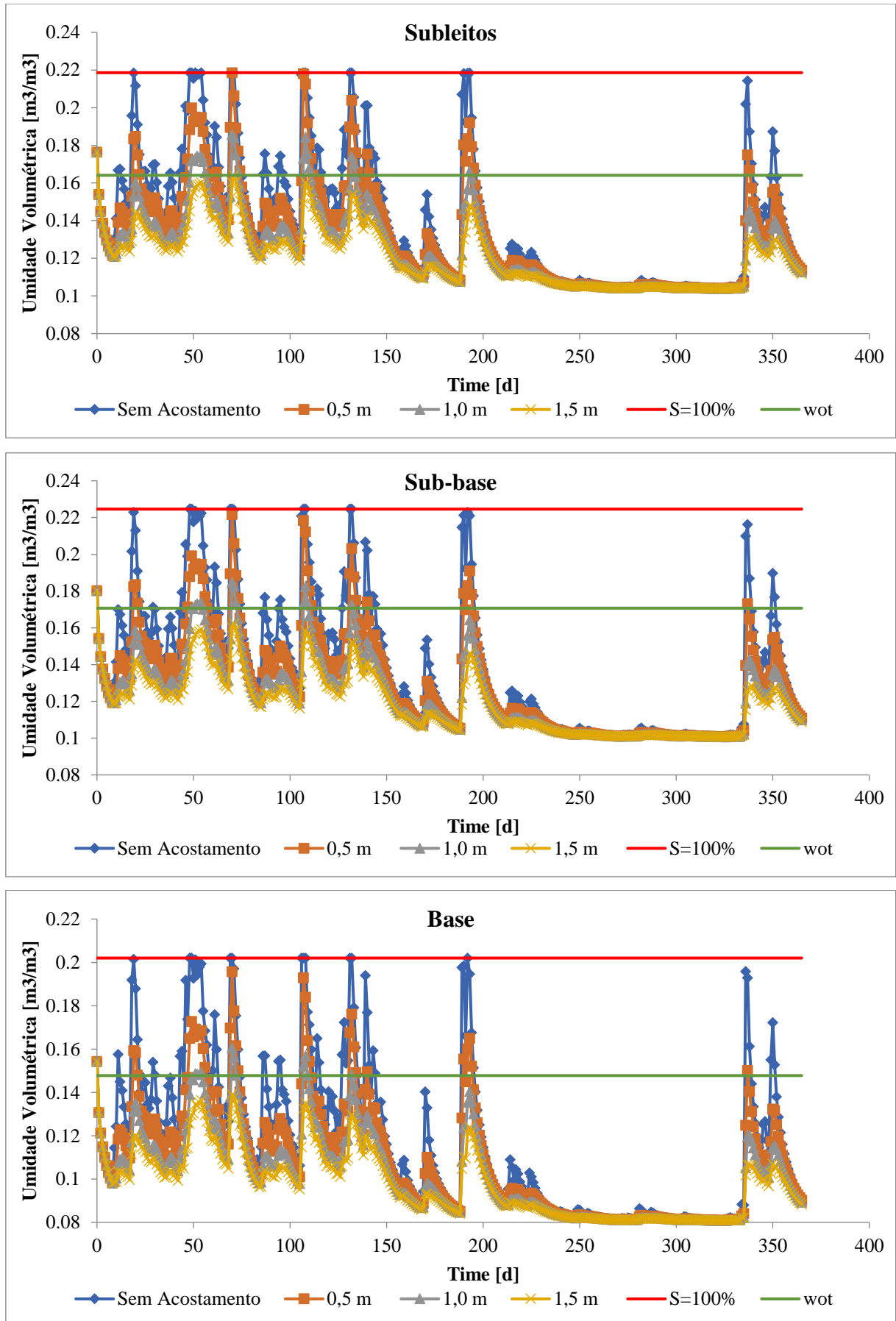


Figura D.24 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m



A.3. Revestimento 2 cm

Figura D.25 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,0 m

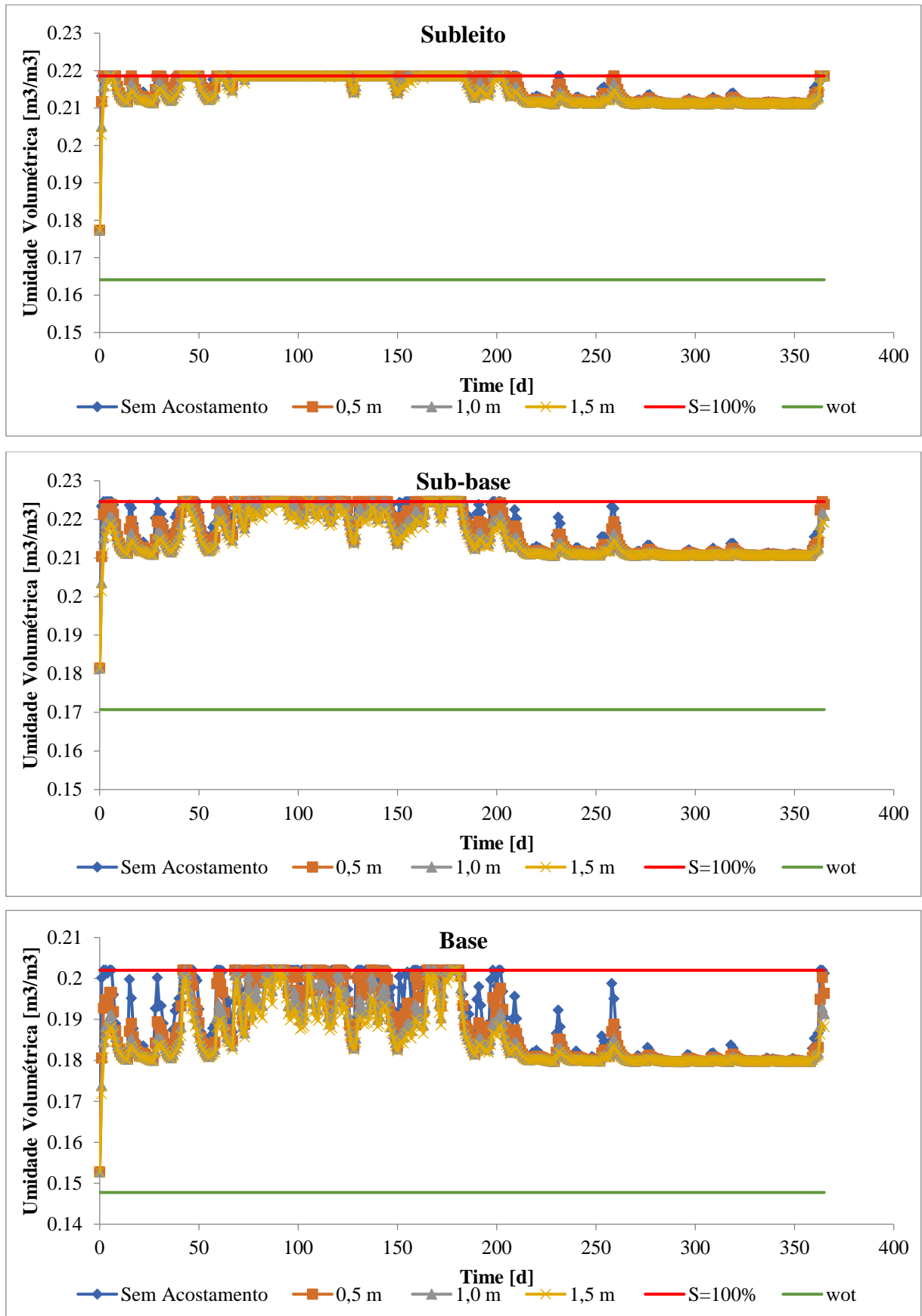


Figura D.26 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

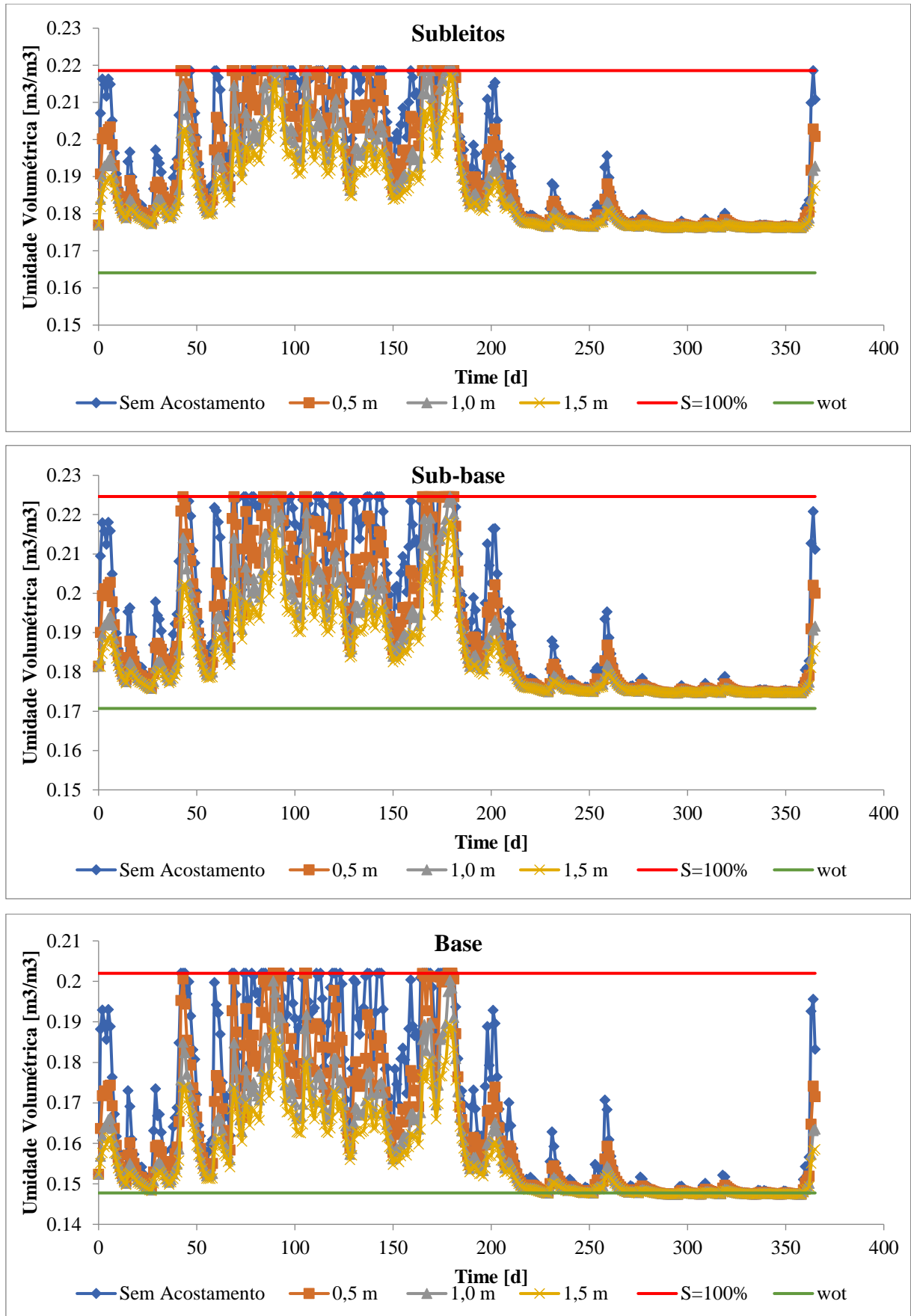


Figura D.27 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

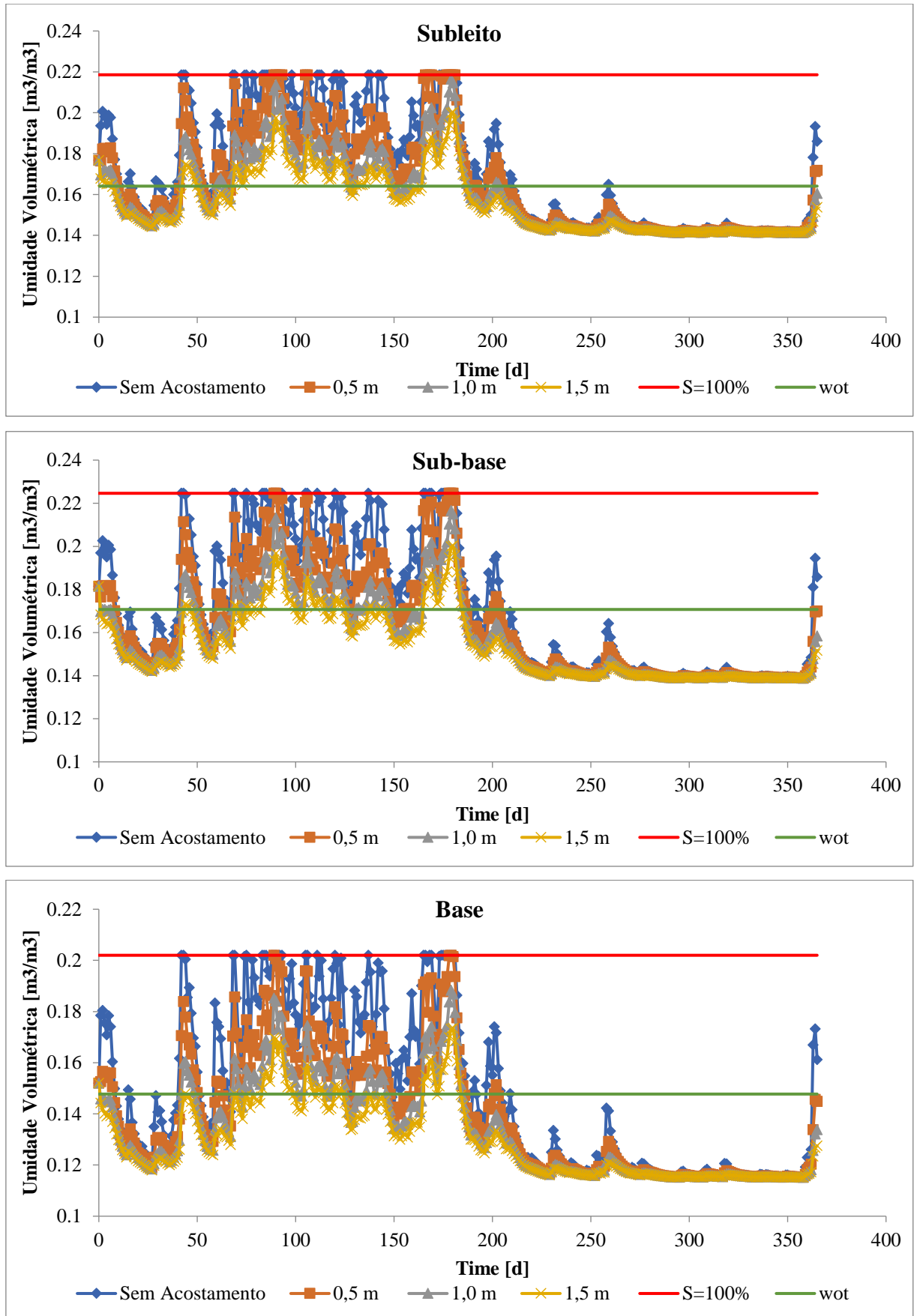


Figura D.28 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

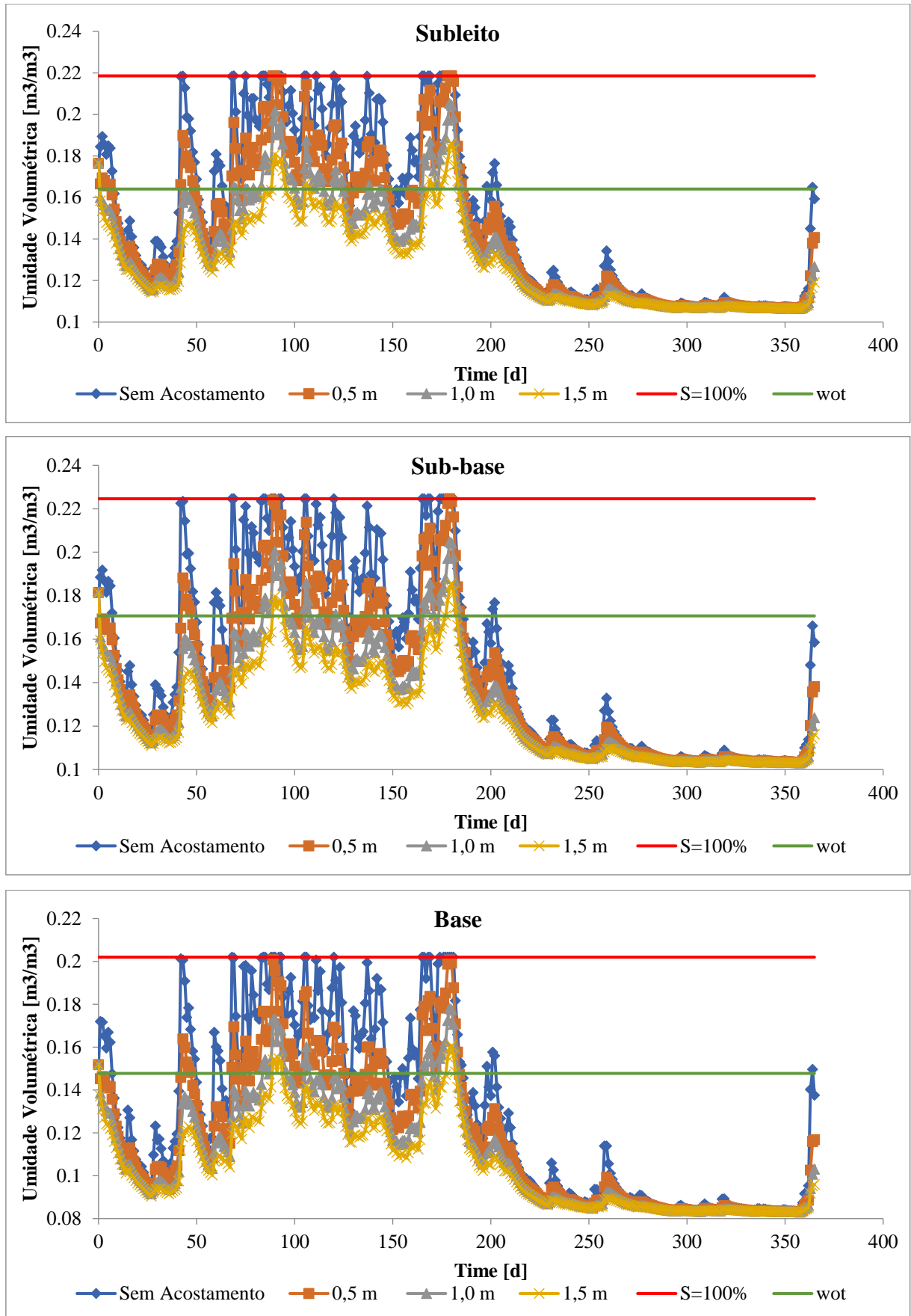


Figura D.29 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

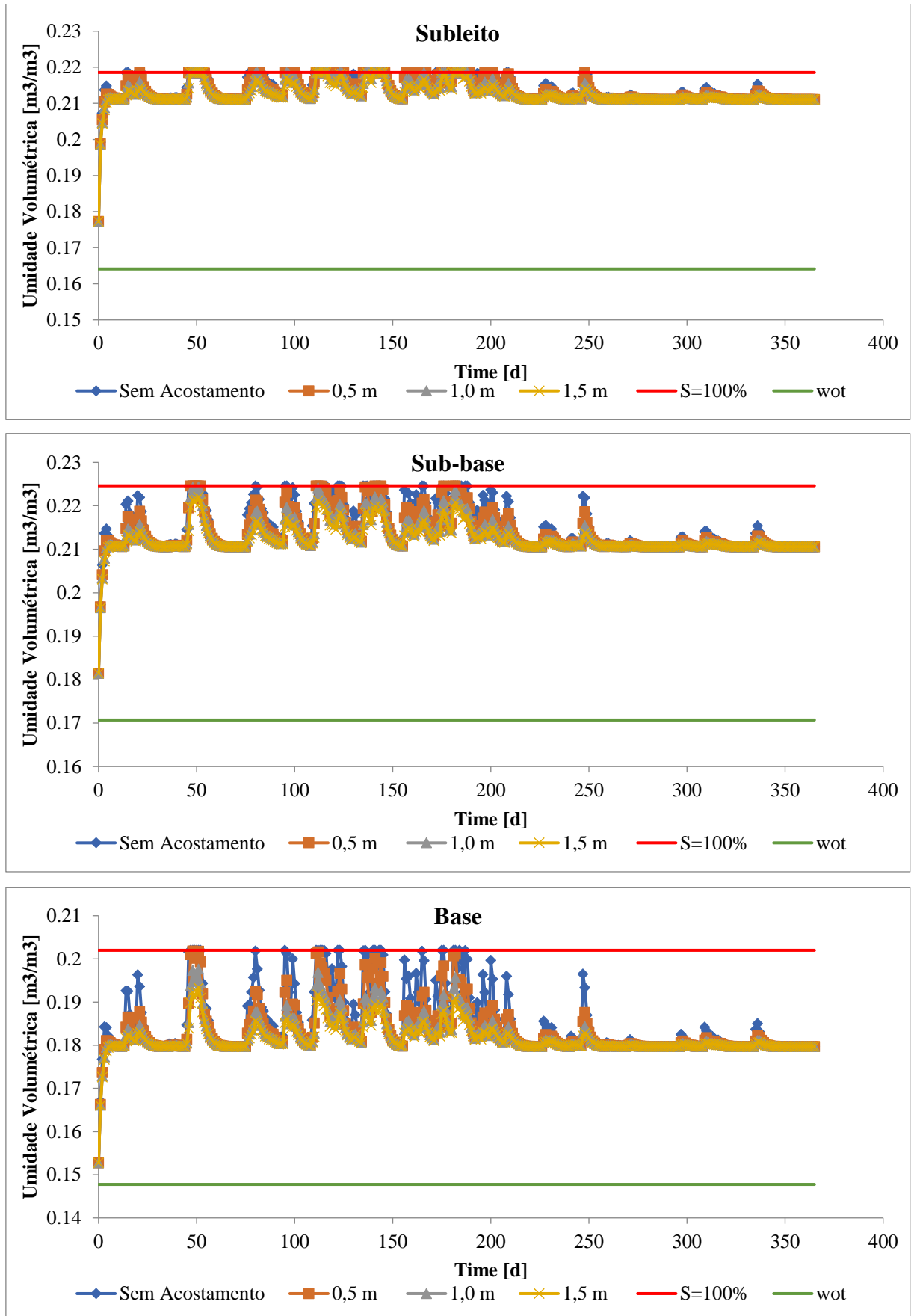


Figura D.30 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

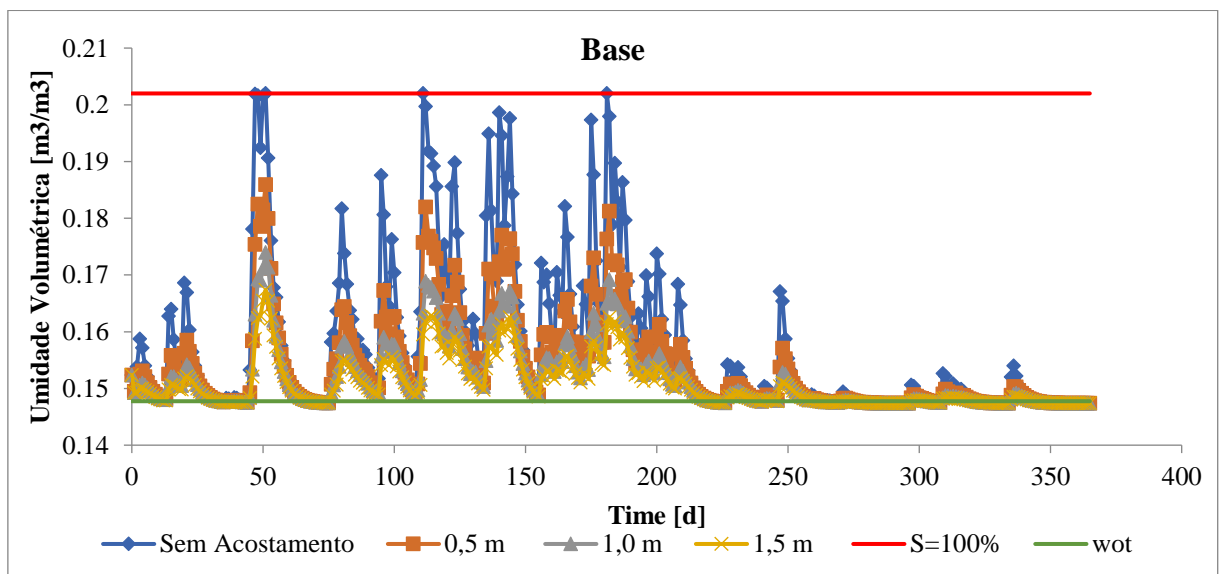
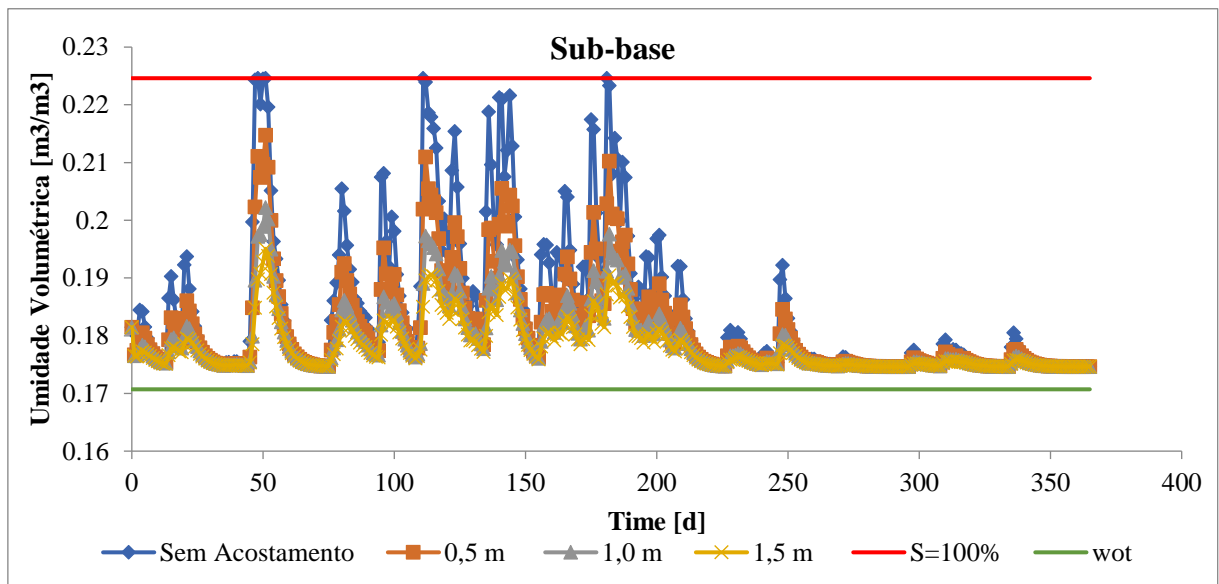
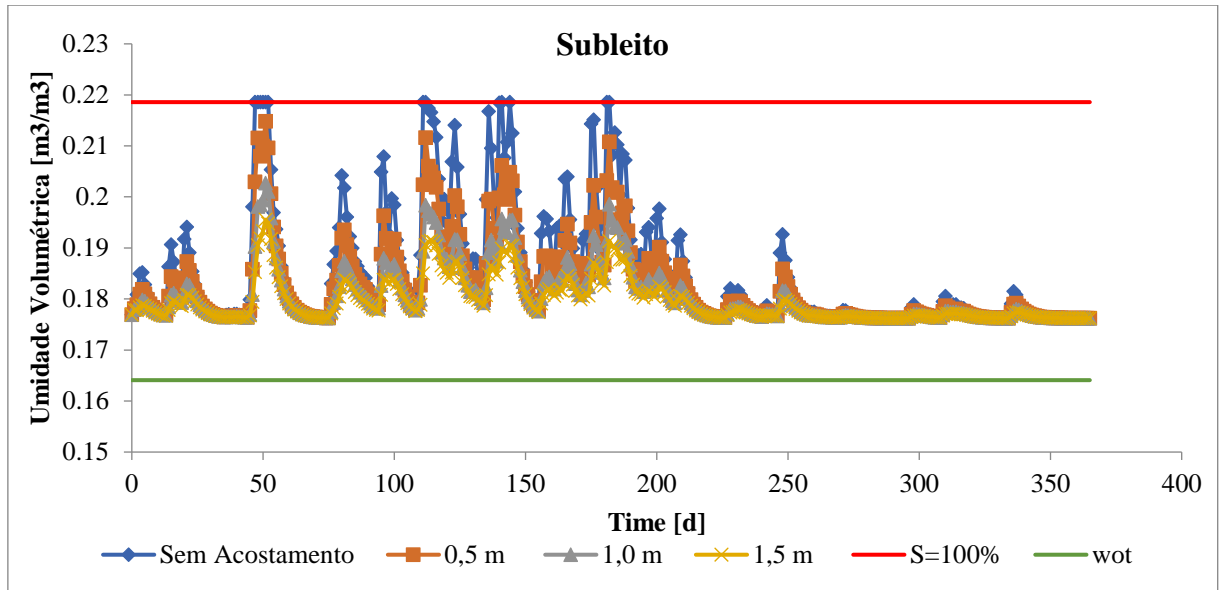


