



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS HÍDRICOS)**

LUIZ MARTINS DE ARAÚJO JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÃO E ALERTA
PRECOCE DA SECA E ELABORAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PLANEJAMENTO
PROATIVO DE ADAPTAÇÃO ÀS SECAS URBANAS**

FORTALEZA

2018

LUIZ MARTINS DE ARAÚJO JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÃO E ALERTA PRECOCE
DA SECA E ELABORAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PLANEJAMENTO PROATIVO DE
ADAPTAÇÃO ÀS SECAS URBANAS

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a 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. Guilherme de Alencar Barreto

FORTALEZA

2018

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)

A69d Araújo Júnior, Luiz Martins de.

Desenvolvimento de um sistema de informação e alerta precoce da seca e elaboração de estratégias de planejamento proativo de adaptação às secas urbanas / Luiz Martins de Araújo Júnior. – 2018.
201 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.

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

Coorientação: Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto.

1. SIAPS. 2. Índices de seca. 3. Previsão sazonal. 4. Mecanismos proativos de resposta às secas. I. Título.
CDD 627

LUIZ MARTINS DE ARAÚJO JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÃO E ALERTA PRECOCE
DA SECA E ELABORAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PLANEJAMENTO PROATIVO DE
ADAPTAÇÃO ÀS SECAS URBANAS

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos hídricos.

Aprovada em: 21 / 09 / 2018

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof(a). Dr(a). Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Francisco Osny Éneas da Silva
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará

AGRADECIMENTOS

À Deus, por está me guiando na direção certa.

À toda a minha família, principalmente aos meus pais, Luiz Martins e Maria Alice, por sempre terem me incentivado a busca de um futuro melhor.

Ao Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho pela amizade, confiança e pela valiosa orientação ao longo da realização do trabalho até aqui desenvolvido.

Ao Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto por ter me auxiliado no desenvolvimento dos códigos de previsão sazonal por meio de redes neurais.

Aos demais componentes da banca examinadora pela disponibilidade de estar presente nesta defesa de tese bem como pelas sugestões que já foram me passada e pelas que irão ser corrigidas após o término desta.

À Pós-Graduação em Engenharia Civil pelas condições oferecidas para o desenvolvimento deste trabalho.

À FUNCEME pela disponibilização dos dados e pelo suporte técnico durante a realização deste trabalho.

À meus companheiros de pesquisa e estudo, Cleiton da Silva Silveira, Victor Costa Porto, Renan Vieira Rocha, João Dehon de Araújo Pontes Filho, Daniel Camelo Cid, Taís Maria Nunes Carvalho, Gabriela Azevedo Reis, Samíria Maria Oliveira da Silva, Sandra Helena Silva de Aquino, pelos momentos de descontração, apoio e incentivo a realização desta desta pesquisa.

À FUNCAP, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro, mediante bolsa de doutorado, durante partes do desenvolvimento deste trabalho.

E por fim, à todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

*“ Oh! Deus, perdoe este pobre coitado
Que de joelhos rezou um bocado
Pedindo pra chuva cair sem parar*

*Oh! Deus, será que o Senhor se zangou
E só por isso o sol se arretirou
Fazendo cair toda chuva que há*

*Senhor, eu pedi para o sol se esconder um tiquinho
Pedi pra chover, mas chover de mansinho
Pra ver se nascia uma planta no chão*

*Meu Deus, se eu não rezei direito o Senhor me perdoe,
Eu acho que a culpa foi
Desse pobre que nem sabe fazer oração*

*Meu Deus, perdoe eu encher os meus olhos de água
E ter-lhe pedido cheinho de mágoa
Pro sol inclemente se arretirar*

*Desculpe eu pedi a toda hora pra chegar o inverno
Desculpe eu pedir para acabar com o inferno
Que sempre queimou o meu Ceará”*

Waldeck Artur de Macedo / Luiz Gonzaga

RESUMO

O objetivo desse trabalho é criar um sistema de informação e alerta precoce de seca (SIAPS), fundamentado no monitoramento e previsão de variáveis hidrometeorológicas e índices de seca, no intuito de dar suporte para a elaboração de planejamento adaptativo urbano de seca. O local de desenvolvimento desse estudo é o Sistema Jaguaribe Metropolitana. O estudo utiliza diferentes métodos de previsão de afluências e/ou volumes na bacia hidrográfica da região de aplicação. Os métodos utilizados foram: o *downscaling* dinâmico acoplado ao modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, SMAP, um método semi-paramétrico baseado em uma técnica de reamostragem da série histórica de vazão e em um método baseado em técnica de rede neural. A partir desses métodos de previsão foi feito um ensemble de multi-modelos conhecido como *pooled ensemble* e um teste de desempenho do ensemble multi-modelos também foi realizado. Em seguida, dados de vazão prevista do ensemble serviram de entrada para um modelo de operação de reservatórios modelo de operação de reservatórios capaz de receber as vazões previstas e dado o volume atual do Sistema Jaguaribe-Metropolitano prognosticar os Níveis Metas (NM) e o Nível de Racionamento (Nrac) que serviram como indicadores do estado de seca atual e futura. Os limiares para cada estado de seca (Normal, Pré-Alerta, Alerta, Emergência I e Emergência II) dados pelo volumes metas do modelo de operação servirão como gatilho para disparar ações de mitigação e resposta às secas. Com a computação do NM e Nrac, foi possível fazer uma integração entre os dados de monitoramento e de previsão, possibilitando a identificação de vulnerabilidades hidroclimáticas e o desenvolvimento de uma matriz de planejamento de aversão ao risco de seca. Dessa maneira é possível concluir que o SIAPS aqui proposto possibilita um avanço na gestão de secas, permitindo a identificação prévia de vulnerabilidades do sistema hídrico, bem como servindo como suporte para a elaboração de planejamento adaptativo urbano de seca, possibilitando os tomadores de decisões utilizar de uma visão de gerenciamento de riscos de seca, o que possibilita ações proativas de mitigação e resposta, quebrando um ciclo histórico de ações reativas de combate e convivência com a seca.