Figura D.31 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

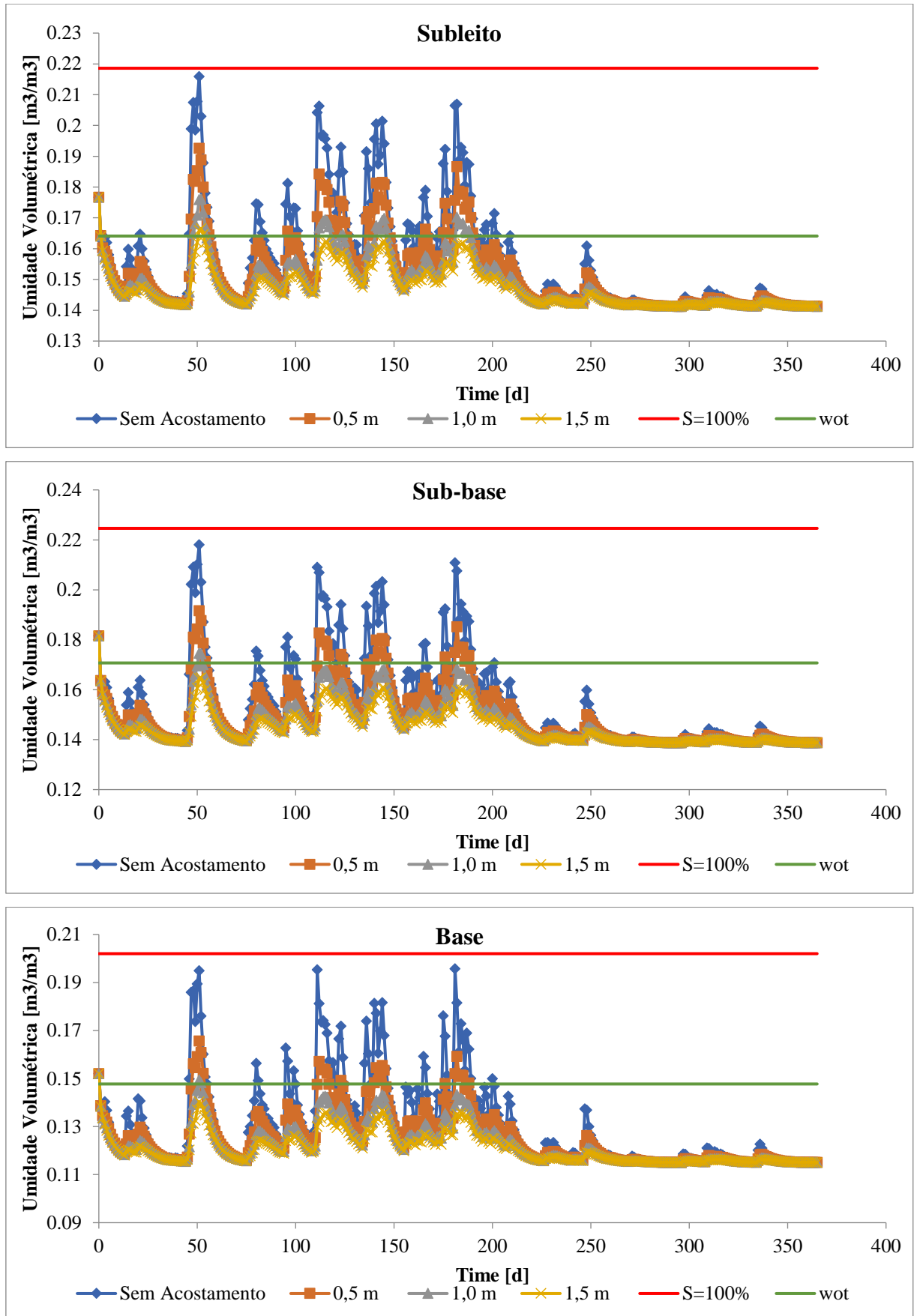


Figura D.32 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

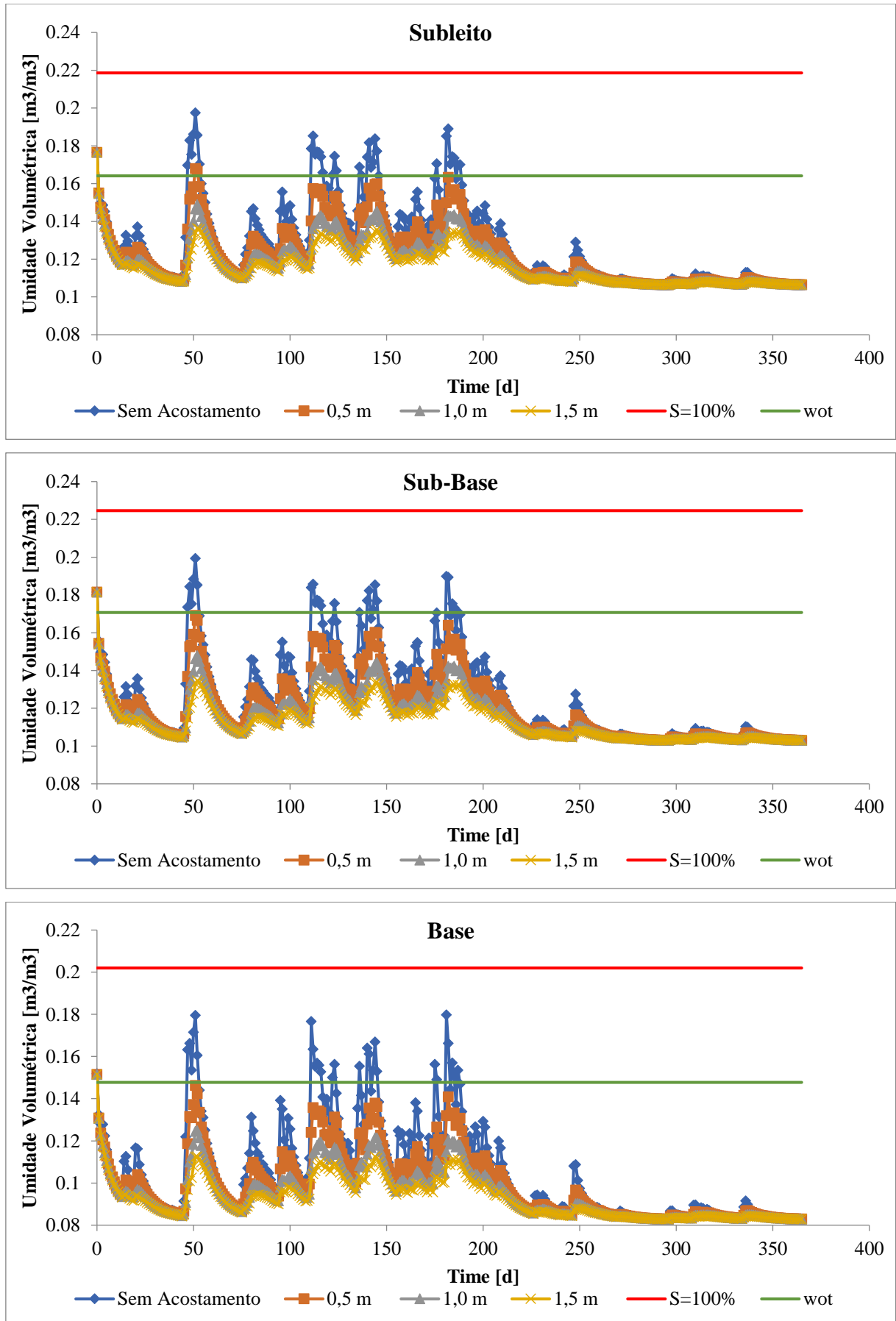


Figura D.33 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,0 m

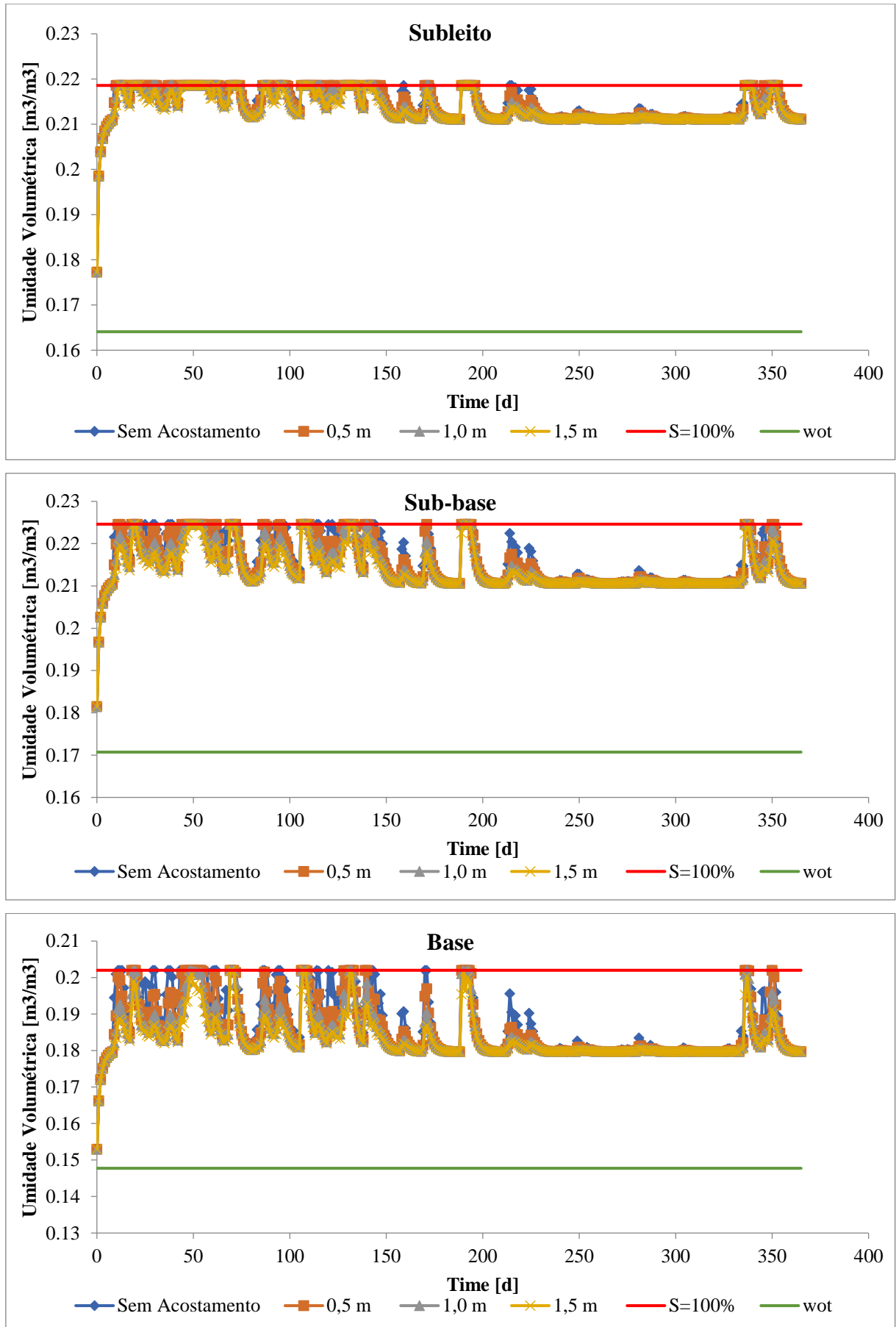


Figura D.34 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

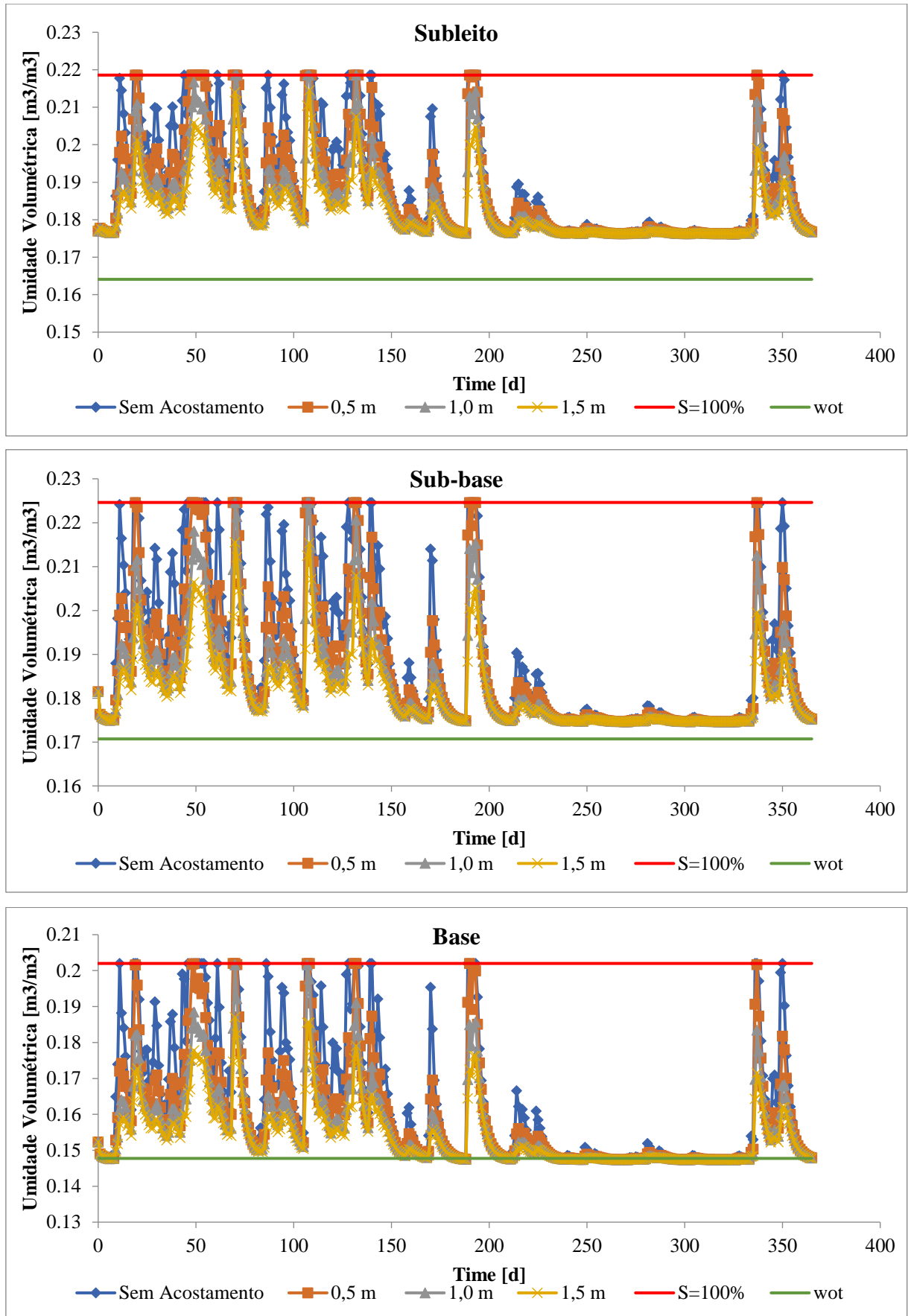


Figura D.35 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

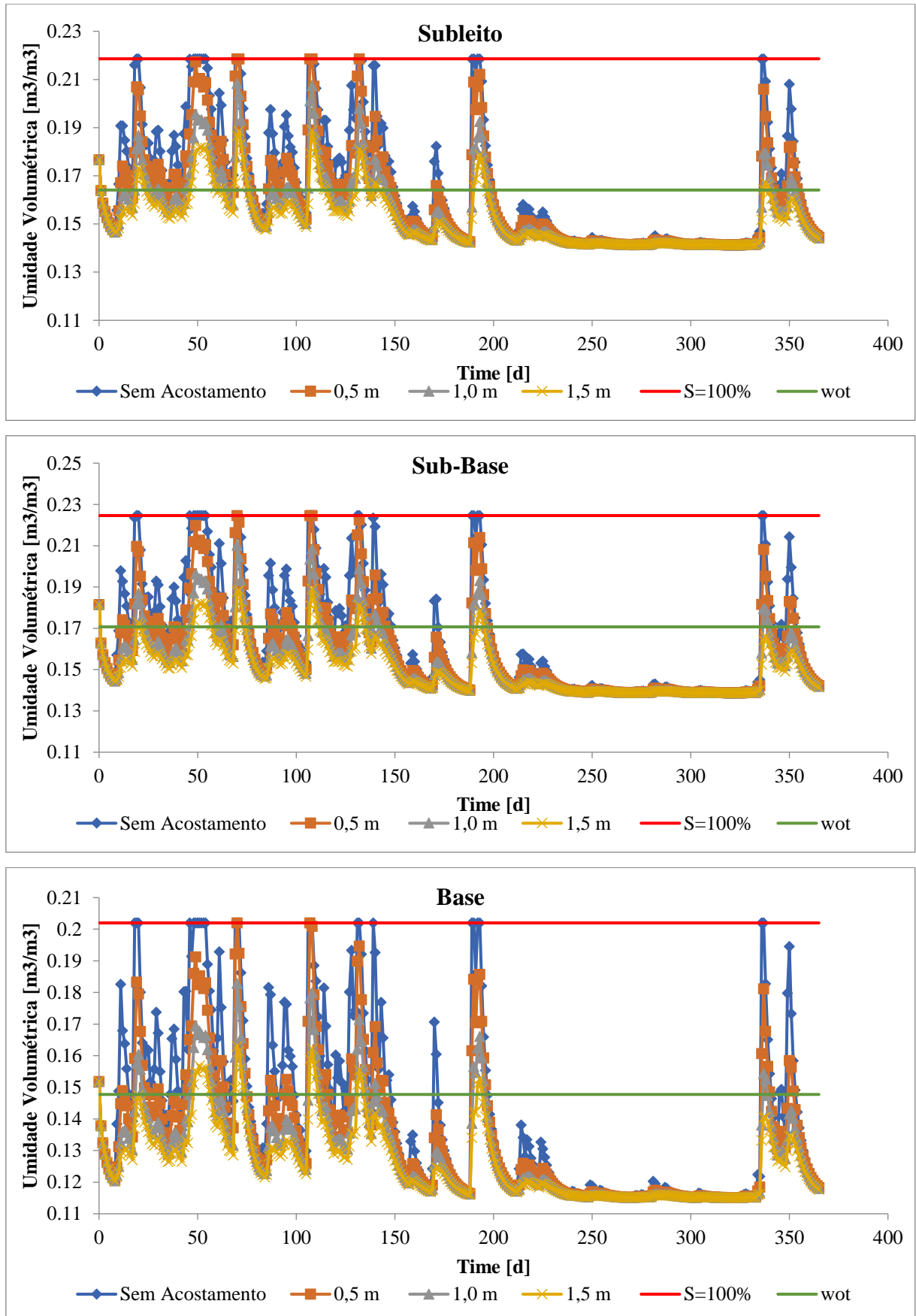
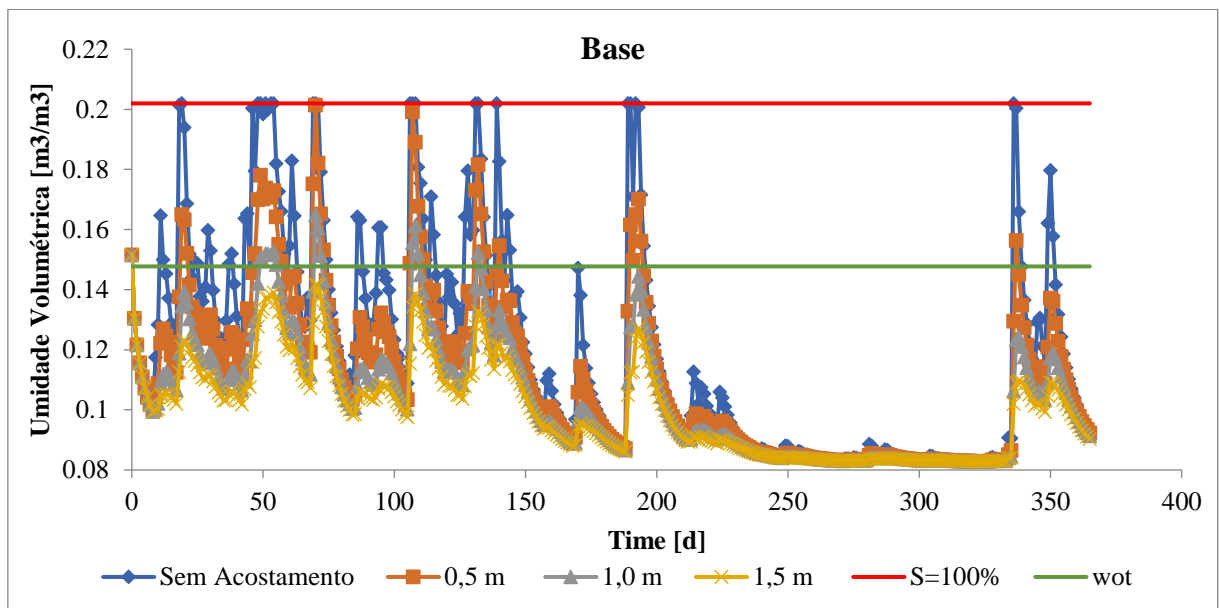
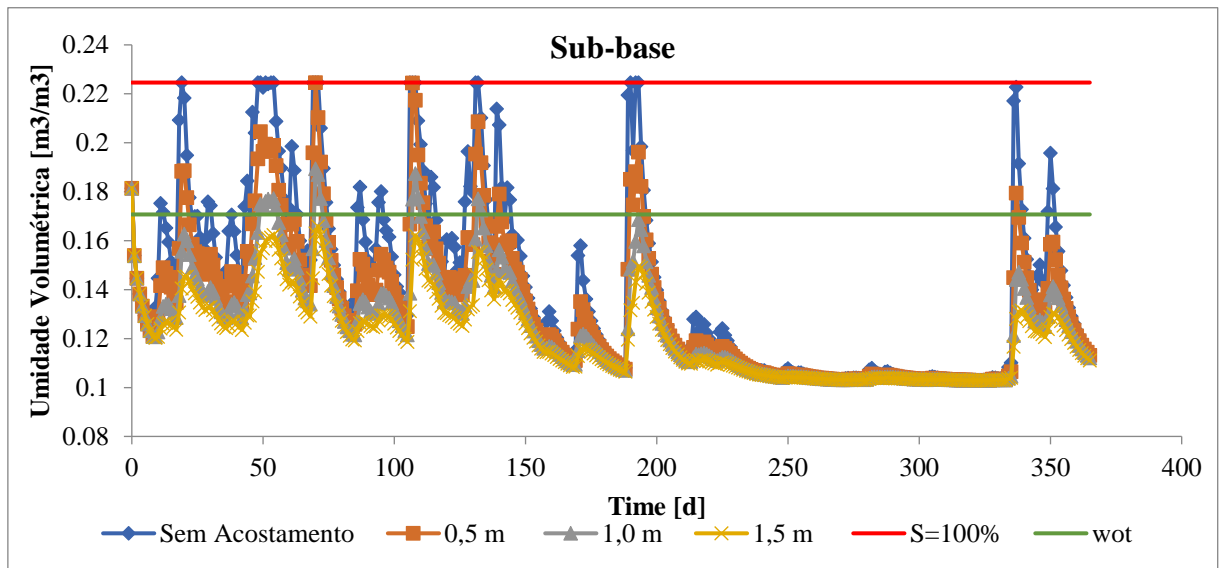
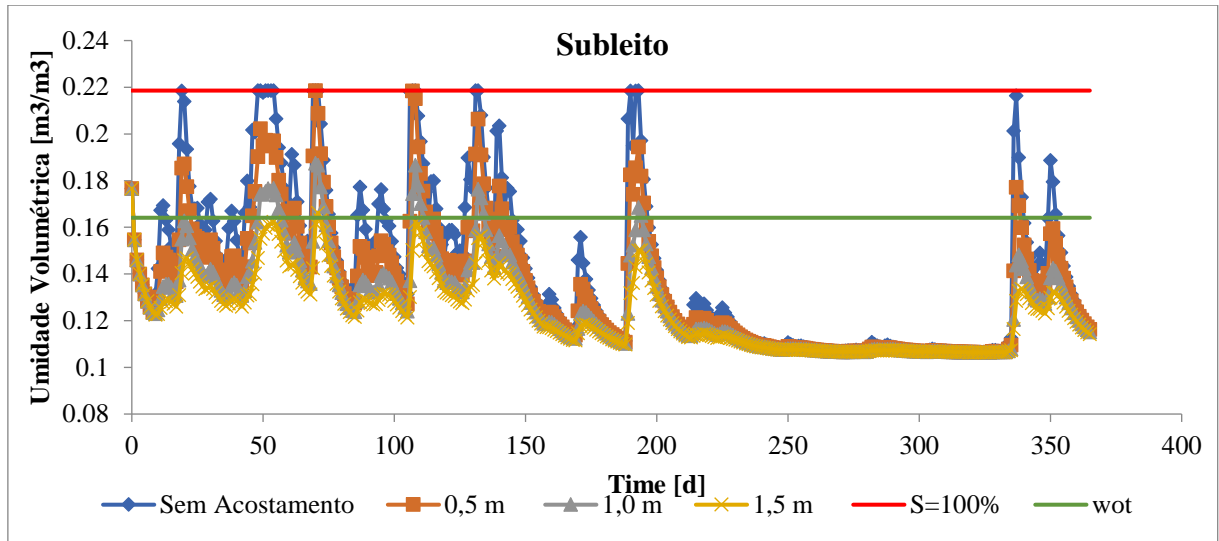


Figura D.36 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m



APÊNDICE E – VARIAÇÕES DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA A CAMADA DE BASE

E.1. Revestimento 2 cm

Figura E.1 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,0 m

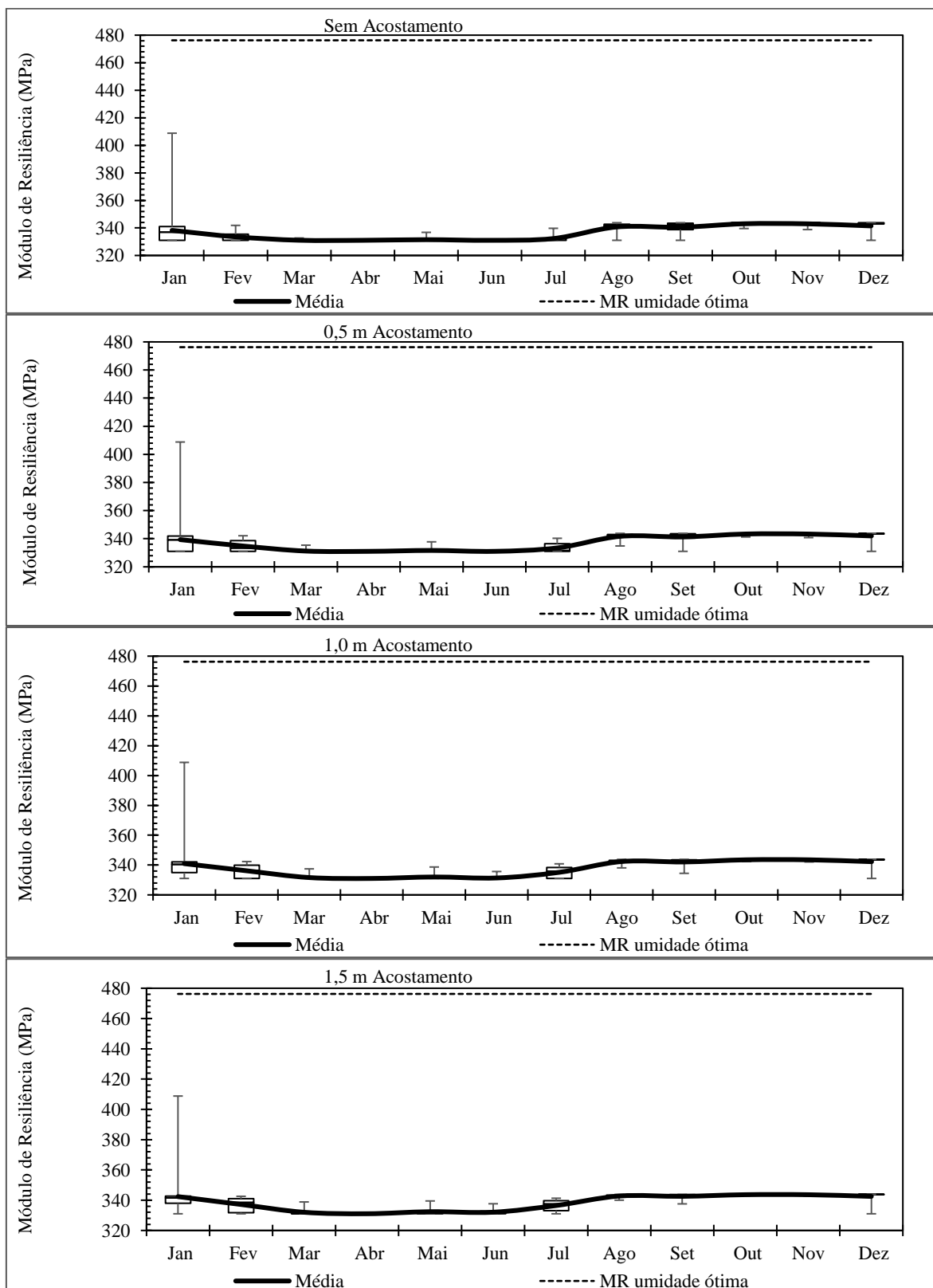


Figura E.2 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

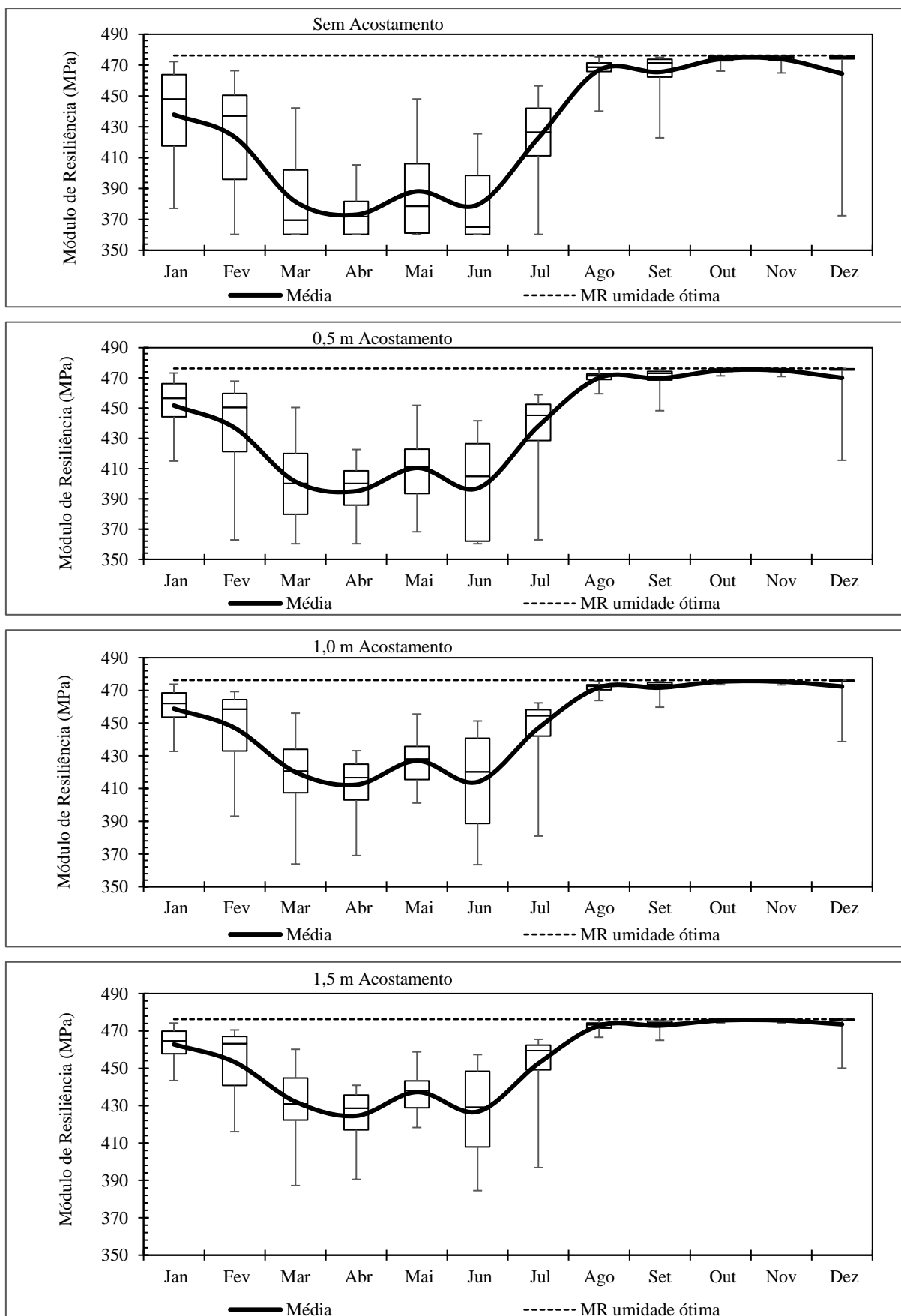


Figura E.3 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

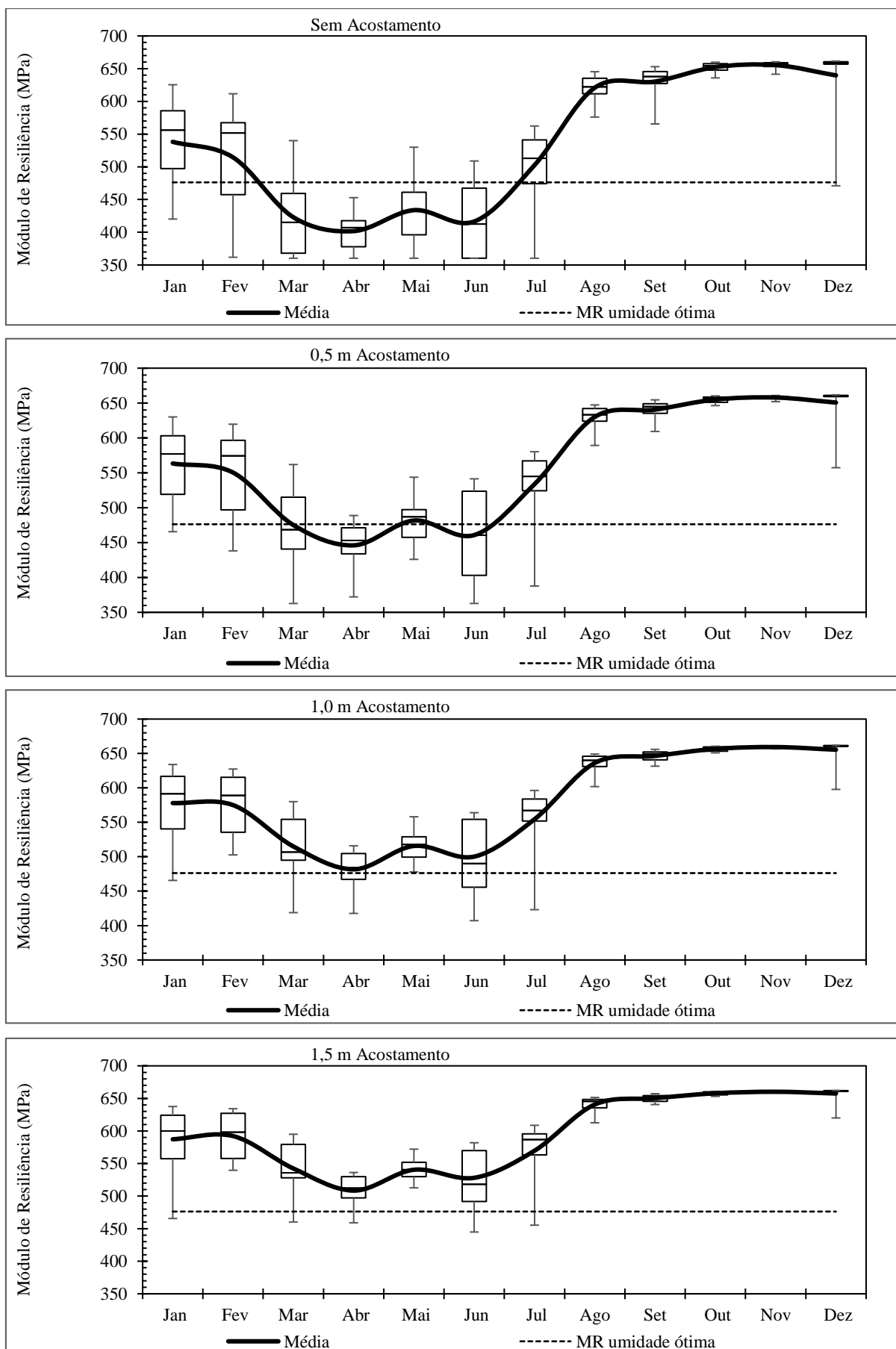


Figura E.4 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

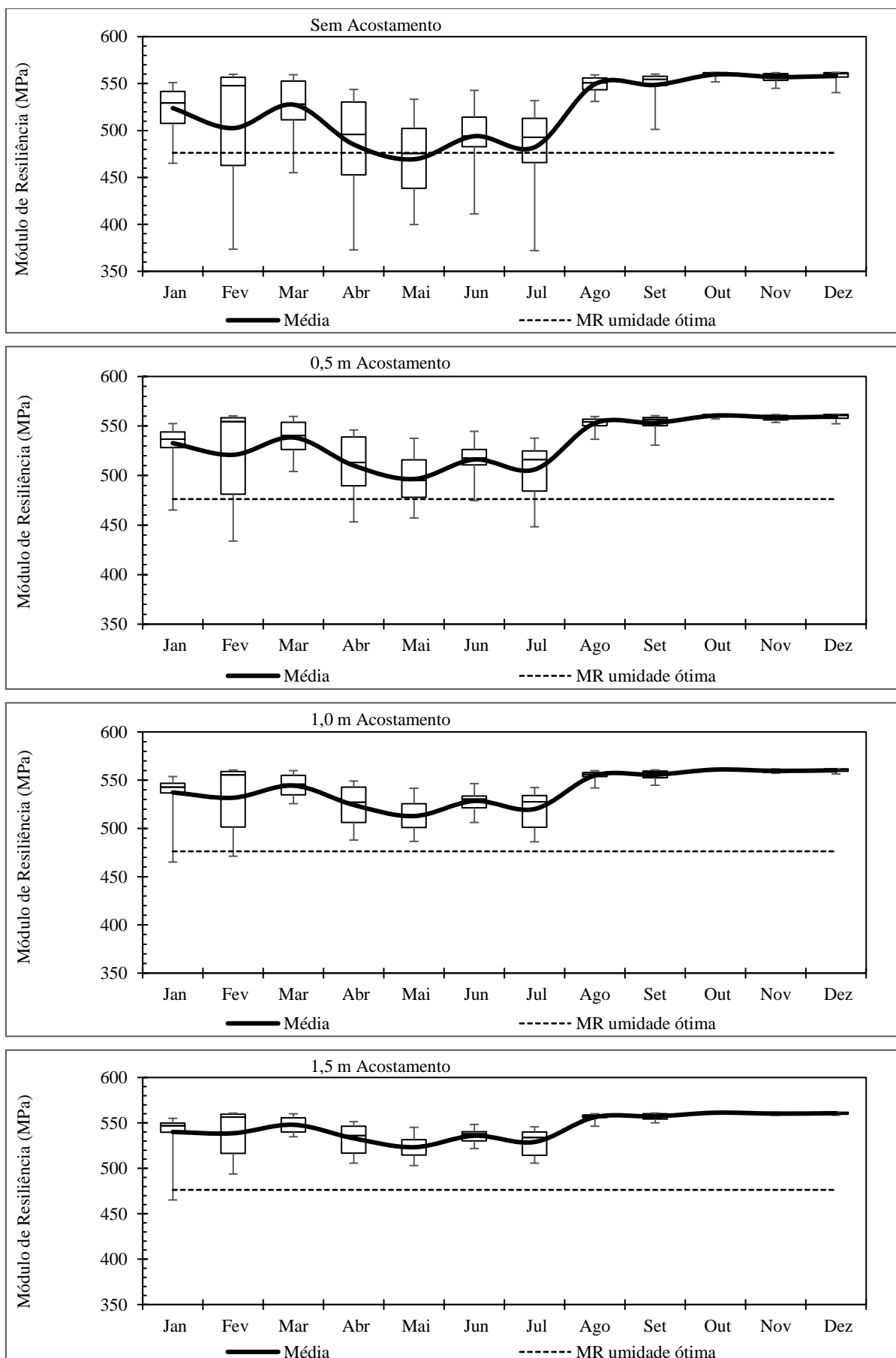


Figura E.5 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

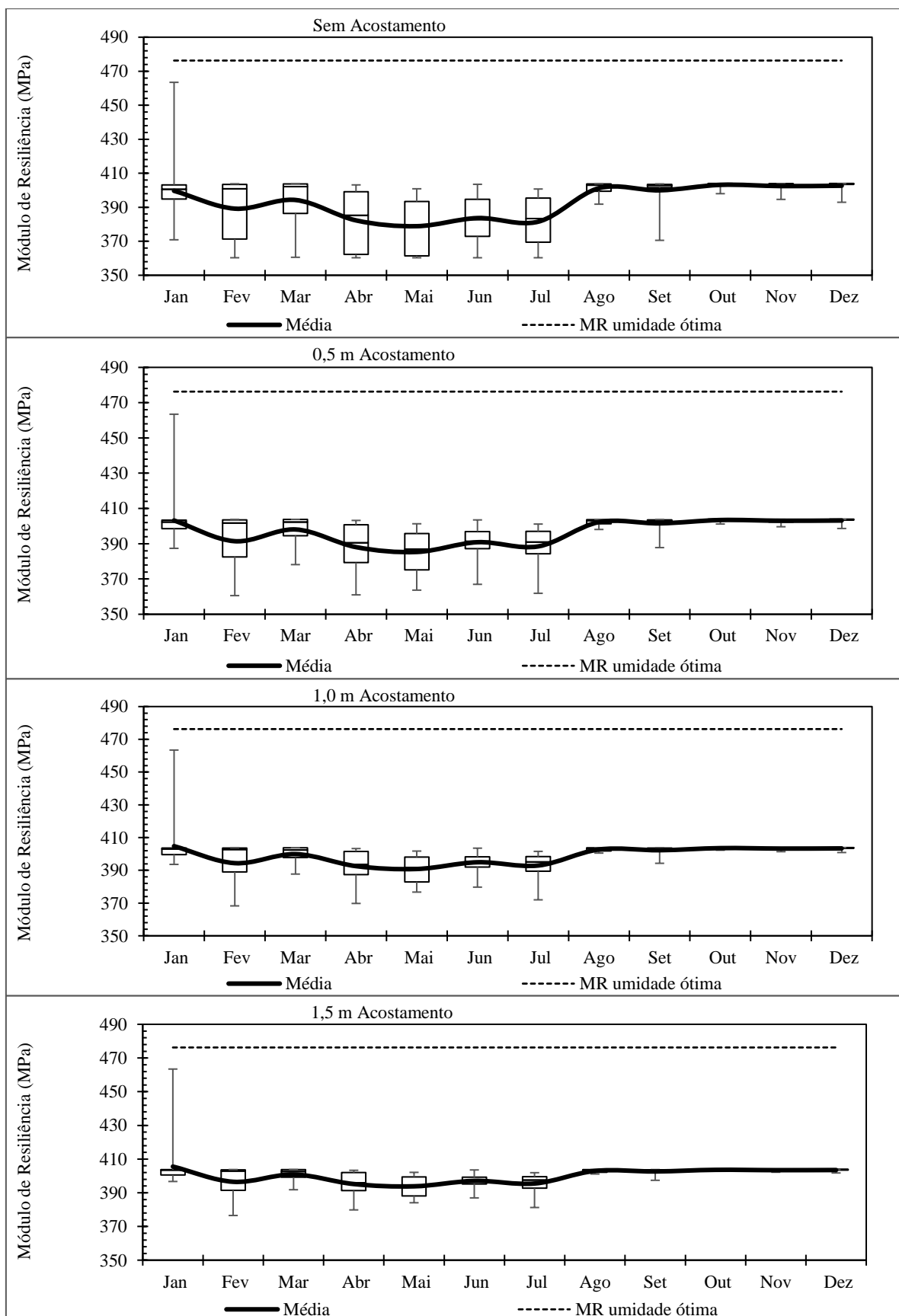