Palavras chave: SIAPS, Índices de Seca, Previsão Sazonal e Mecanismos Proativos de resposta as secas.

ABSTRACT

The objective of this work is to create an Information System and Early Warning of Drought (SIAPS), based on the monitoring and prediction of hydrometeorological variables and drought indexes, in order to support the elaboration of adaptive urban drought planning. The place of development of this study is the Metropolitan Jaguaribe System. The study uses different methods of forecasting inflows and / or volumes in the basin of the application region. The methods used were: dynamic downscaling coupled to the rainfall-flow hydrological model, SMAP, a semi-parametric method based on a re-sampling technique of the historical flow series and a method based on neural network technique. From these prediction methods was made a multi-model ensemble known as pooled ensemble and a performance test of the multi-ensemble was also performed. Then, predicted flow data from the ensemble served as input for a model of operation of reservoirs model of operation of reservoirs capable of receiving the predicted flows and given the current volume of the Jaguaribe-Metropolitan System to predict the target levels (NM) and rationing Level (Nrac) that served as indicators of current and future drought conditions. The thresholds for each drought state (Normal, Pre-Alert, Alert, Emergency I and Emergency II) given by the operating model targets will serve as triggers for triggering mitigation and drought response actions. With the computation of NM and Nrac, it was possible to integrate the monitoring and forecasting data, allowing the identification of hydroclimatic vulnerabilities and the development of a drought risk aversion planning matrix. In this way, it is possible to conclude that the SIAPS proposed here allows an advance in the management of droughts, allowing the previous identification of vulnerabilities of the water system, as well as serving as support for the elaboration of adaptive urban drought planning, making it possible for decision makers to use a drought risk management vision, which enables proactive actions of mitigation and response, breaking a historical cycle of reactive actions of combat and coexistence with the drought.

Keywords: SIAPS, Drought Indexes, Seasonal Forecast and Proactive Mechanisms
Mecanismos Proativos of dry responses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Hidro-ilógico.....	39
Figura 2 – Planejamento da seca nas visões de gerenciamento de risco e de crise.....	40
Figura 3 – Sistema de abastecimento Jaguaribe-Metropolitana.....	52
Figura 4 – Fluxograma do sistema de gerenciamento de seca.....	55
Figura 5 – Esquema utilizado do <i>downscaling</i> dinâmico acoplado ao modelo hidrológico.....	57
Figura 6 – Fluxograma síntese do algoritmo de previsão sazonal multivariado dados um conjunto de preditores climático.....	59
Figura 7 – Fluxograma representativo de uma rede neural ELM.....	60
Figura 8 – Fluxograma representativo de uma rede neural MLP com uma camada oculta.....	63
Figura 9 – Regra de operação.....	75
Figura 10 – Volumes metas dos reservatórios equivalentes (a) Jaguaribe e (b) Metropolitano.....	77
Figura 11 – Etapas metodológicas para a elaboração de um plano de secas urbano.....	82
Figura 12 – Relógio da seca.....	87
Figura 13 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Banabuiú.....	176
Figura 14 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Castanhão.....	177
Figura 15 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Orós.....	178
Figura 16 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Pacajus.....	179
Figura 17 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o conglomerado Pacoti, Riachão e Gavião.....	180

Figura 18 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Banabuiú com TSM inicializada em janeiro.....	108
Figura 19 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Banabuiú com TSM inicializada em julho.....	109
Figura 20 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Castanhão com TSM inicializada em janeiro.....	110
Figura 21 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Castanhão com TSM inicializada em julho.....	111
Figura 22 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Orós com TSM inicializada em janeiro.....	112
Figura 23 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Orós com TSM inicializada em julho.....	113
Figura 24 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacajus com TSM inicializada em janeiro.....	114
Figura 25 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacajus com TSM inicializada em julho.....	115
Figura 26 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacoti-Riachão-Gavião com TSM inicializada em janeiro.....	116
Figura 27 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacoti-Riachão-Gavião com TSM inicializada em julho.....	117
Figura 28 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do <i>pooled ensemble</i> para o reservatório Banabuiú.....	181
Figura 29 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do <i>pooled ensemble</i> para o reservatório Castanhão.....	182
Figura 30 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do <i>pooled ensemble</i> para o reservatório Orós.....	183