Figura E.6 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

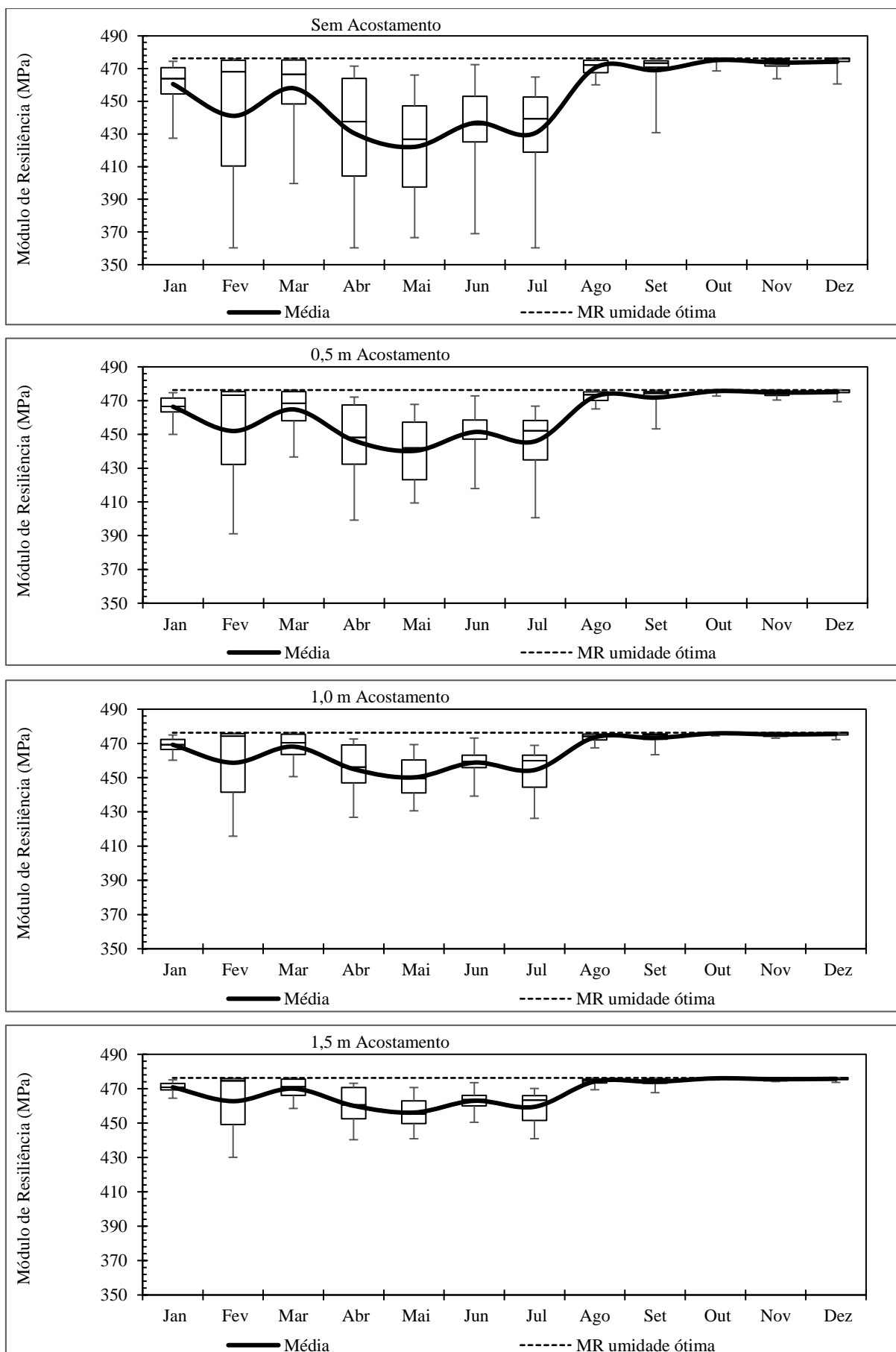


Figura E.7 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

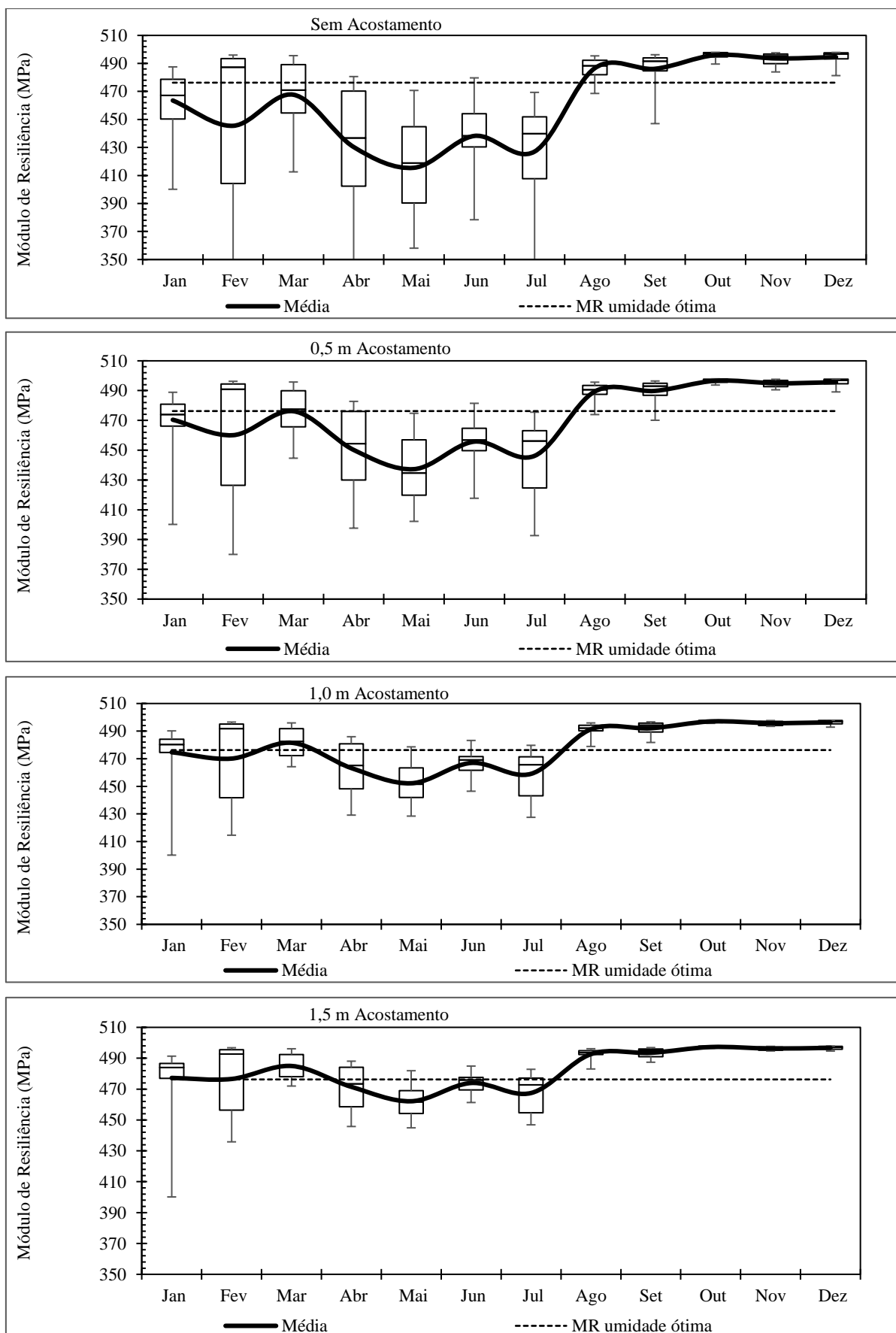


Figura E.8 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

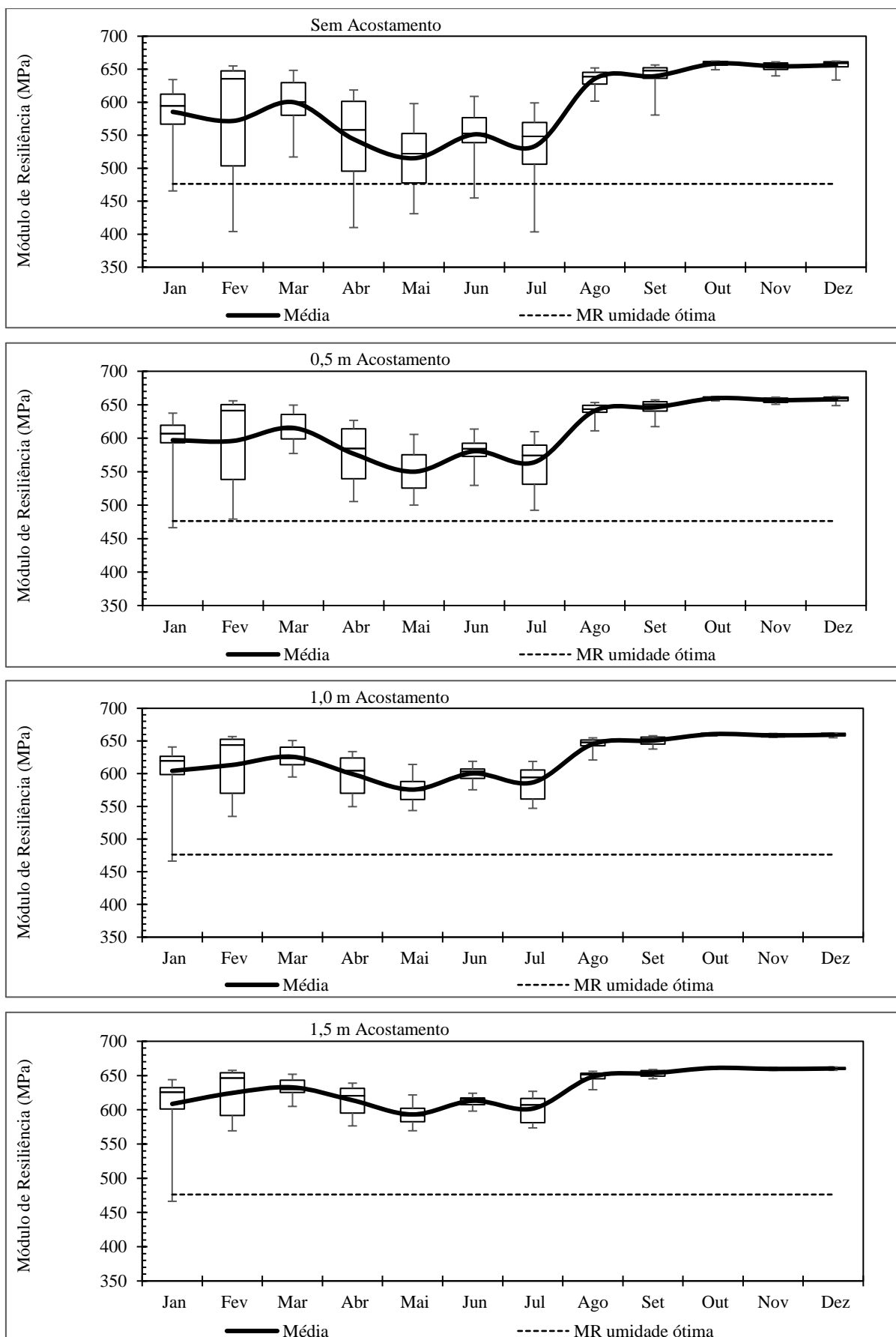


Figura E.10 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

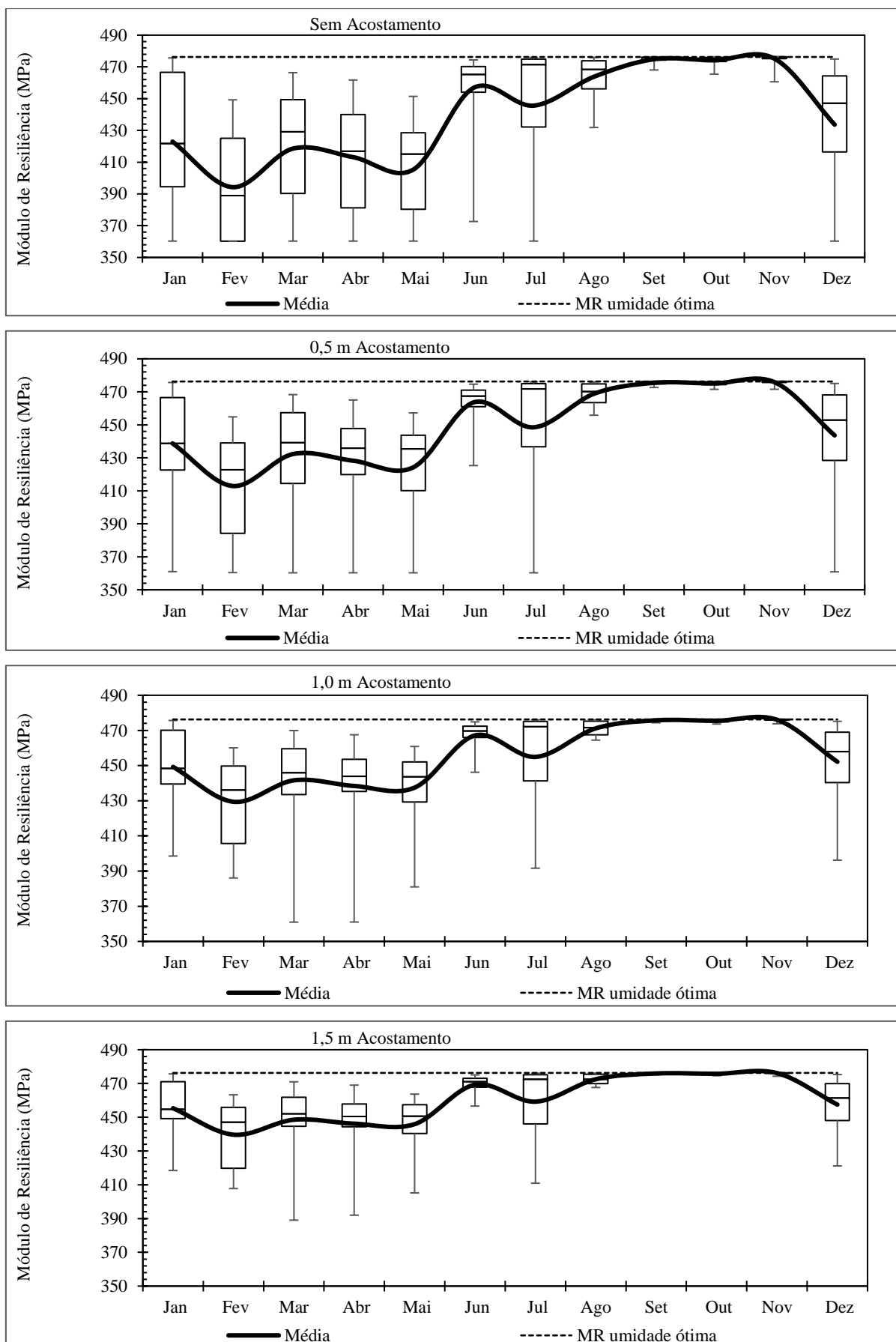


Figura E.11 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

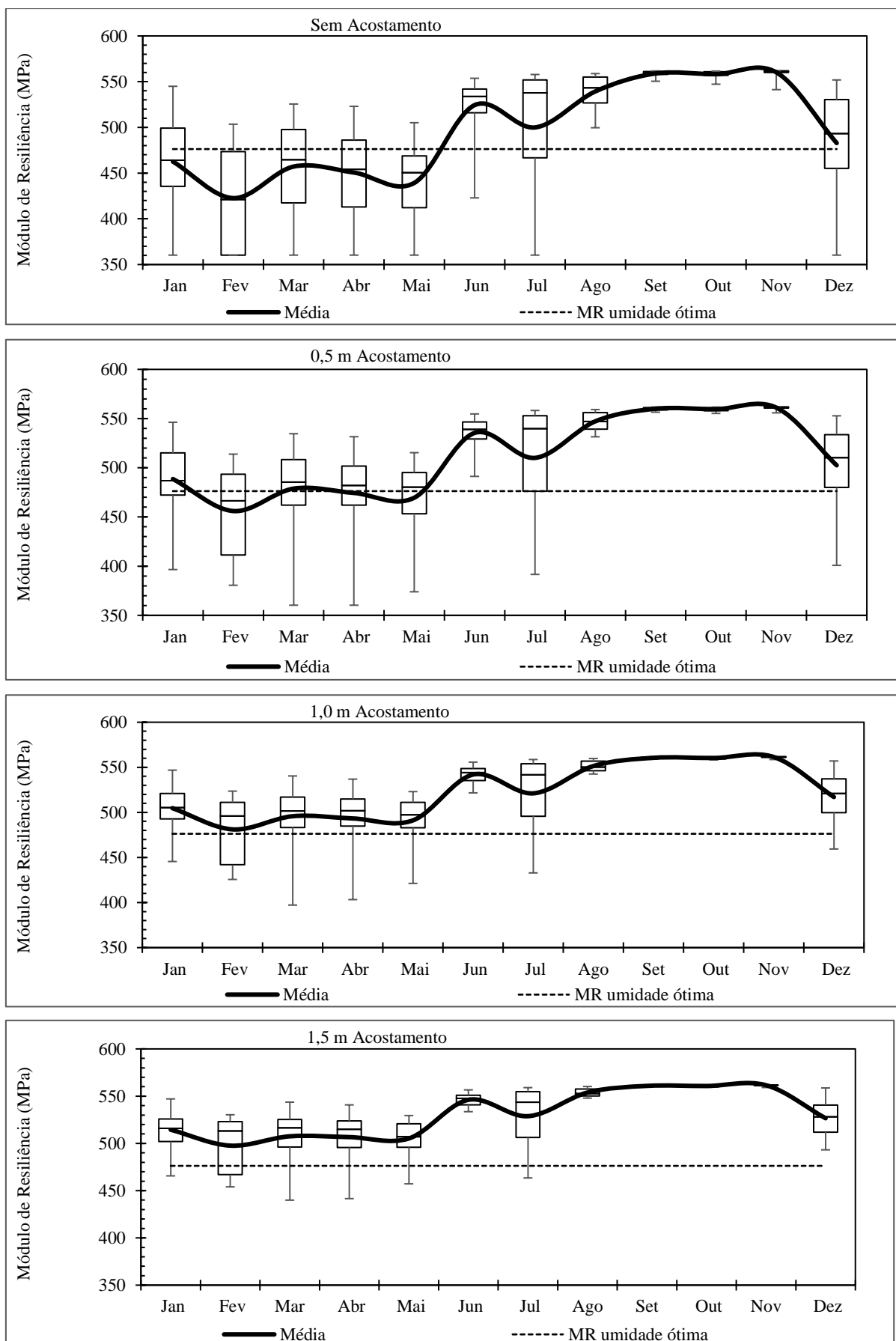


Figura E.12 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m