Figura 31 – Índices de desempenho das configurações de agrupamento do <i>pooled ensemble</i> para o reservatório Pacajus.....	184
Figura 32 – Índices de desempenho das configurações de agrupamento do <i>pooled ensemble</i> para o reservatório Pacoti-Riachão-Gavião.....	185
Figura 33 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 1.....	125
Figura 34 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 1.....	125
Figura 35 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 2.....	126
Figura 36 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 2.....	127
Figura 37 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 3.....	128
Figura 38 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 3.....	128
Figura 39 – Evolução da operação de 2004 do REJ para o Cenário 1.....	192
Figura 40 – Evolução da operação de 2004 do REM para o Cenário 1.....	193
Figura 41 – Evolução da operação de 2004 do REJ para o Cenário 2.....	194
Figura 42 – Evolução da operação de 2004 do REM para o Cenário 2.....	194
Figura 43 – Evolução da operação de 2004 do REJ para o Cenário 3.....	195
Figura 44 – Evolução da operação de 2004 do REJ para o Cenário 3.....	195
Figura 45 – Evolução da operação de 2004 do REM para o Cenário 4.....	196
Figura 46 – Evolução da operação de 2004 do REJ para o Cenário 4.....	196
Figura 47 – Diagrama da metodologia PEIR aplicada a ETA.....	131
Figura 48 – Diagrama da metodologia PEIR aplicado ao Sistema de reservação, adução e distribuição.....	134
Figura 49 – Diagrama da metodologia PEIR aplicada ao consume hídrico.....	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Pilares de preparação para a seca.....	54
Quadro 2	– Questionário de levantamento das ações a serem tomadas em cada nível de severidade de seca.....	161
Quadro 3	– Continuação do Quadro 2.....	162
Quadro 4	– Caracterização dos estados de seca, tipos de medidas e nível de planejamento.....	88
Quadro 5	– Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para fase Normal.....	163
Quadro 6	– Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Pré-Alerta.....	164
Quadro 7	– Continuação do Quadro 6.....	165
Quadro 8	– Continuação do Quadro 7.....	166
Quadro 9	– Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para fase de Alerta	167
Quadro 10	– Continuação do Quadro 9.....	168
Quadro 11	– Continuação do Quadro 10.....	169
Quadro 12	– Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Emergência I.....	170
Quadro 13	– Continuação do Quadro 12.....	171
Quadro 14	– Continuação do Quadro 13.....	172
Quadro 15	– Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Emergência II.....	173
Quadro 16	– Continuação do Quadro 15.....	174
Quadro 17	– Continuação do Quadro 16.....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Índices de verificação de previsão com seus respectivos símbolos, formulas, valores ideais e faixa de variação.....	68
Tabela 2	– Limiares dos índices SPI e SRI com as devidas categorias e estados.....	72
Tabela 3	– Categorização dos índices IE, IS e NM.....	73
Tabela 4	– Síntese do método de análise de contingência, com indicativo dos cálculos de POD e FAR.....	74
Tabela 5	– Relação entre os agrupamentos de estado e grau de severidade da seca...	74
Tabela 6	– Coeficientes de racionamento.....	76
Tabela 7	– Matriz simbólica de planejamento com aversão ao risco de seca.....	80
Tabela 8	– Valores anuais entre 1913 e 1937 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.....	91
Tabela 9	– Valores anuais entre 1938 e 1962 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.....	92
Tabela 10	– Valores anuais entre 1963 e 1987 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.....	93
Tabela 11	– Valores anuais entre 1988 e 2012 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.....	94
Tabela 12	– Valores anuais entre 1913 e 1937 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.....	95
Tabela 13	– Valores anuais entre 1938 e 1962 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.....	96
Tabela 14	– Valores anuais entre 1963 e 1987 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.....	97

Tabela 15	– Valores anuais entre 1988 e 2012 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.....	98
Tabela 16	– Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, na RHJ.....	101
Tabela 17	– Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, na RMF.....	102
Tabela 18	– Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do NM nas RHJ e RMF.....	102
Tabela 19	– Razão de verossimilhança das vazões previstas pela modelagem dinâmica para os reservatórios do SJM.....	106
Tabela 20	– Razão de verossimilhança das vazões previstas pelo método dos k-vizinhos para os reservatórios do SJM.....	106
Tabela 21	– Síntese do número de neurônios ocultos da rede ELM-RLS que tiveram melhores desempenhos estatísticos.....	118
Tabela 22	– Razão de verossimilhança das vazões previstas pela rede ELM-RLS associado a um bootstrap dos resíduos para os reservatórios do SJM.....	119
Tabela 23	– Configuração de agrupamento para realização de <i>pooled ensemble</i>	120
Tabela 24	– Razão de verossimilhança das vazões previstas pelo <i>pooled ensemble</i> para os reservatórios do SJM.....	122
Tabela 25	– Associação entre cenários de previsão e <i>ensembles</i> equiprováveis.....	123
Tabela 26	– Volumes observados no intervalo 2004 a 2015 agregadas para os REJ e REM nos meses de tomada de decisão.....	124
Tabela 27	– Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2004 e 2008 para o Jaguaribe.....	186
Tabela 28	– Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2009 e 2013 para o Jaguaribe.....	187
Tabela 29	– Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2014 e 2015 para o Jaguaribe.....	188
Tabela 30	– Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2004 e 2008 para o Metropolitano.....	189