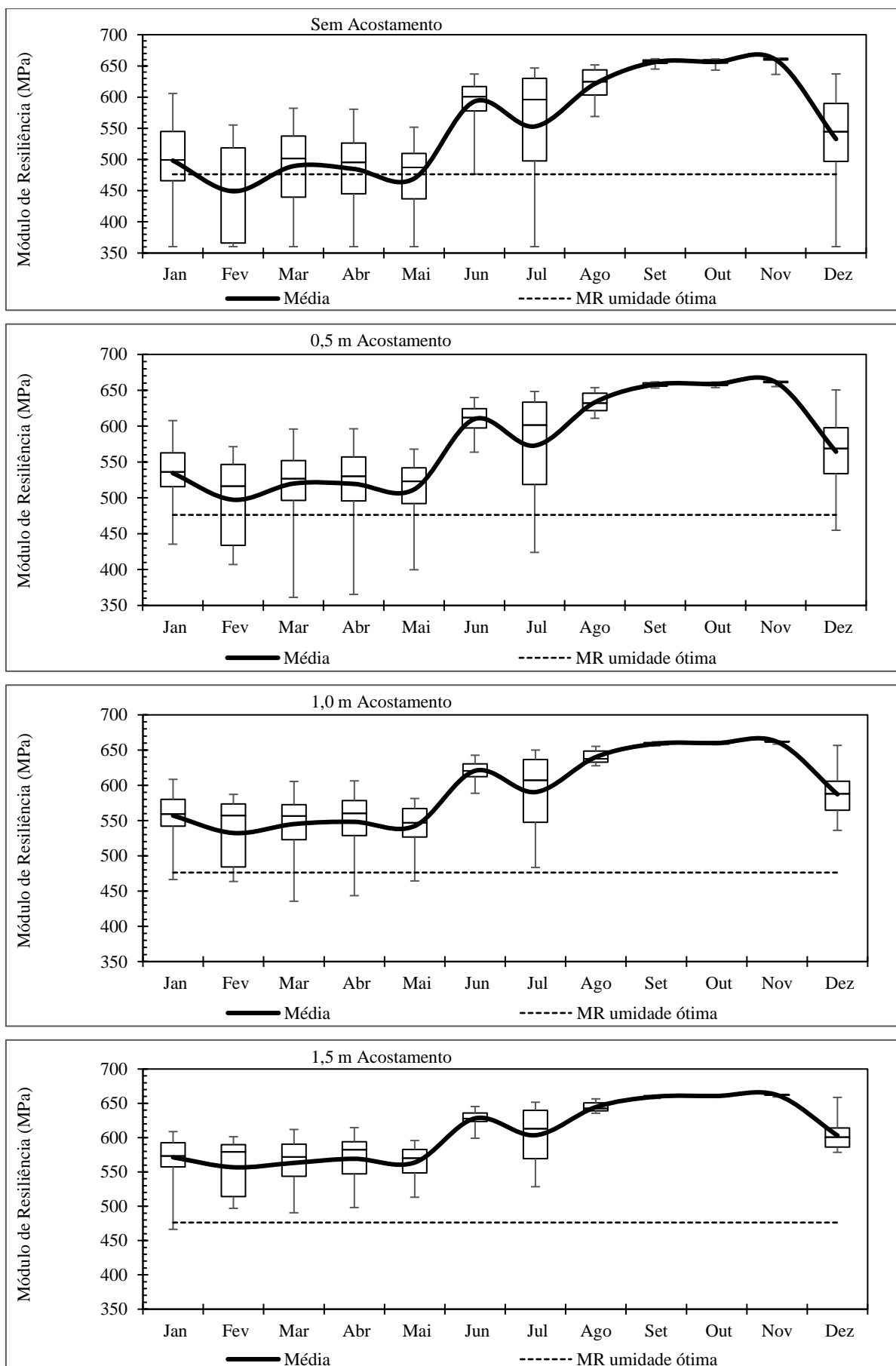


Figura E.14 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

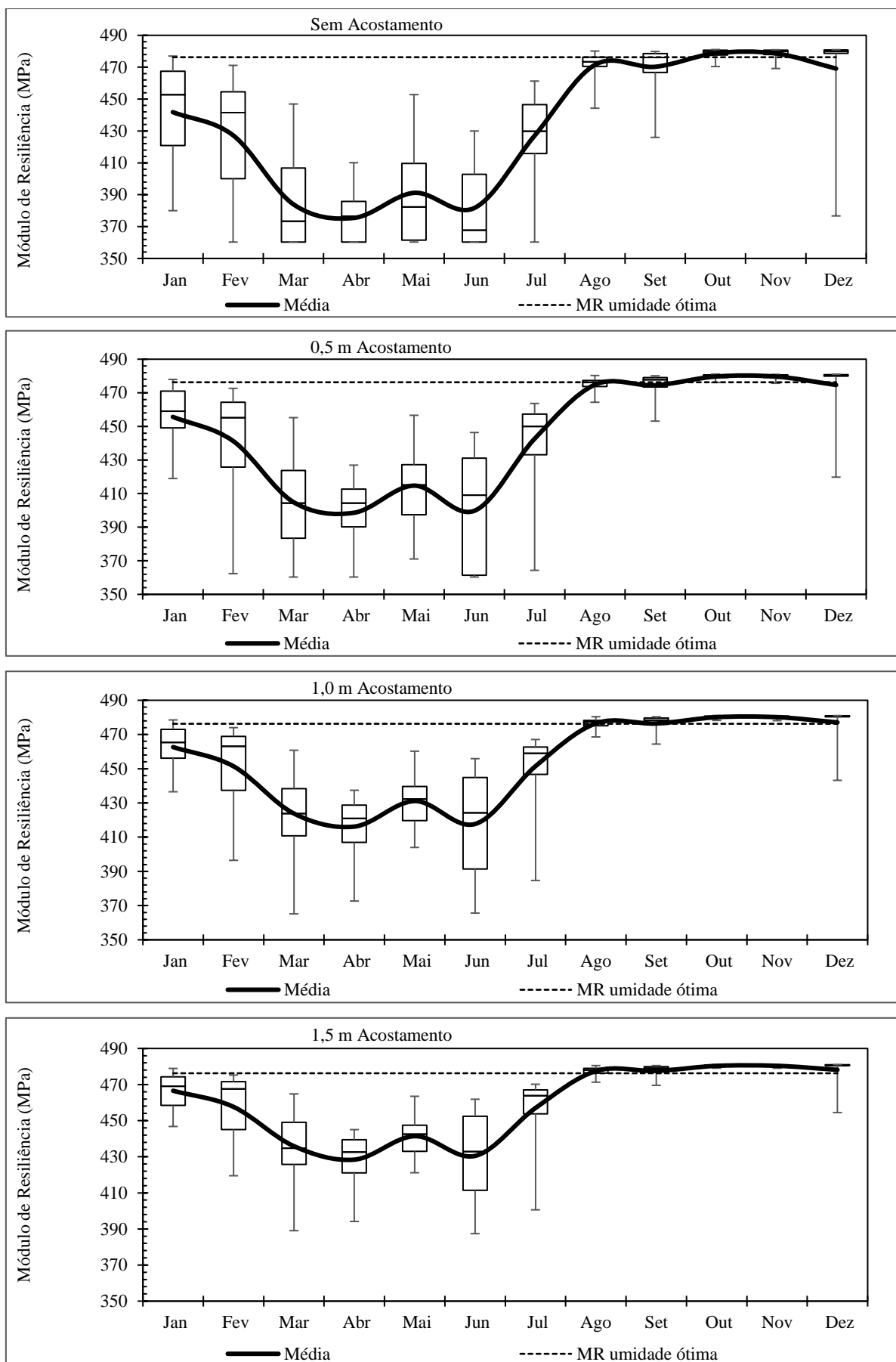


Figura E.15 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

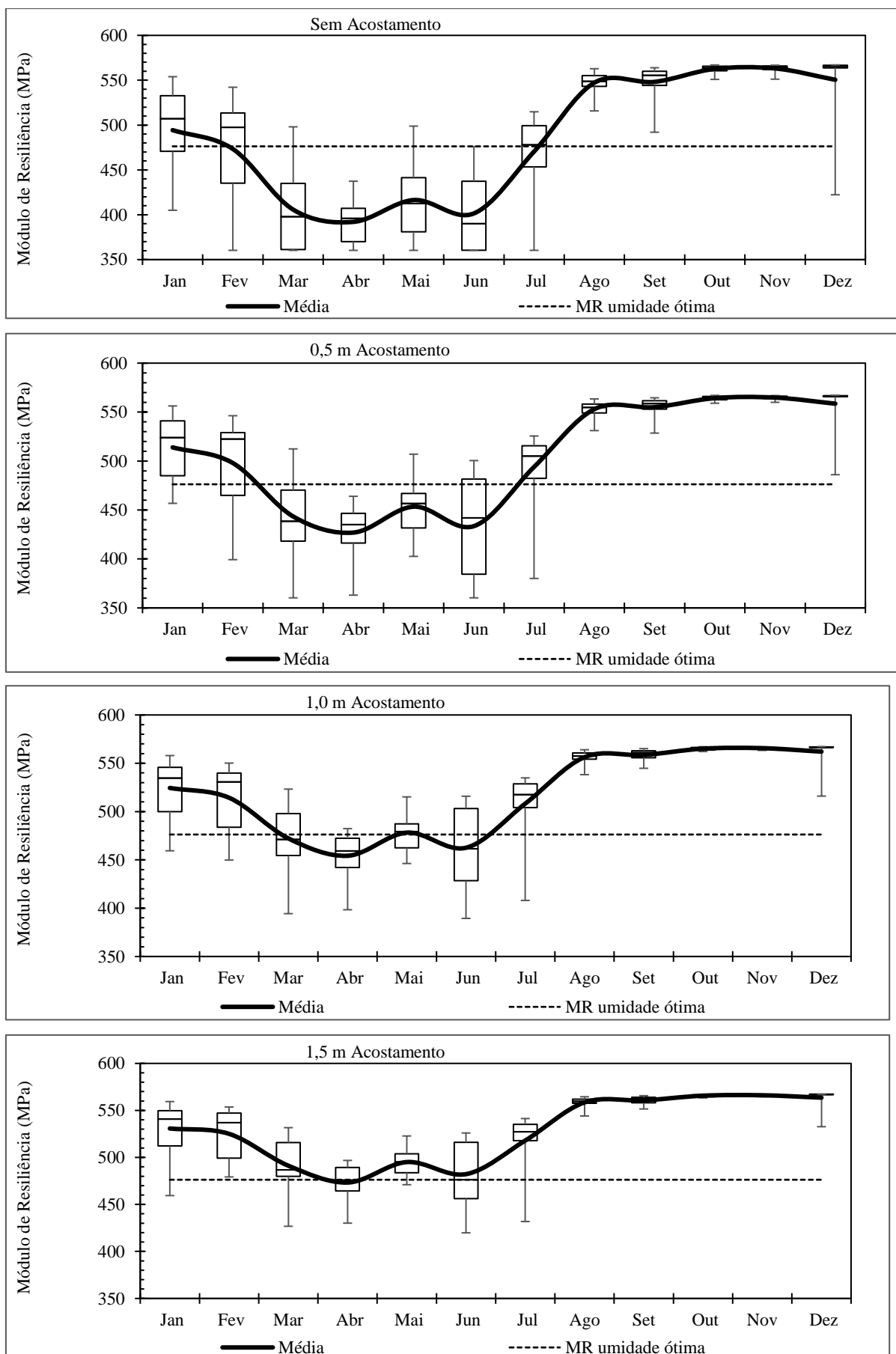


Figura E.16 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

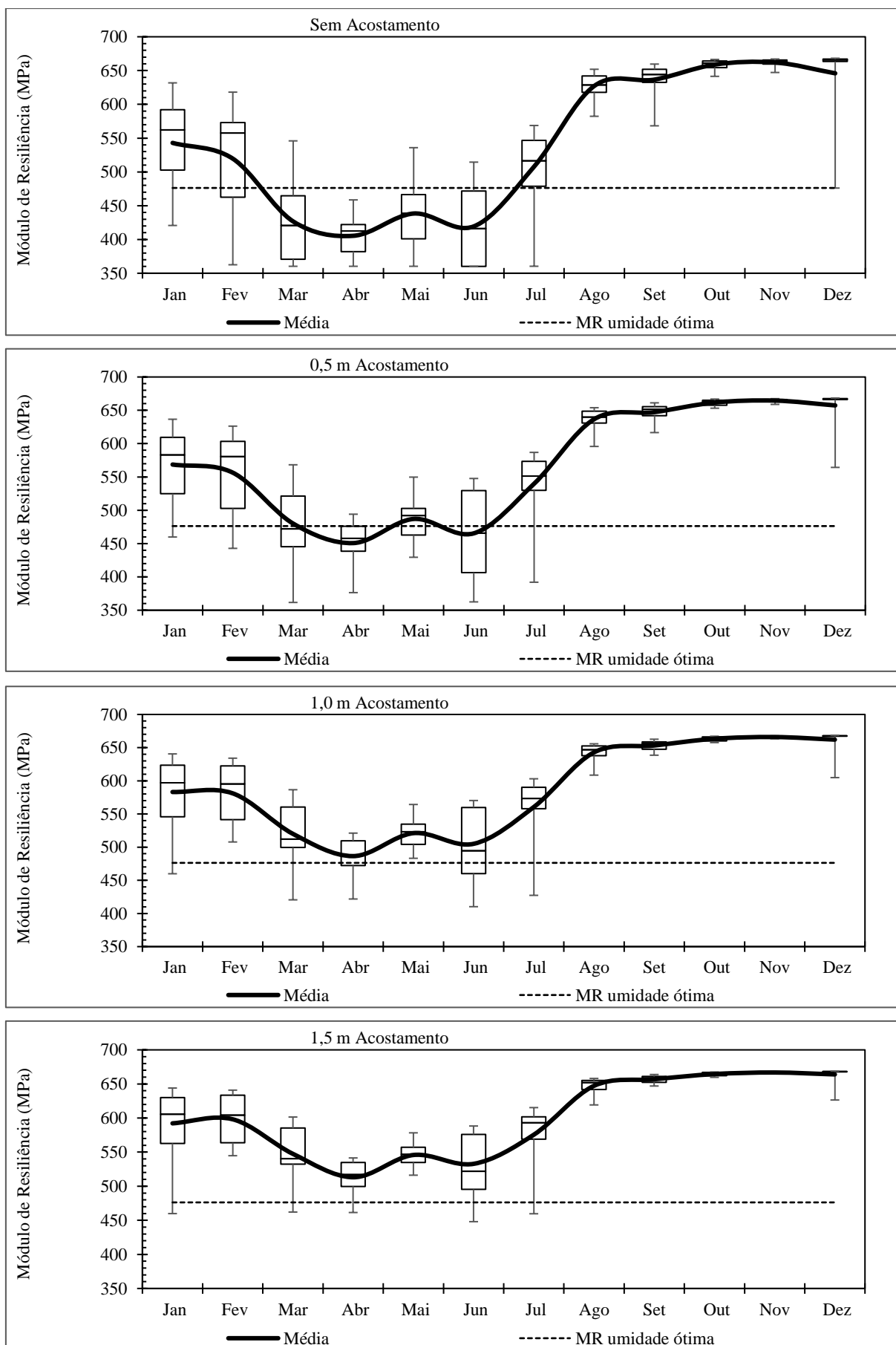


Figura E.17 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

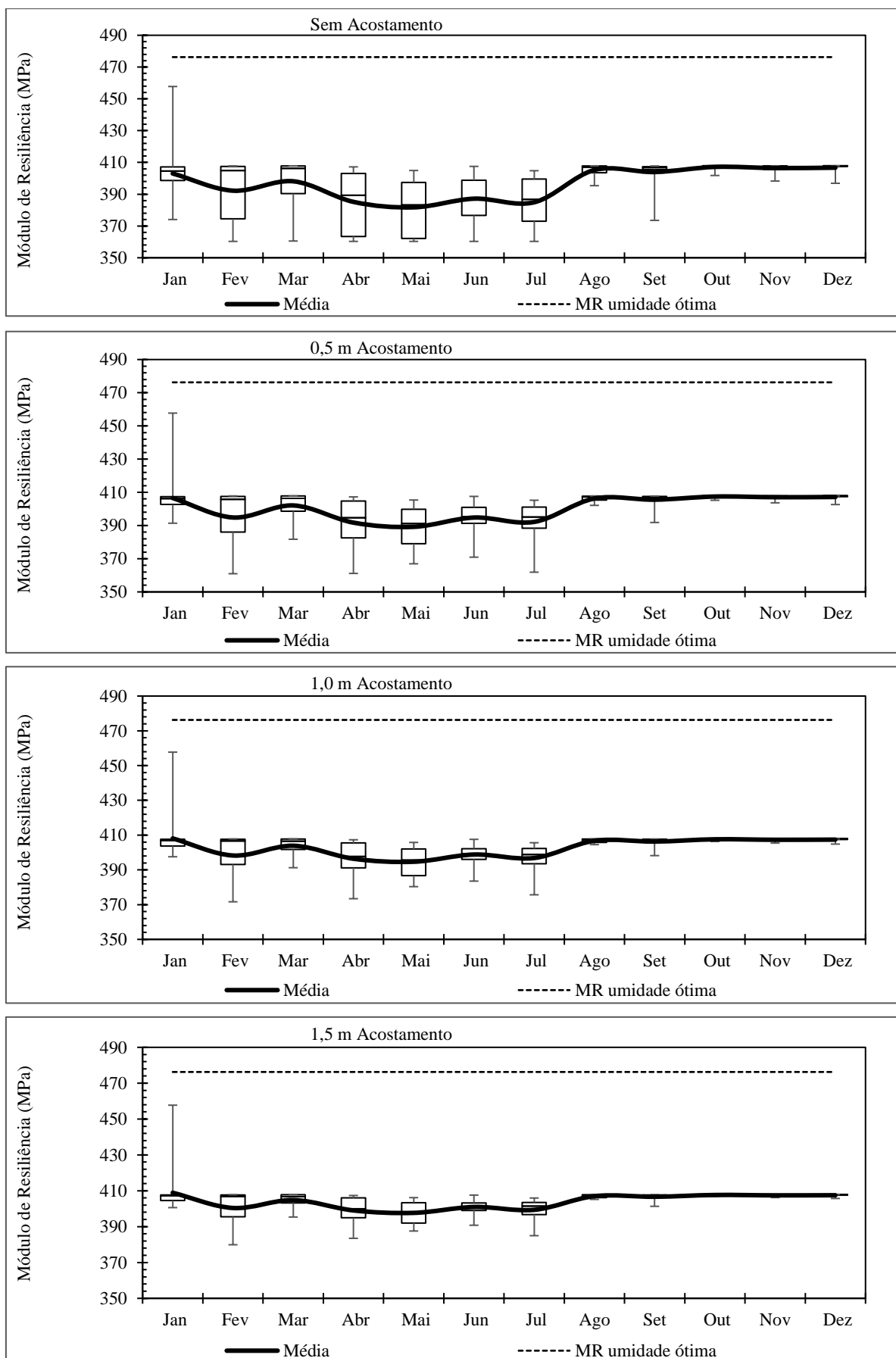


Figura E.18 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

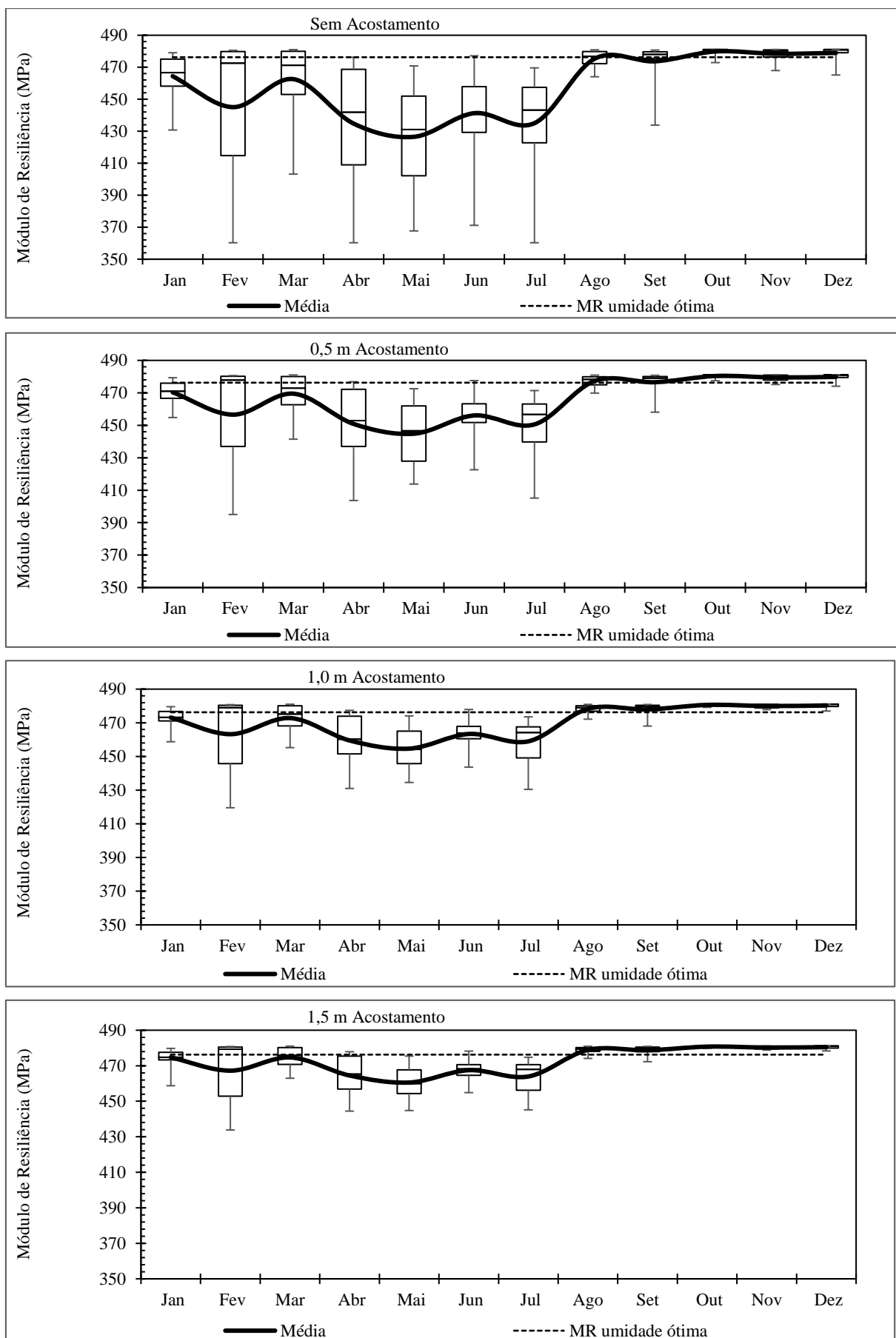


Figura E.19 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

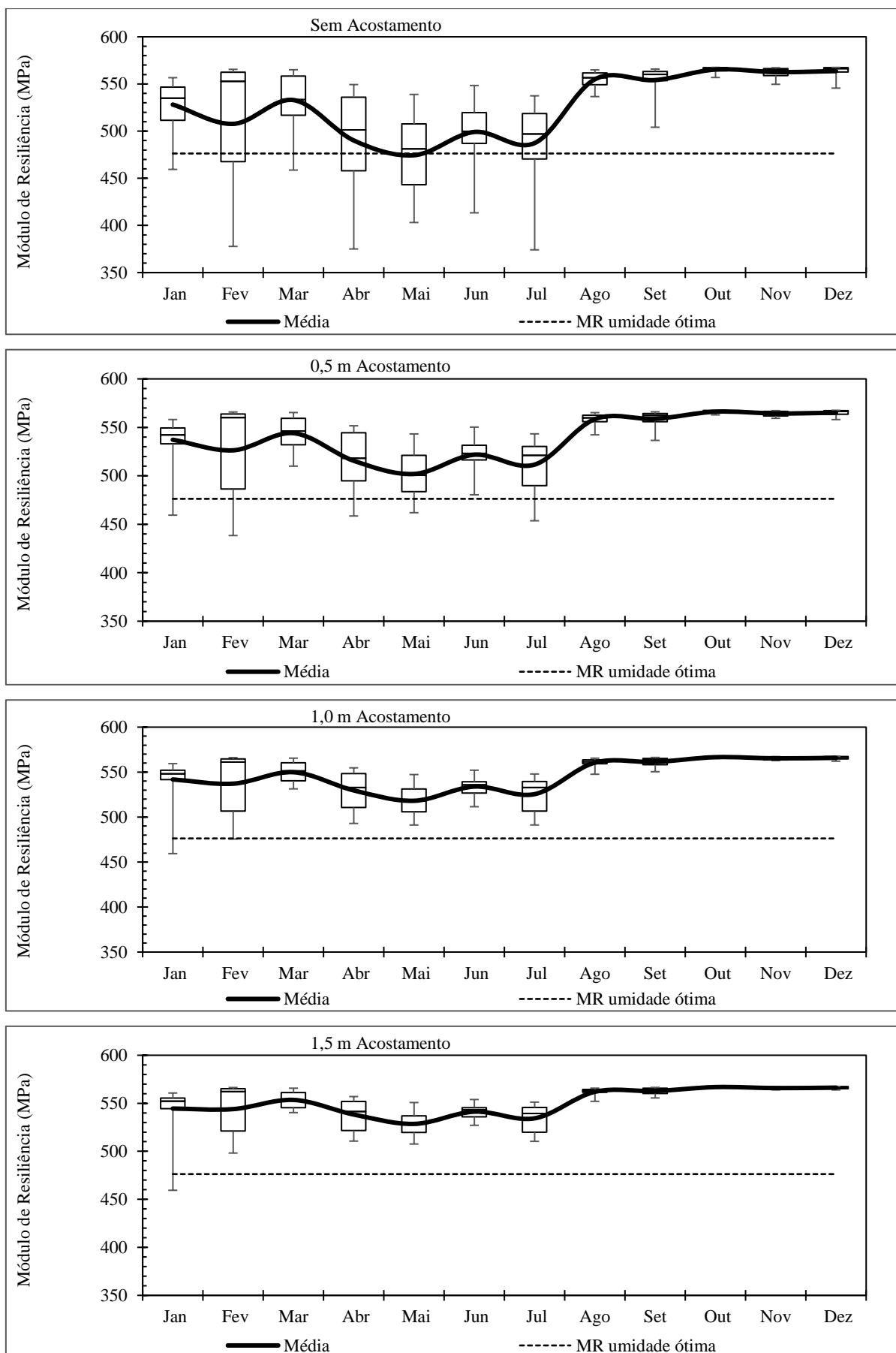


Figura E.20 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

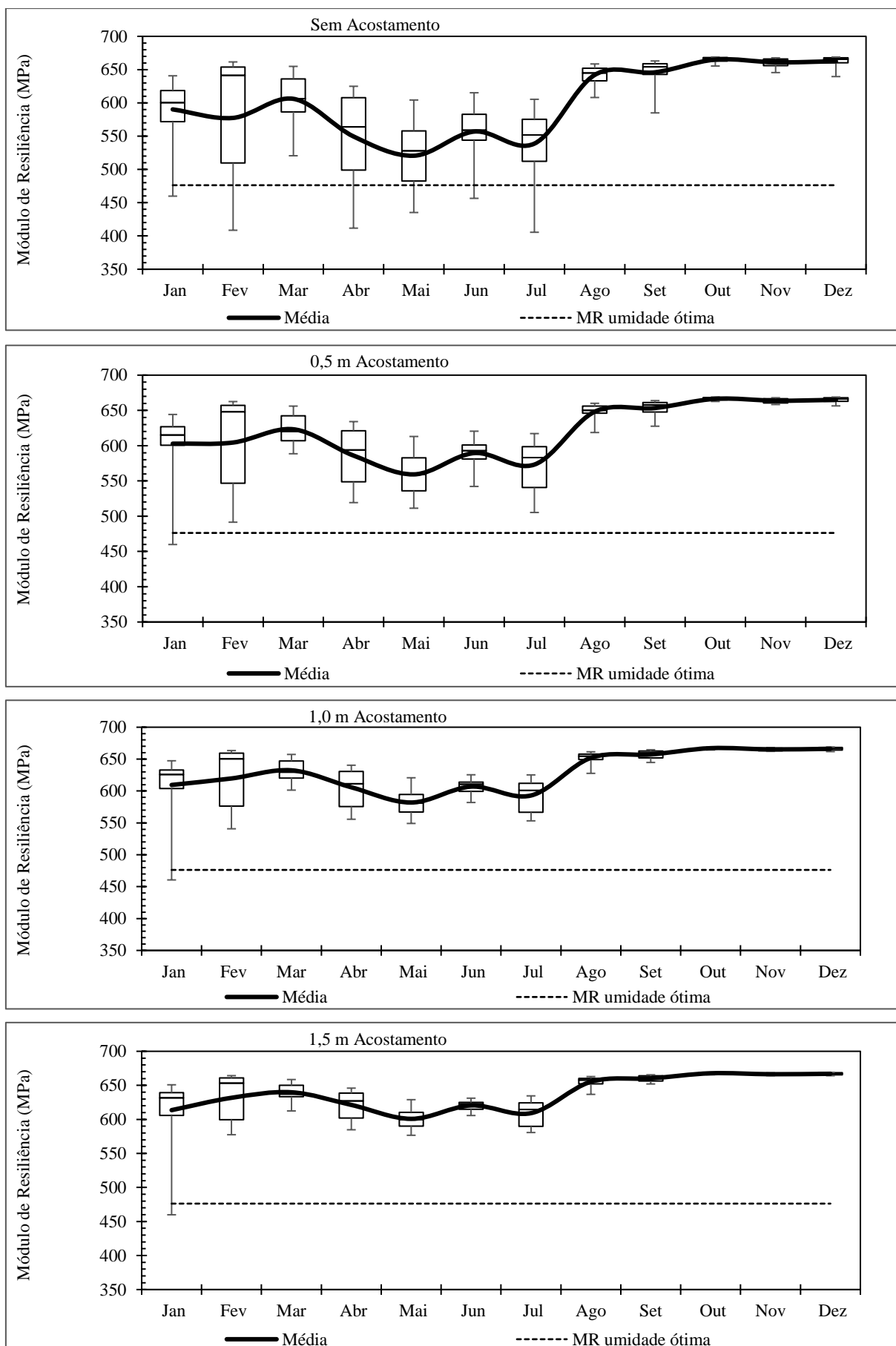


Figura E.21 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,0 m

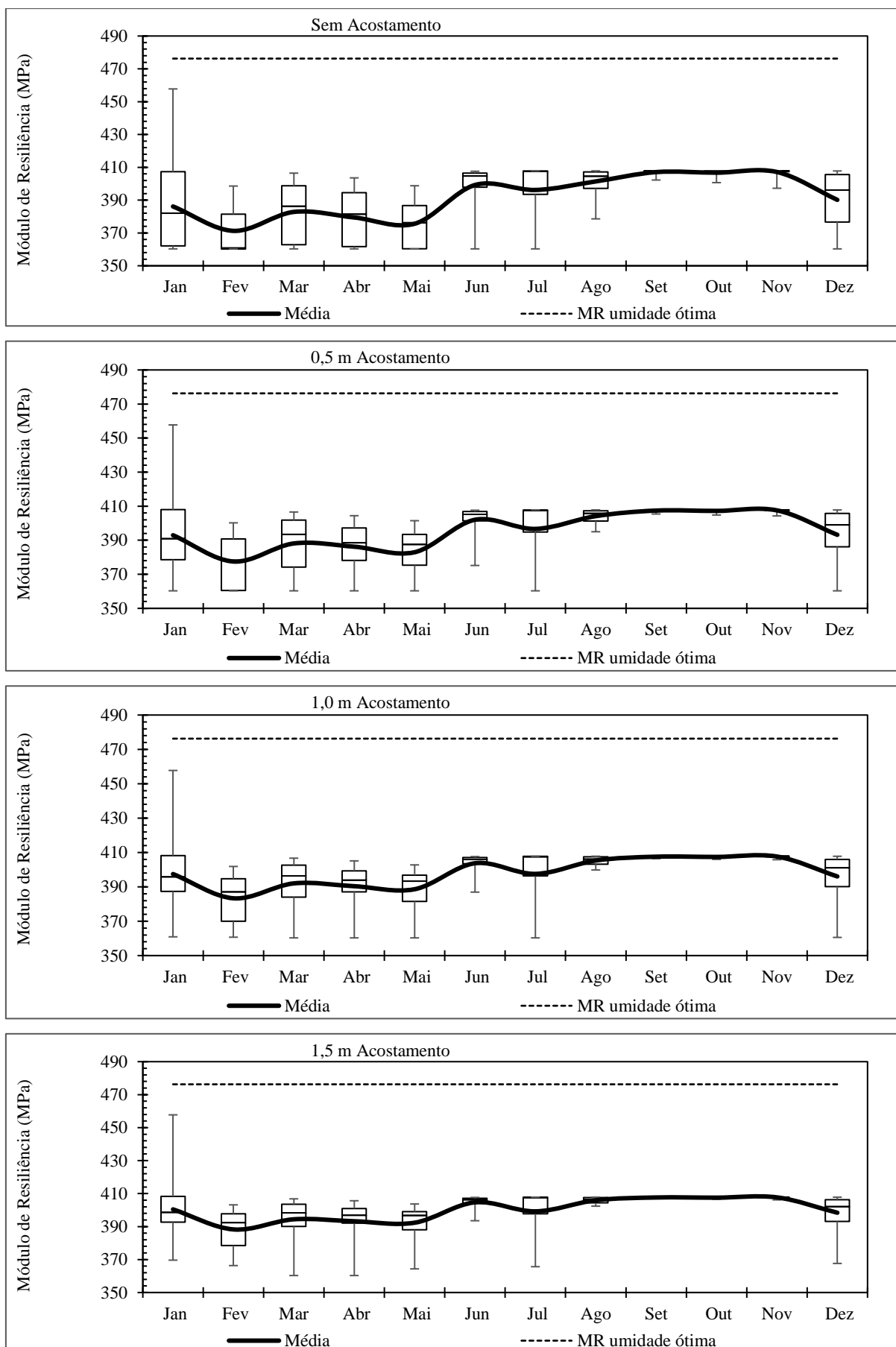


Figura E.22 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

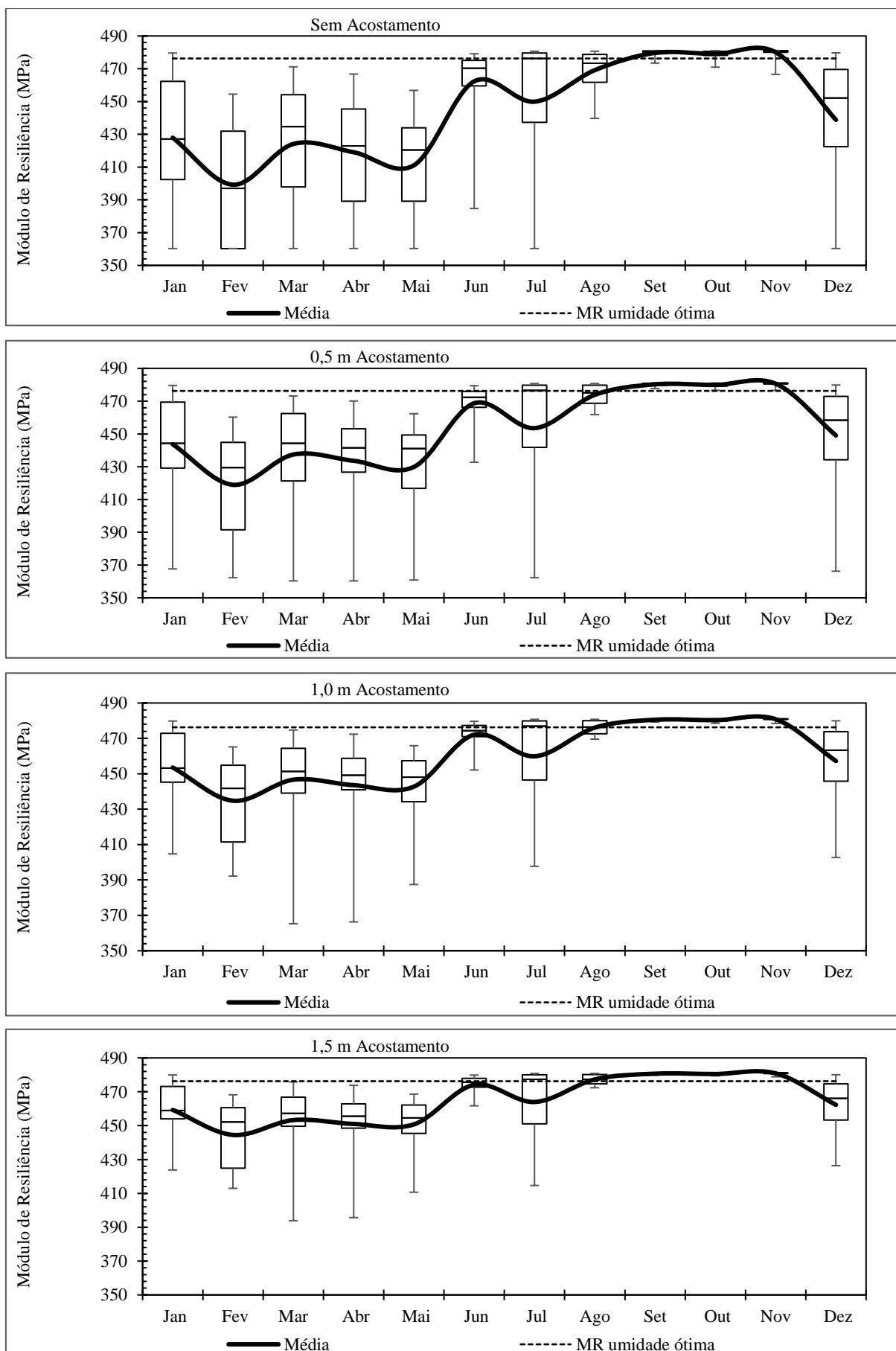


Figura E.23 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

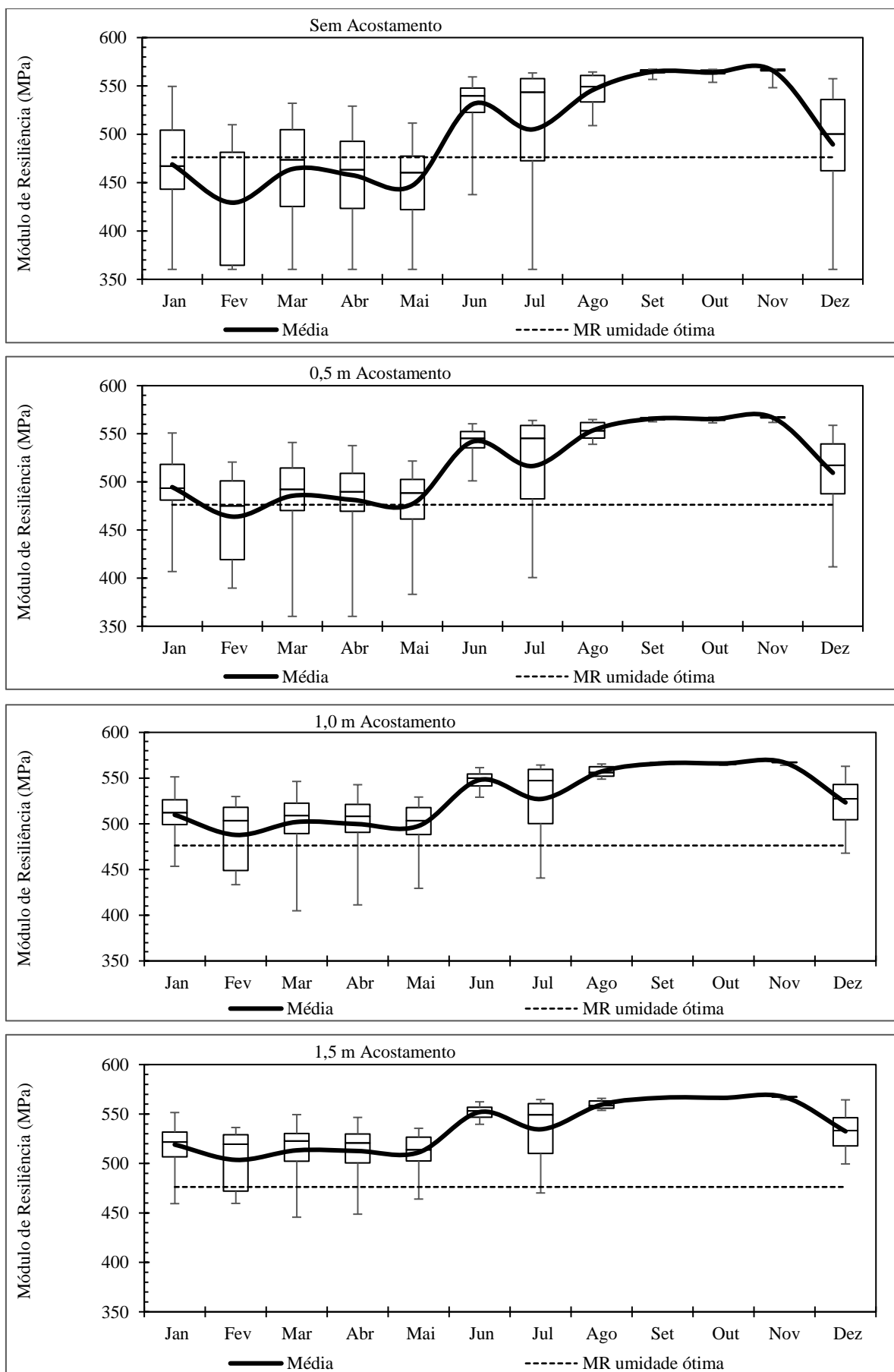
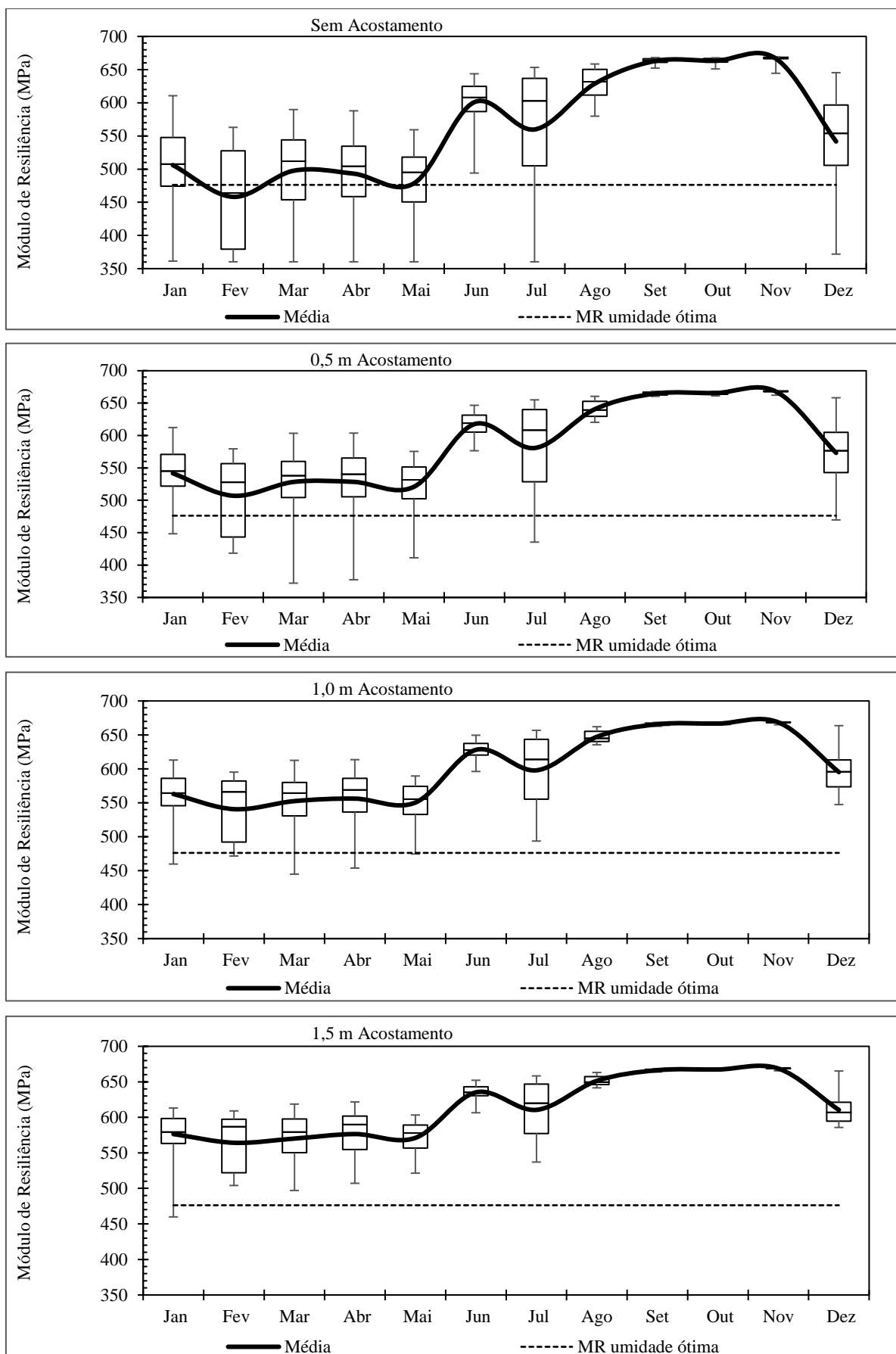