Tabela 31 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2009 e 2013 para o Metropolitano.....	190
Tabela 32 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2014 e 2015 para o Metropolitano.....	191
Tabela 33 – Matriz simbólica da probabilidade de transição entre os estados de seca	197
Tabela 34 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 1 para o REJ.....	197
Tabela 35 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 1 para o REM.....	198
Tabela 36 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 2 para o REJ.....	199
Tabela 37 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 2 para o REM.....	199
Tabela 38 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 3 para o REJ.....	200
Tabela 39 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 3 para o REM.....	201

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABARES – Conselho Australiano de Agricultura, Recursos Econômicos e Ciências
ANN – *Artificial Neural Network*
ARIMA – Modelos Regressivos de Auto Correlação Integrados com Médias Móveis
CANN – *Cluster-based ANN*
CIPP – Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CMI – *Crop Moisture Index*
CNCC – *China National Climate Center*
COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
CPC – *Climate Prediction Center*
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DIJA – Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi
DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EB's – Estações de Bombeamento
ECHAM4.5 – *European Community-Hamburg* versão 4.5
ELM – *Extreme Learning Machines*
ENOS – El Niño-Oscilação Sul
ETA – Estação de Tratamento de Água
EUA – Estados Unidos
FAR – Falso Alarme
FNN – Feed-Forward
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GTDN – Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento Econômico do Nordeste
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IE – Indicador de Estado
IFOCS – Inspeção Federal de Obras Contra as Secas
IMA – Índice Municipal de Alerta
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOCS – Inspeção de Obras Contra as Secas
IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

IRI – *International Research Institute*
IS – Índice Sintético
LI – Linhas de Instabilidade
LMS – *Least Mean Square*
MAM – Março à maio
MEDALUS – *Mediterranean Desertification and Land Use*
MEDROPLAN – *Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning*
MGGAs – Modelos de Circulação Geral da Atmosfera
MLP – *Multi Layer Perceptrons*
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NARX – Não-linear Autorregressivo com Variáveis Exógenas
NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*
NDMS – Departamento Nigeriano de Serviços Meteorológicos
NFN – *Neo-Fuzzy Neuron*
NSRBN – Rede Composta por Blocos de Regressões Sigmóides Não-Lineares
NEB – Nordeste Brasileiro
NM – Nível Meta
Nrac – Nível de racionamento
ODP – Oscilação Decadal do Pacífico
OL – Ondas de Leste
PCA – Análises das Componentes Principais
PDFs – Frequências diárias das amostras
PDSI – *Palmer Drought Severity Index*
PEIR – Pressão-Estado-Impacto-Resposta
PIB – Produto Interno Bruto
POD – Poder de Detecção
RAMS – *Regional Atmospheric Modeling System*
RDI – *Reclamation Drought Index*
REJ – Reservatório Equivalente do Jaguaribe
REM – Reservatório Equivalente da Metropolitana
RHJ – Região Hidrográfica do Jaguaribe
RLS – *Recursive Least Square*
RMF – Região Metropolitana de Fortaleza
RNAs – Redes Neurais Artificiais

RSM – *Regional Spectral Model*

SAPS – Sistema de Alerta Precoce de Seca

SIAPS – Sistema de informação e Alerta Precoce de Seca

SF – Sistemas Frontais

SJM – Sistema Jaguaribe-Metropolitana

SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure*

SPEI – *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*

SPI – *Standardized Precipitation Index*

SRH – Secretária de Recursos Hídricos

SRI – *Standardized Runoff Index*

SRN – Rede Neural Recorrente Simples

SSD – Sistema de Suporte a Decisão

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

SWSI – *Surface Water Supply Index*

TAN – Temperaturas do Atlântico Norte

TANN – *Threshold-based ANN*

TAN – Temperaturas do Atlântico Sul

TDEC – Departamento do Meio Ambiente e Conservação de Tennessee

TDNN – Rede Neural de um Passo à Frente com Atrasadores

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNDP-DCC – Programa de Desenvolvimento das Terras Secas do Centro de Desenvolvimento das Nações Unidas