Figura E.24 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m



A.3. Revestimento 10 cm

Figura E.25 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,0 m

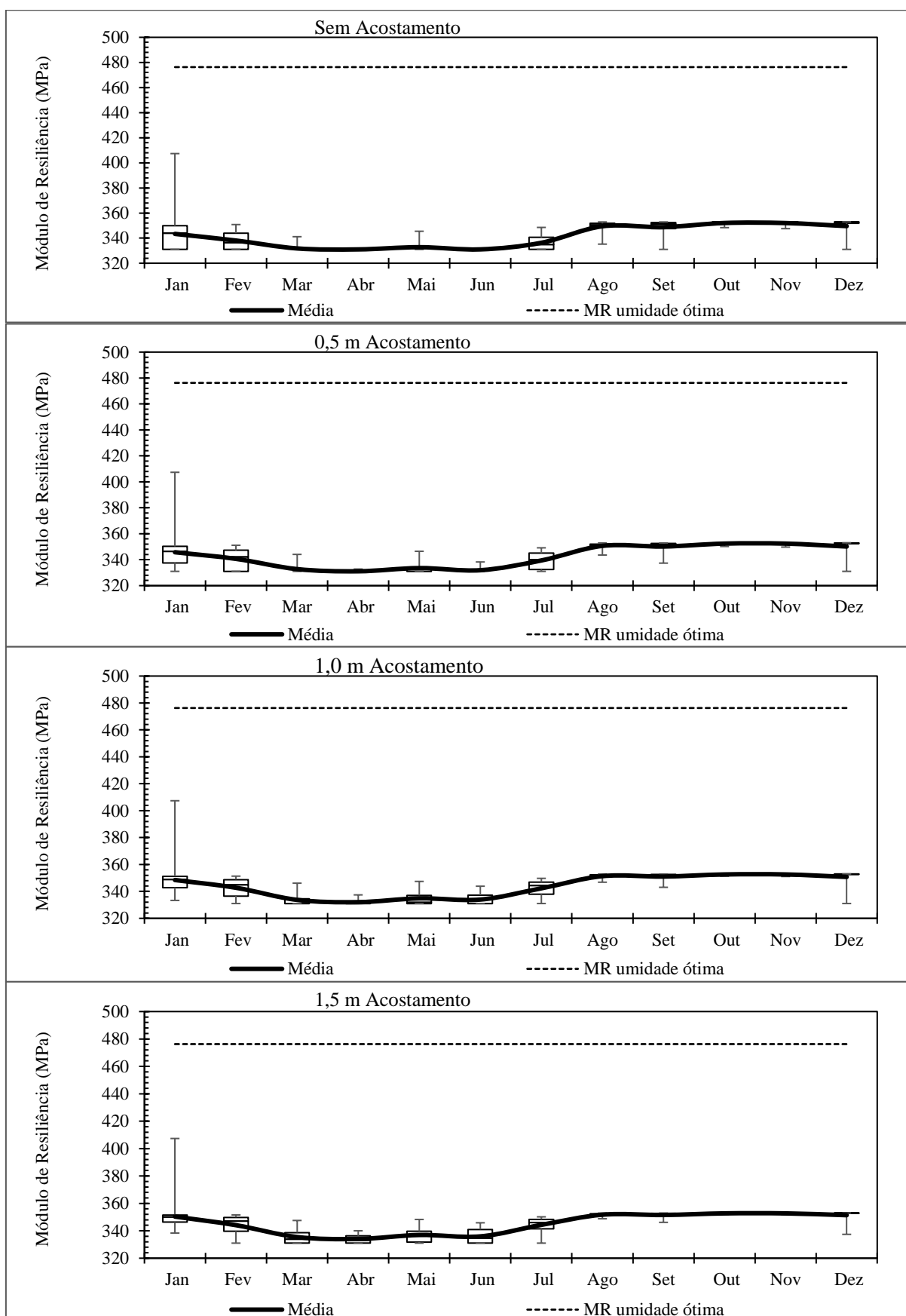


Figura E.26 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 3,5 m

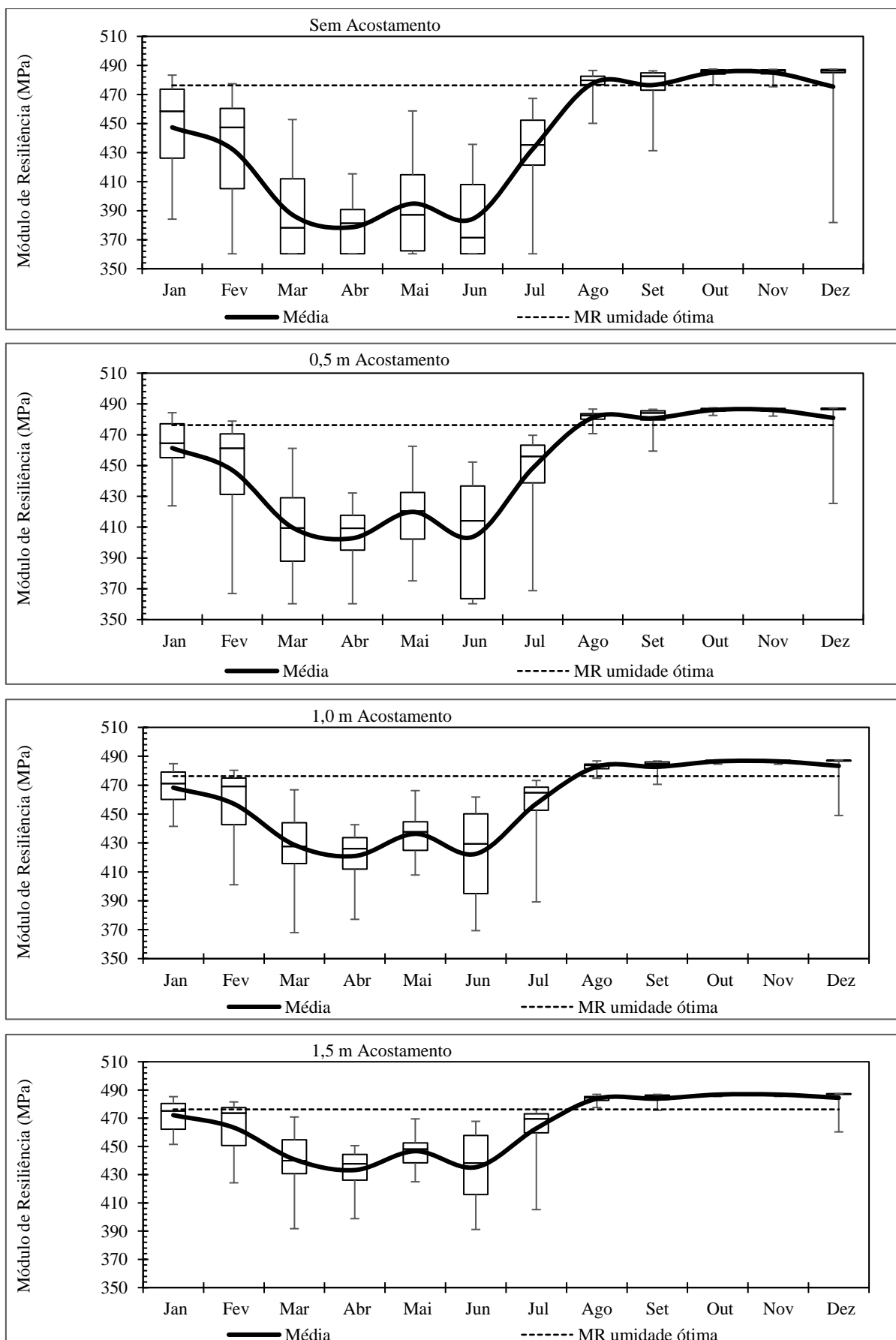


Figura E.27 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,0 m

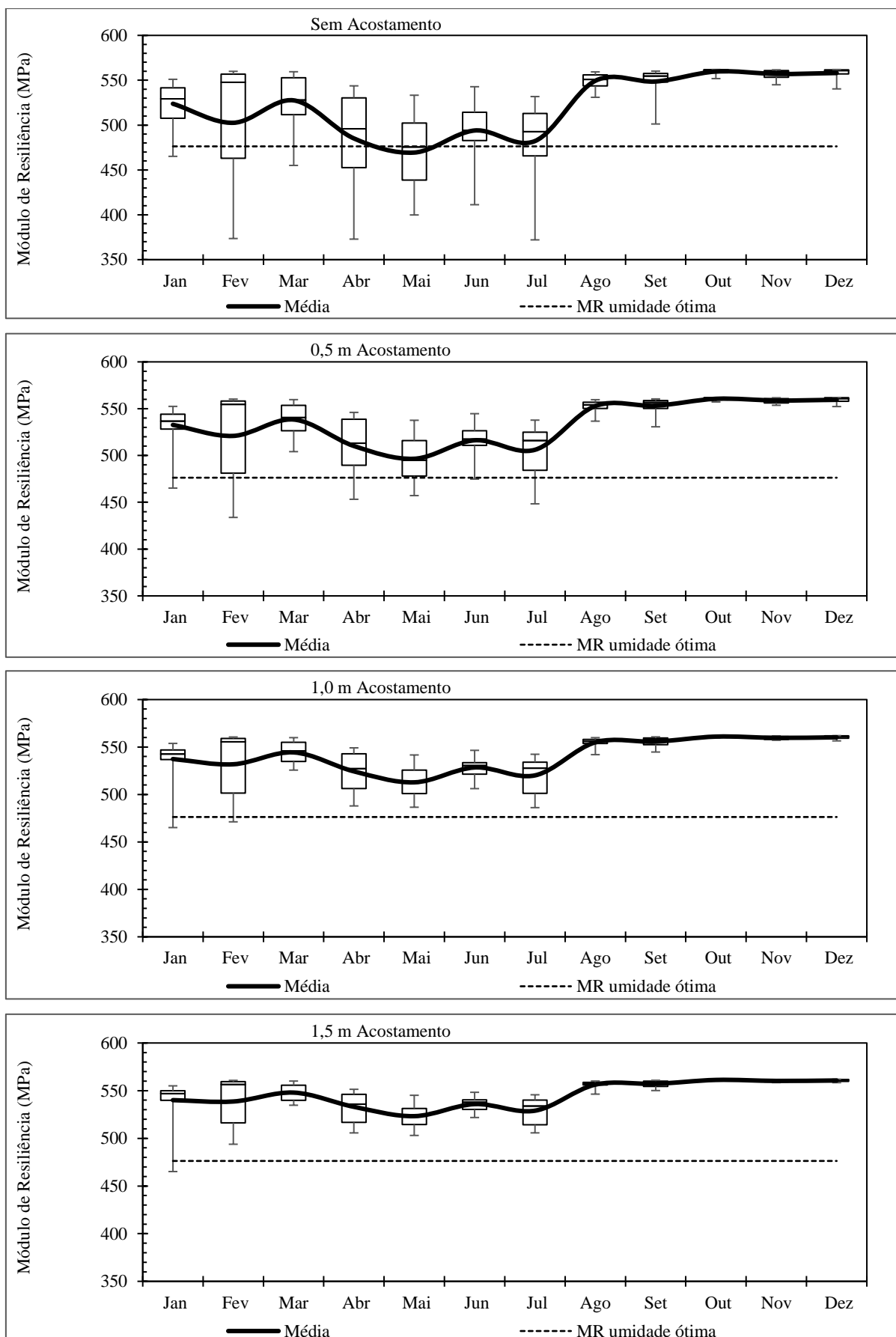


Figura E.28 – Série Histórica de 1994: Nível d'água – 4,5 m

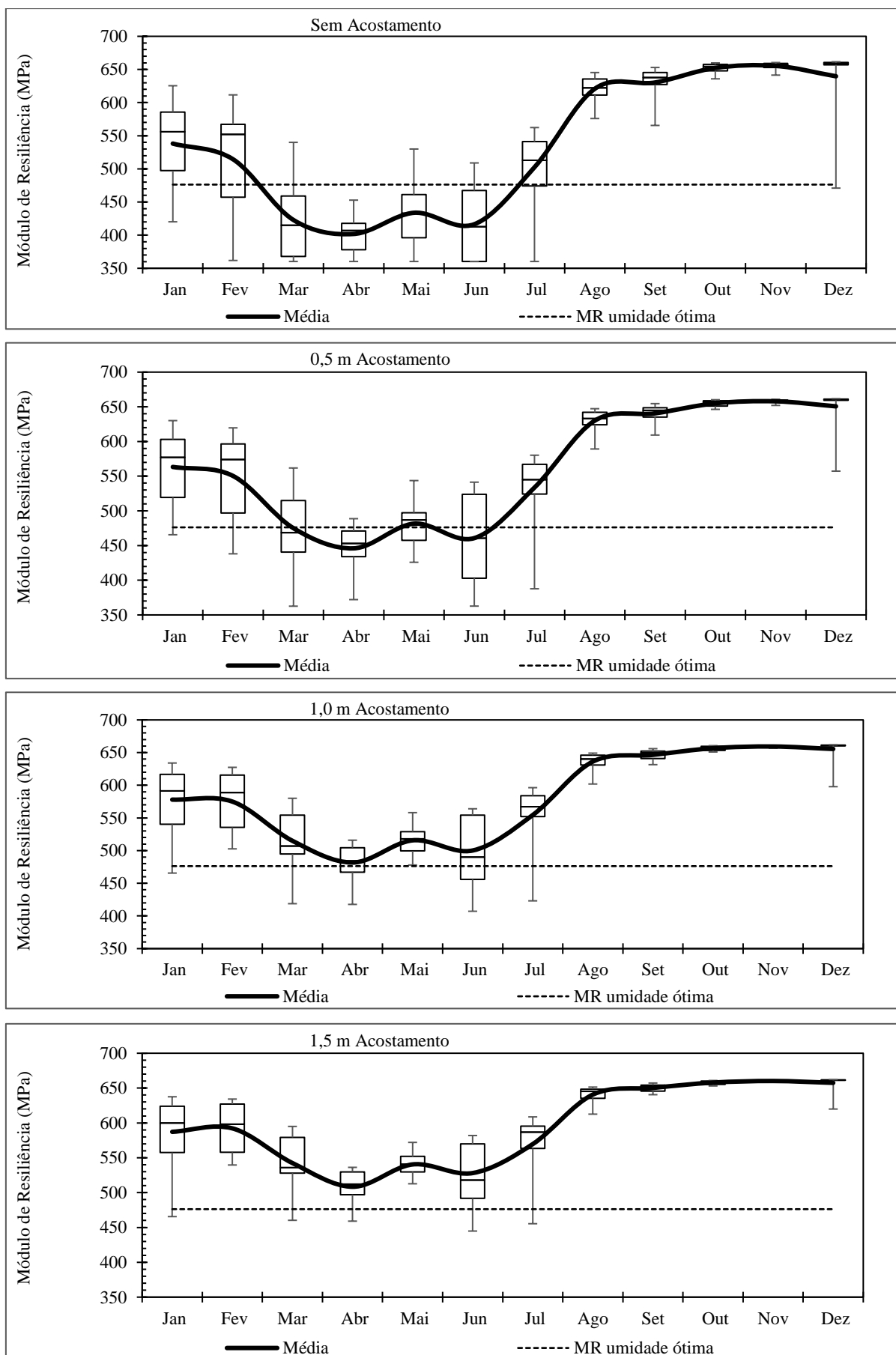


Figura E.29 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,0 m

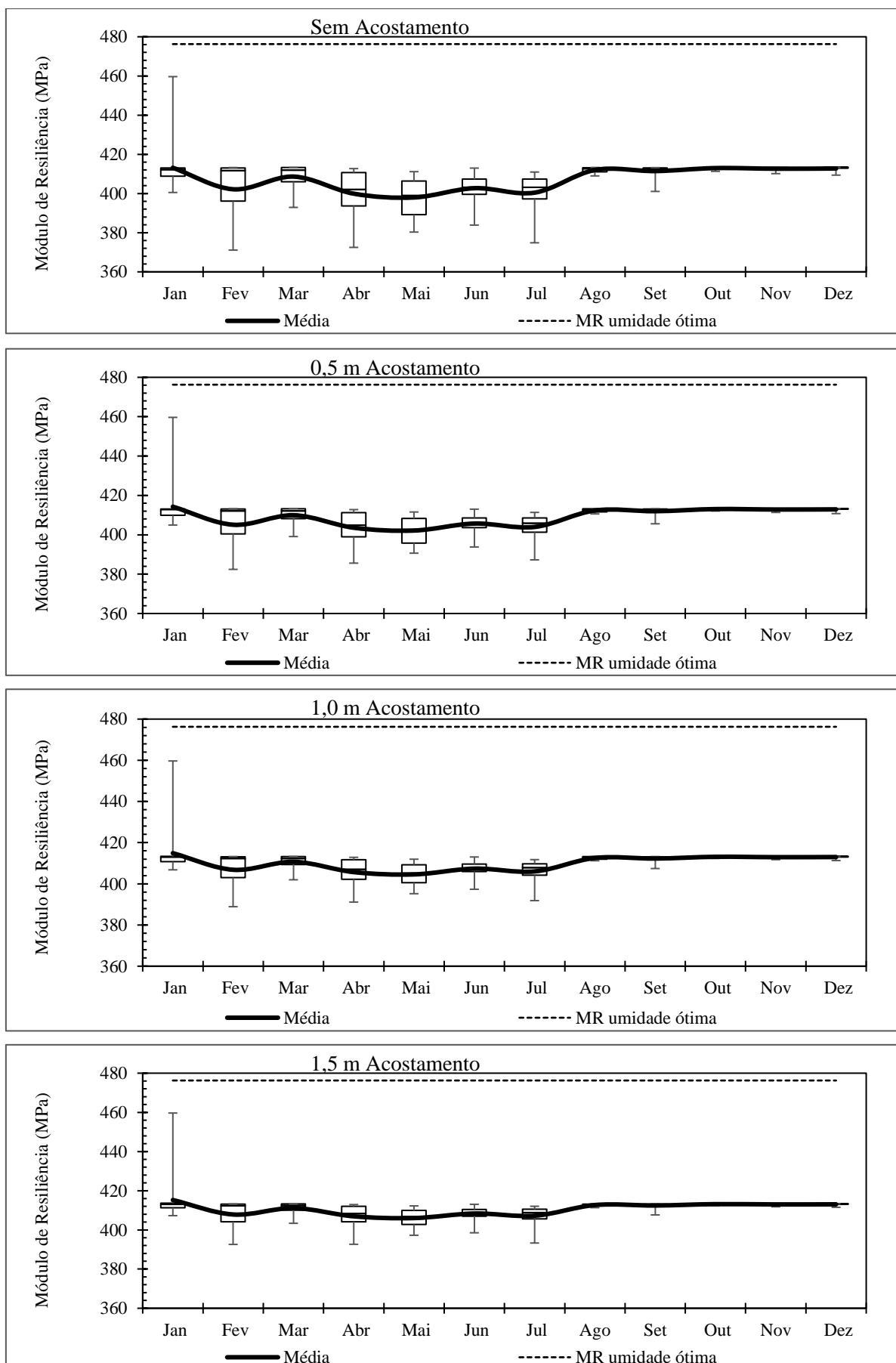


Figura E.30 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 3,5 m