UNISDR – Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	Objetivos.....	23
1.2	Contribuição científica e tecnológica.....	23
1.3	Estrutura do trabalho.....	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
2.1	Breve histórico das secas e das políticas públicas no Nordeste Brasileiro	26
2.2	Clima, variabilidade e a previsão sazonal.....	30
2.2.1	<i>Variabilidade climática no NEB.....</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Sistemas meteorológicos atuantes no regime pluviométrico no NEB.....</i>	<i>31</i>
2.2.3	<i>Previsão sazonal climático-hidrológica.....</i>	<i>32</i>
2.2.3.1	<i>Modelagem hidroclimática dinâmica e estatística acoplada.....</i>	<i>34</i>
2.2.3.2	<i>Modelagem climática e/ou hidrológica utilizando redes neurais.....</i>	<i>37</i>
2.3	Gestão de risco da seca e aplicações em forma de planejamento.....	39
2.4	Sistemas de alerta precoce de seca e experiências.....	43
2.5	Índices de seca.....	47
3	LOCAL DE APLICAÇÃO: SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANA.....	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1	Obtenção de dados do sistema hídrico Jaguaribe-Metropolitana.....	53
4.2	Sistema de gerenciamento de seca.....	54
4.2.1	<i>Modelos de previsão de afluências e/ou volume.....</i>	<i>56</i>
4.2.1.1	<i>Downscaling dinâmico acoplado a um modelo chuva-vazão.....</i>	<i>56</i>
4.2.1.2	<i>Método dos k-vizinhos.....</i>	<i>58</i>
4.2.1.3	<i>Método de redes neurais com múltiplas entradas e uma saída.....</i>	<i>59</i>
4.2.1.3.1	<i>Desagregação e bootstrap dos dados de saída das RNA.....</i>	<i>65</i>
4.2.2	<i>Ensemble de multi-modelos e verificação de previsão.....</i>	<i>67</i>
4.2.3	<i>Metodologia dos indicadores de seca utilizados e da avaliação de desempenho.....</i>	<i>70</i>
4.2.3.1	<i>Indicadores meteorológicos.....</i>	<i>71</i>
4.2.3.2	<i>Indicadores hidrológicos.....</i>	<i>72</i>
4.2.3.3	<i>Avaliação de desempenho.....</i>	<i>73</i>
4.2.4	<i>Operação do SJM.....</i>	<i>74</i>

4.2.5	<i>Matriz de transição entre os estados de seca</i>	75
4.2.6	<i>Matriz de planejamento de aversão ao risco</i>	79
4.3	Processos para o planejamento de seca	81
4.3.1	<i>Fases do planejamento</i>	81
4.3.2	<i>Etapas metodológicas do planejamento</i>	82
4.3.2.1	<i>Descrição do hidrossistema</i>	83
4.3.2.2	<i>Sistema de informação e alerta precoce</i>	83
4.3.2.3	<i>Avaliação de impactos e vulnerabilidades do sistema hídrico</i>	84
4.3.2.4	<i>Estratégias de preparação, mitigação e resposta</i>	85
4.3.2.5	<i>Estados e gatilhos de seca</i>	86
4.3.2.6	<i>Plano de ações de preparação, mitigação e resposta</i>	88
4.3.2.7	<i>Implementação e acompanhamento</i>	88
4.3.2.8	<i>Revisão e atualização do plano</i>	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
5.1	Análise qualitativa e quantitativa dos índices de seca	90
5.1.1	<i>Análise qualitativa para o Sistema Jaguaribe-Metropolitana</i>	90
5.1.2	<i>Análise quantitativa para o Sistema Jaguaribe-Metropolitana</i>	99
5.2	Resultados do Sistema de Gerenciamento de Seca	103
5.2.1	<i>Avaliação do desempenho da previsão por modelagem dinâmica e estatística</i>	103
5.2.2	<i>Avaliação do desempenho da previsão por redes neurais do tipo MISO</i>	107
5.2.3	<i>Bootstrap da rede ELM-RLS e seu desempenho</i>	118
5.2.4	<i>Avaliação do desempenho da previsão por ensemble</i>	119
5.2.5	<i>Resultados da operação com vazões prevista pelo pooled ensemble e suas probabilidades de ocorrências futuras</i>	122
5.3	Análises de vulnerabilidades do sistema	130
5.3.1	<i>Estudo de caso para o sistema de abastecimento Jaguaribe-Metropolitana</i>	130
5.3.1.1	<i>Estação de Tratamento de Água (ETA)</i>	130
5.3.1.2	<i>Reservação, adução e rede de distribuição</i>	133
5.3.1.3	<i>Consumo</i>	135
5.4	Estágios, gatilhos, metas de respostas e ações de preparação às secas	137
5.4.1	<i>Normal</i>	138
5.4.2	<i>Pré-Alerta</i>	138
5.4.3	<i>Alerta</i>	138
5.4.4	<i>Emergência I</i>	138

5.4.5	<i>Emergência II</i>	139
5.5	Aplicação do Sistema de Gerenciamento de Seca como uma ferramenta proativa para o planejamento da seca da Região Metropolitana de Fortaleza	139
6	CONCLUSÕES	142
	REFERÊNCIAS	147
	APÊNDICE A	161
	APÊNDICE B	163
	APÊNDICE C	176
	APÊNDICE D	181
	APÊNDICE E	186
	APÊNDICE F	192

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno recorrente que afeta ecossistemas, setores econômicos e sociais. No Nordeste Brasileiro (NEB), entre 2011 e 2016, ocorreu um dos maiores ciclos de seca da região fazendo com que a maioria dos estoques de água armazenados nos açudes chegassem a níveis críticos (MARENGO *et al.*, 2017 ; MARTINS *et al.*, 2018). Visando buscar o equilíbrio da oferta de água, poços profundos, chafarizes, adutoras de montagem rápida montadas têm sido construídas e a utilização de dessalinizadores da água do mar tem sido estudada. Em âmbito histórico, no NEB as secas ocasionam perdas na pecuária, na agricultura de sequeiro e comprometem o abastecimento de água para as pessoas e animais que habitam a região (SOBRINHO, 1982).

O Brasil vem sofrendo um quadro de secas por todo o país, o período entre 2014 e 2015 deixou as concessionárias de energia elétrica em alerta, em virtude das baixas vazões que chegaram aos reservatórios das principais hidrelétricas. Isso levou ao acionamento das termelétricas e, conseqüentemente, a um encarecimento dos custos de produção de energia no país (GALVÃO e BERMANN, 2015; FACHINI, 2015).

Eventos como esses, que vem ocorrendo no Brasil, mostram a necessidade de se aprimorar as ações e/ou políticas atuais utilizadas na problemática da seca. As ações tomadas hoje em dia são de “combate” às secas em vez de preparação e mitigação da mesma (GUTIÉRREZ *et al.*, 2014).

No contexto global, nos últimos anos a severidade das secas tem aumentado cada vez mais em países como África, Austrália, Brasil, Estados Unidos e Portugal, alertando para a falta de uma política pública mais eficaz na mitigação deste evento (WILHITE *et al.*, 2005; GUTIÉRREZ *et al.*, 2014). Isso não se resume apenas no desenvolvimento de estratégias e/ou ações de combate, mas na elaboração de plano de preparação para às secas que envolva monitoramento, previsão, avaliação de vulnerabilidades, prevenção e assistência na resposta aos impactos da seca.

Nesse âmbito, o monitoramento da seca tem o papel de identificar os condicionantes, a evolução histórica e o grau de severidade atual, além de apontar os possíveis impactos e vulnerabilidades relacionados ao sistema que se estabelece a escassez hídrica. O planejamento, tem por finalidade definir estratégias de preparação, mitigação e resposta às secas, e ainda determinar gatilhos e ações compatíveis com os estados de seca.

Diante das deficiências de planejamento e gestão de secas, e das conseqüências cada vez mais impactantes nos diversos setores da sociedade e da economia, nota-se a

carência de estudos que contemplem mecanismos técnicos proativos, que além de apontarem as vulnerabilidades de uma região ajudem a tomadas de decisões eficientes.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia em que se definirá um conjunto de medidas a serem tomadas de forma contínua, desde estados de normalidade até quadros de seca extrema, além do desenvolvimento de um sistema de monitoramento e alerta precoce de seca com o intuito de mitigar e prever a situação de uma região a respeito da seca. Para efeitos de teste será realizado um estudo de caso sobre o sistema de abastecimento urbano de Fortaleza.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um sistema de informação e alerta precoce de seca, fundamentado no monitoramento e previsão de variáveis meteorológicas, hidrológicas e índices de seca, além de elaborar uma proposta metodológica de planejamento adaptativo para diversos graus de severidade de seca em bacia hidrográfica.

Os objetivos específicos são:

- Identificar os indicadores mais apropriados para a seca, a qual impacta na acumulação de água nos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitana;
- Definir gatilhos para tomadas de ações em conformidade com cada estado de seca;
- Simular um sistema de monitoramento e previsão sazonal de vazões e/ou índices de seca a fim de desenvolver um sistema de informação e alerta precoce de seca para o Sistema Jaguaribe-Metropolitana;
- Propor uma metodologia de planejamento indicando ações de mitigação e resposta para gerenciamento adaptativo da seca.

1.2 Contribuições científica e tecnológica

Diante da tendência de aumento do número de secas e do agravamento da severidade da mesma devido a interferência das mudanças climáticas aliado ao exagerado crescimento populacional e econômico da sociedade (MARENGO, 2006), os impactos da escassez hídrica sobre os múltiplos setores serão cada vez maiores e piores. Enfrentar

tais eventos utilizando ações reativas e imediatistas será cada vez mais ineficiente e arriscado para a sociedade.

Nesse âmbito, apesar do Brasil ter um aparato legal (Lei 9.433/97) avançado em relação aos recursos hídricos, poucos foram os progressos relacionados à política de secas. Historicamente o NEB continua sofrendo grandes impactos associados a este fenômeno (ver secção 2.1), bem como as regiões Norte e Sul do país. E apesar da existência da proposta do Ministério da Agricultura para a gestão de riscos climáticos por intermédio de zoneamento agrícola e a Política de Prevenção e Combate à Desertificação, até recentemente não havia nenhum plano de preparação e prevenção aos períodos de escassez hídrica para os demais setores da economia, e mesmo nas iniciativas mencionadas as ações de mitigação da problemática se mostram desarticuladas e concentradas mais nas consequências do que nas causas.

Com isso nota-se que o país, apesar de toda a experiência vivenciada, principalmente no NEB, pela população e pelos órgãos competentes que lidam com a seca, ainda não tem capacidade e nem resiliência suficiente para resistir a atual condição climática. Um dos motivos desse cenário é a ausência de políticas públicas ou de estratégias de âmbito nacional que antecipem as adversidades cada vez maiores por intermédio de preparação e adaptação constantes, possibilitando o aumento de invulnerabilidade hidroclimática bem como uma melhoria do sistema de gestão de recursos hídricos em prevenir e mitigar crises.