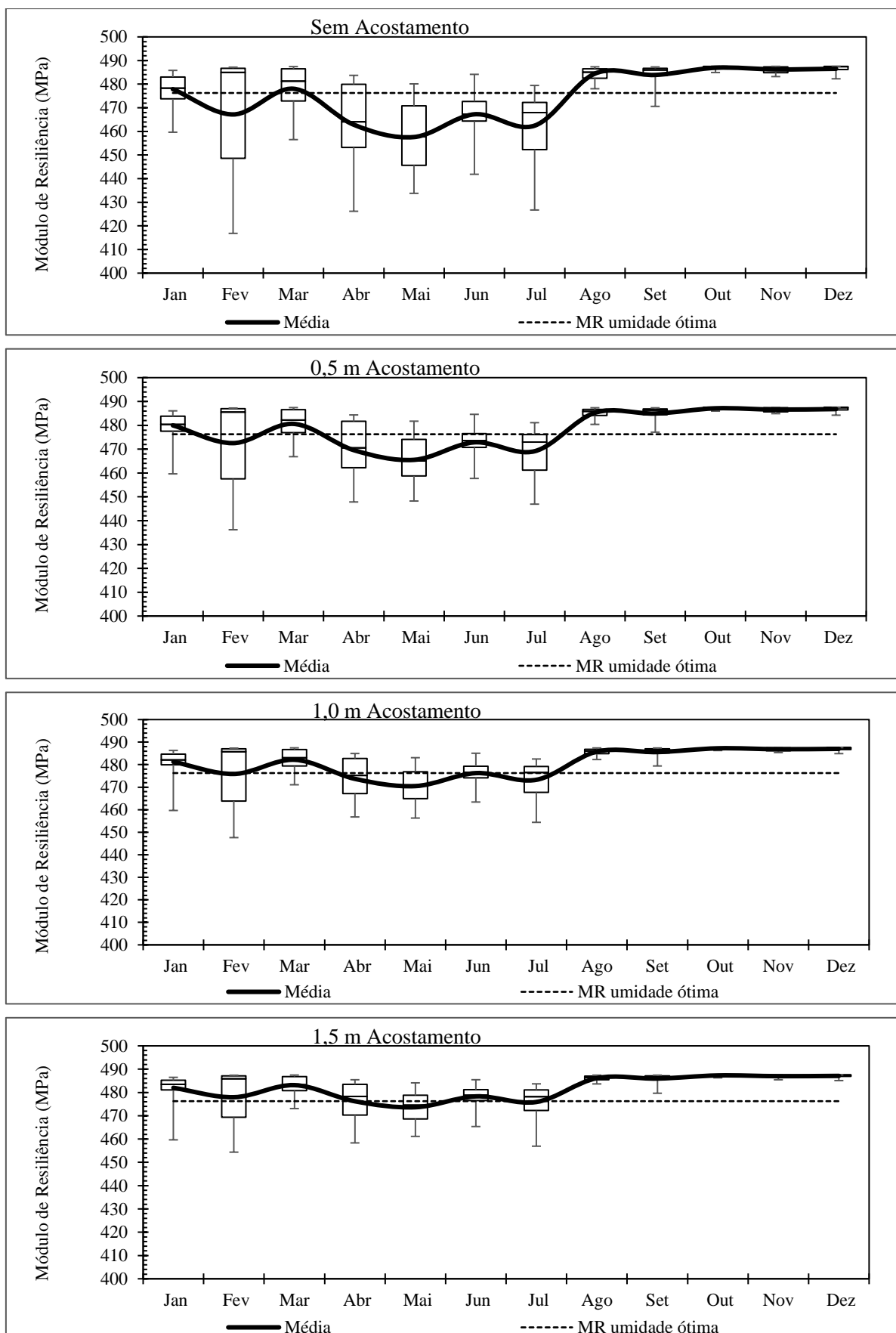


Figura E.31 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,0 m

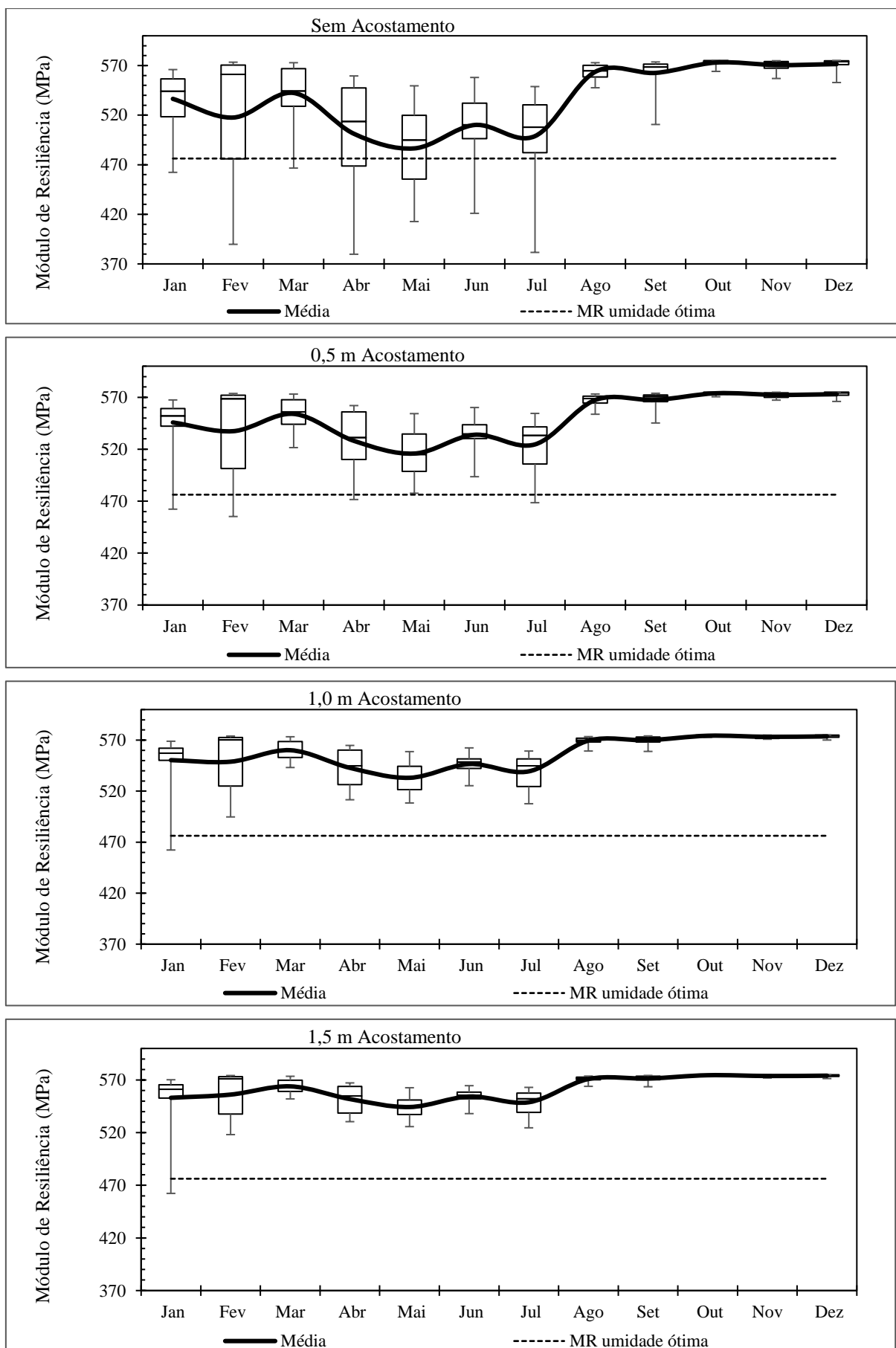


Figura E.32 – Série Histórica de 2013: Nível d'água – 4,5 m

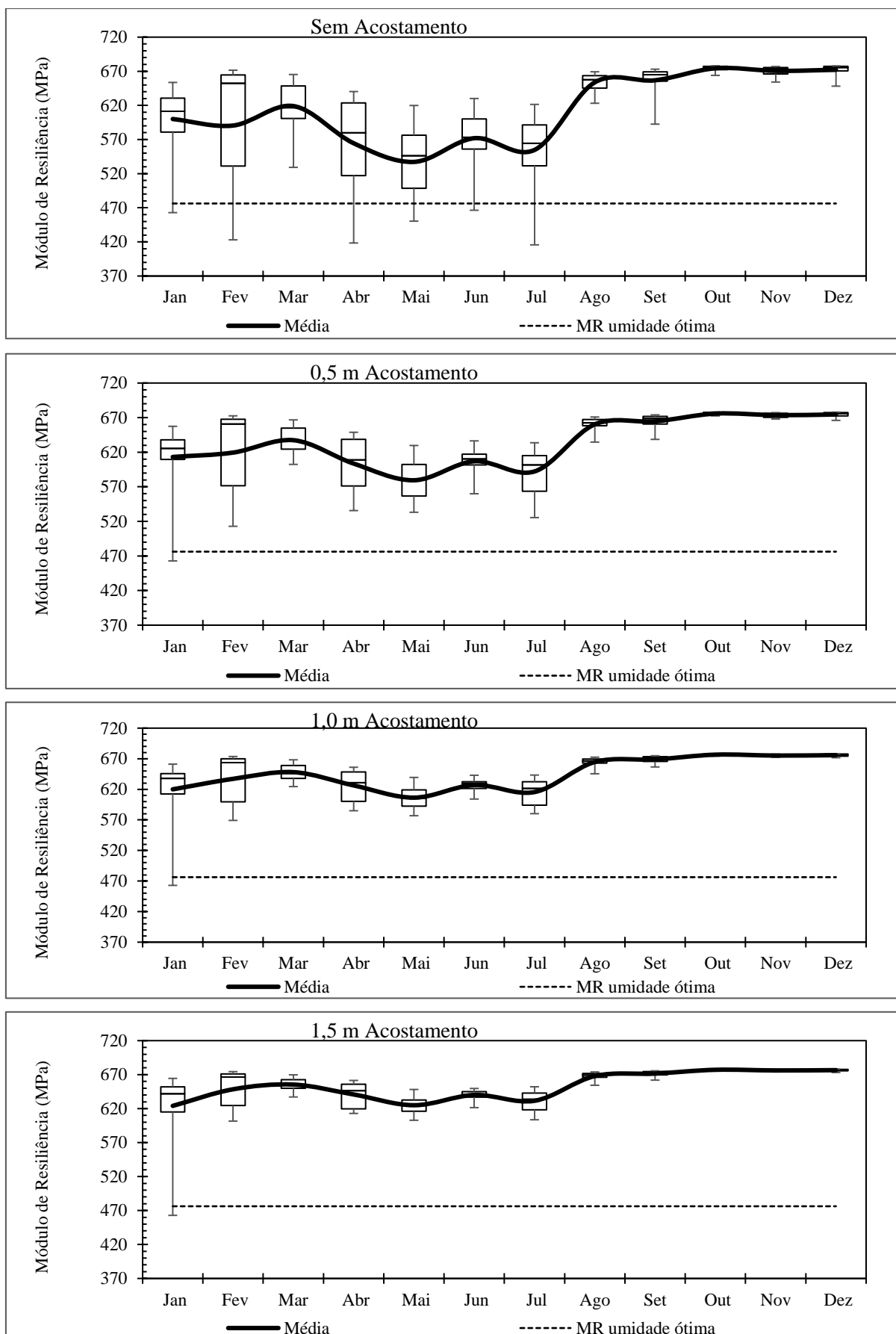


Figura E.33 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,0 m

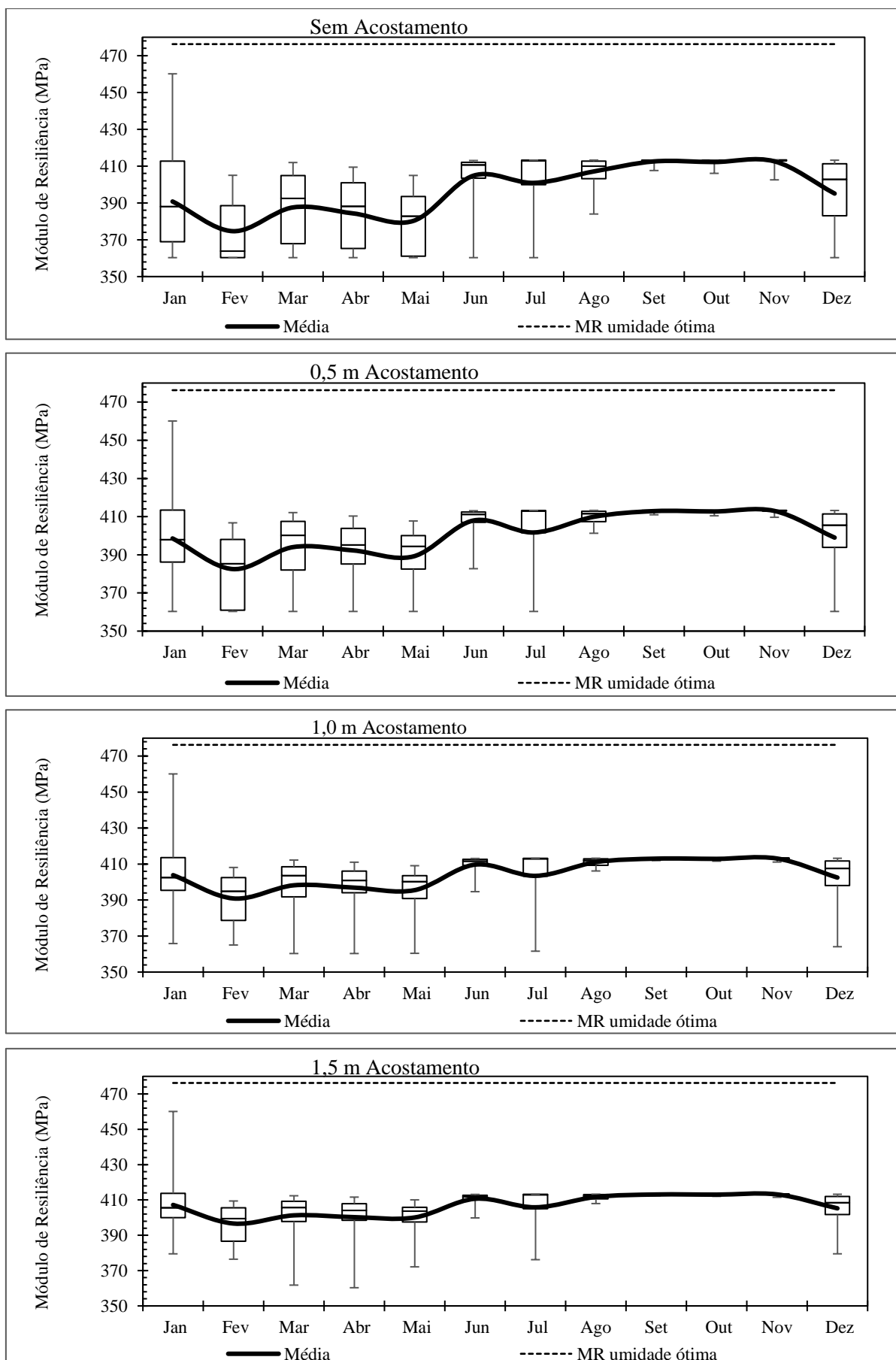


Figura E.34 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 3,5 m

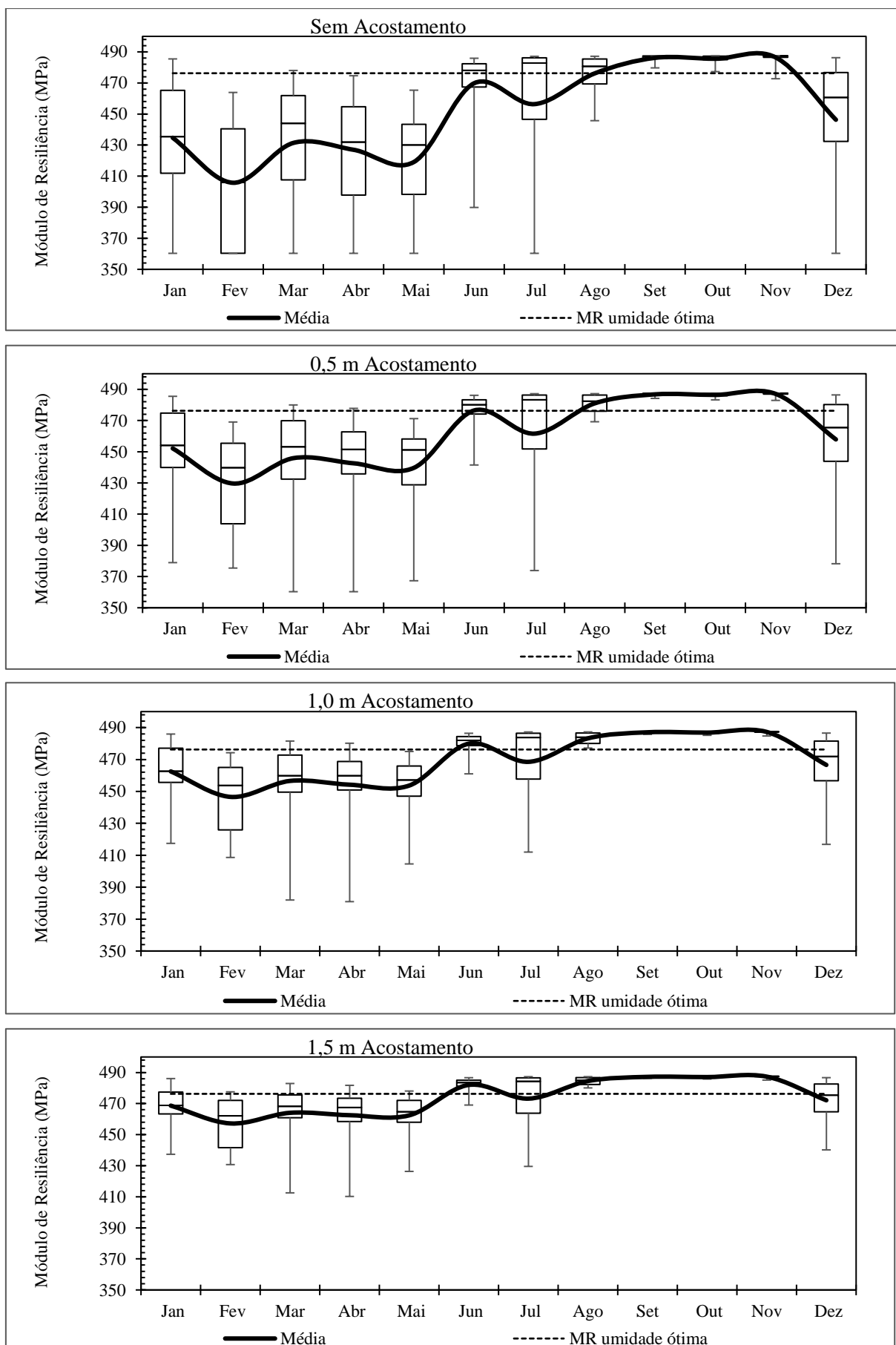


Figura E.35 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,0 m

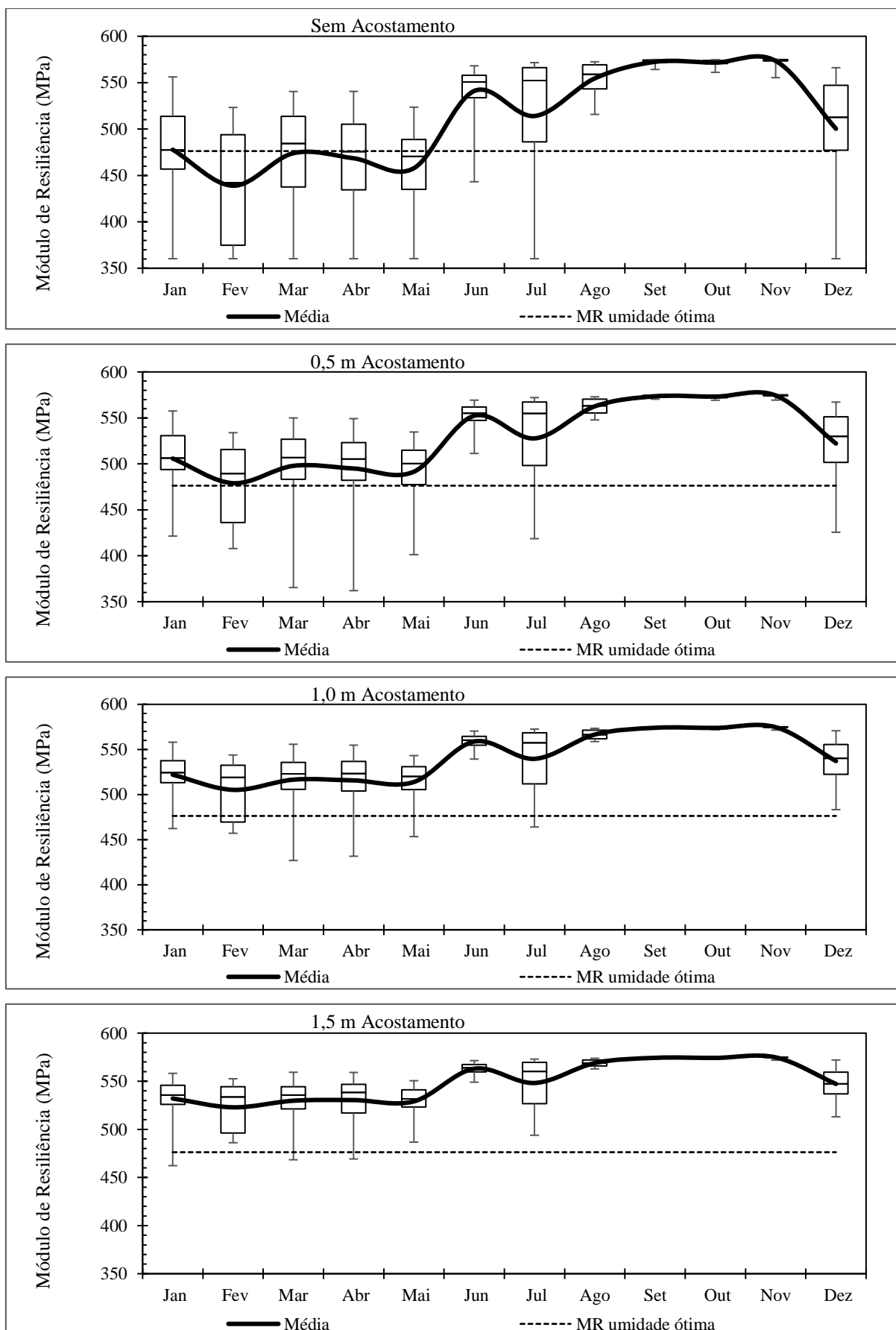


Figura E.36 – Série Histórica de 2018: Nível d'água – 4,5 m