Então, procurando modificar essa postura, no intuito de alcançar uma melhoria na gestão das secas e, com isso, atenuar os impactos causados pela mesma, preferencialmente sobre os que causam maiores prejuízos na economia e na sociedade urbana, neste trabalho é desenvolvido um Sistema de Informação e Alerta Precoce de Seca (SIAPS) a fim de poder detectar, avaliar e prever a situação hídrica de um hidrossistema e uma matriz de ações de preparação e mitigação, foi definida, a fim de possibilitar um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente aos associados ao uso racional e minimização dos conflitos devido à escassez hídrica.

As contribuições científicas e técnicas deste trabalho são o desenvolvimento de uma ferramenta que possibilite a antecipação de adversidades associadas à seca e a proposição de uma metodologia para elaboração e implementação de planejamento proativo de seca capaz de fornecer respostas de mitigação e adaptação a esse evento, buscando se utilizar da visão de gerenciamento de risco em vez do modelo atualmente

adotado pelas políticas de seca, o de gerenciamento de crise (ver seção 2.2), propiciando uma melhor gestão de seca para abastecimento hídrico urbano.

Nesse contexto, o SIAPS aqui desenvolvido se utiliza de técnicas de desenvolvimento de modelagem multimodelos climáticos, hidrológicos, estatísticos, por redes neurais e da geração de índices de seca buscando uma integração entre monitoramento e previsão dos mesmos que funcionam como gatilhos para disparar ações de mitigação e resposta às secas.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos:

Capítulo 1 – Introduz a problemática a ser trabalhada, além de informar os objetivos e contribuições científicas e tecnológicas do estudo. Além de comentar como trabalho está estruturado.

Capítulo 2 – Analisa a literatura (artigos e livros) voltadas a temática da seca, a variabilidade e previsão sazonal, a gestão de riscos, a sistemas de alerta precoce e índices de seca que dão base a este trabalho.

Capítulo 3 – Descreve em termos geográficos, hidrológicos e econômicos a região de estudo, que neste trabalho foi o Sistema Jaguaribe-Metropolitana.

Capítulo 4 – Considera a forma de obtenção dos dados trabalhados nesse estudo e ainda sintetiza a metodologia desenvolvida para criação de um sistema de gerenciamento de seca bem como os processos para a elaboração de planos de ações de hidrossistemas urbanos.

Capítulo 5 – Avalia os resultados obtidos e discute sobre a avaliação dos índices de seca, o desempenho dos modelos de previsão sazonal, além da matriz de ações de mitigação e respostas às secas.

Capítulo 6 – Mostra as conclusões obtidas após o desenvolvimento do trabalho, identificando se os objetivos foram atingidos, além de sugerir complementos a essa pesquisa que possa ser realizado em outro estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção está estruturada em 5 temáticas que fundamentam o trabalho desenvolvido nessa tese. A primeira temática consiste em um breve histórico das secas e das políticas públicas associadas, pontuando as principais secas ocorridas ao longo do século XX até os dias atuais. A segunda temática está relacionada à variabilidade climática no NEB e a previsão sazonal, em que se identifica os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelas condições climáticas do NEB e embasasse a previsão climática-hidrológica através dos métodos ou modelos de previsão que serão utilizados ao longo desse estudo. A terceira ideia está ligada a gestão do risco de secas, em que se procura conceituar o risco e apresentar estudos que se utilizaram da temática de gestão de risco de caráter ambiental, bem como mostrar os bons resultados obtidos através da utilização desse tema. A quarta ideia mostra que um sistema de alerta precoce pode servir como uma ferramenta para o desenvolvimento de mecanismos proativos de proteção e mitigação das secas. O quinto tema define, apresenta e embasa os principais índices de seca utilizados na literatura científica.

2.1 Breve histórico das secas e das políticas públicas sobre secas no Nordeste Brasileiro

Pompeu Sobrinho (1982), em seu livro *História das Secas*, relata as experiências de meio século de luta contra as secas no NEB. Segundo ele, na primeira metade do século XX, o Nordeste sofreu quatro secas de grandes proporções, mais especificamente em 1915, 1919, 1932 e 1942, sendo a seca de 1915 uma das mais calamitosas, em que rebanhos bovinos e equinos foram praticamente dizimados, houve êxodo rural massivo em direção tanto a capitais do Nordeste como para as regiões Norte e Sul e escassez de alimentos para a população.

A seca de 1919, apesar de não esperada por alguns estudiosos da meteorologia nordestina, novamente trouxe angústia a população, principalmente devido a dolorosa memória da seca anterior, 1915, mas o período seco foi curto não repercutindo tanto quanto a seca passada e nem trazendo grandes prejuízos a sociedade (POMPEU SOBRINHO, 1982).

A seca de 1932 se alongou até o ano seguinte, fazendo com que se alastrasse por uma grande área e tomasse proporções de calamidade. Ditosamente a escassez hídrica sobreveio na administração de José Américo, Ministro da Viação e Obras Públicas no

governo de Getúlio Vargas, profundo conhecedor das condições físicas que assolam a região, conseguiu grandes recursos materiais, que somados com as experiências custosamente adquiridas pelas secas anteriores, permitiram dar uma melhor assistência aos flagelos vítimas da seca, amenizando sensivelmente o sofrimento da população (POMPEU SOBRINHO, 1982).

Após esse período, o Nordeste foi agraciado com cerca de 10 anos de chuvas regulares, o que fez com que a seca de 1942 chegasse de surpresa, não encontrando devidamente aparelhada a “Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas” (IFOCS), criada em 1919, apesar das excruciantes experiências já vividas. Porém, acreditava-se que a grande quantidade de açudes públicos e particulares construídos em parceria com o Governo Federal, como forma de mitigação de secas anteriores, fosse suficiente para evitar a emigração dos flagelados, o que rapidamente mostrou-se contrário (POMPEU SOBRINHO, 1982).

As políticas públicas associadas à seca praticadas no NEB, em grande maioria formuladas no âmbito do combate às secas, foram inicializadas em 1909 com a criação da “Inspetoria de Obras Contra as Secas” (IOCS) no governo de Nilo Peçanha, cerca de 10 anos depois tornou-se IFOCS e em 1945 “Departamento Nacional de Obras Contra as Secas” (DNOCS) (TRAVASSOS *et al.*, 2013)

Durante a primeira metade do século XX, acreditava-se que a construção de pequenos, médios e grandes açudes, além de obras de irrigação, eram suficientes para estabilizar a população nômade, em virtude da seca, e aproveitar terras agricultáveis. Outro método empregado no combate à seca até meados do século XX, só que de maneira mais secundária pela IFOCS, foi o de florestamento e reflorestamento das regiões secas, pois sabia-se a condição meteorológica podia se modificar pelo aumento de vapor d’água e condensamento causado pela flora (POMPEU SOBRINHO, 1982; CAMPOS, 2014).

Outro recurso no combate às secas ficou conhecido como *dry-farming*, que tinha como objetivo preparar o terreno e protegê-lo no intuito de obter maior rendimento agrícola das precipitações nas lavouras. As iniciativas com essa orientação, entretanto não vieram da IFOCS, mas do Ministério da Agricultura (POMPEU SOBRINHO, 1982).

Como ações emergenciais, no século XX adotava-se “medidas de salvação” por meio de distribuição de cestas básicas e frentes de trabalho, criadas para dar serviço aos desempregados durante o período de duração das secas, dirigidas para a construção de estradas, açudes, pontes (NEVES, 2006; PASSADOR *et al.*, 2007; GASPAR, 2009).

Em uma visão mais ampla, a intervenção do Governo no semiárido do NEB, na primeira metade do século passado, sempre foi evidenciada pela centralização e fragmentação das ações e se efetivava através da criação de órgãos nacionais para o combate à seca os quais se tornavam em objeto de disputas políticas entre os diversos segmentos da elite rural. As ações desenvolvidas por esses órgãos limitavam-se a construção de grandes açudes públicos perenizando extensões de rios, a construção de milhares de pequenos e médios açudes dentro de propriedades privadas de forma a assegurar água para a produção agropecuária e o funcionamento de agroindústrias (NEVES, 2006; SOUZA FILHO, 2006; PASSADOR *et al.*, 2007).

A segunda parte do século XX iniciou com uma seca entre 1951 e 1953 abrangendo todo o NEB e o Norte de Minas Gerais. Foram ainda registradas secas em 1958-1959; 1966; 1970; 1976; 1979-1984; 1990-1993 e 1997-1999 totalizando 42 secas no século (RODRIGUES, 2016). O século seguinte, XXI, começa com a segunda maior seca do semiárido Brasileiro, de 2001 à 2008, e um novo ciclo de seca se iniciou em 2012 e perdura até 2016.

A seca de 1958-1959 trouxe prejuízos semelhantes aos ocorridos na seca de 1915, dizimando metade da população do NEB que trabalhava na agricultura das áreas atingidas, segundo o Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento Econômico do Nordeste (GTDN, 1967). A seca seguinte, em 1970, atingiu todos os estados do Polígono da Seca (que abrange municípios dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais), levando a criação de frentes de emergências que trazia alívio a cerca de 1,8 milhões de flagelos da seca.

De 1979-1985 ocorreu a seca mais prolongada da história do NEB, cerca de 7 anos, que deixou um rastro de miséria e fome, levando a morte de mais 3,5 milhões sendo a maioria crianças. Essa também foi a seca mais abrangente, atingindo regiões nunca antes afligidas, como a zona da mata, litoral do NEB e pré-Amazônia Maranhense, avançando pela primeira vez a regiões fora do Polígono da Seca. O ano de 1983 é lembrado como auge da seca, em que muitas famílias devido a fome, aumento da desnutrição dos filhos e da mortalidade infantil passaram a comer o alimento do gado e a se alimentar de animais comumente não utilizados na culinária nordestina, como cobras, ratos, gatos, calangos, pombas, entre outros pequenos animais. Nesse período o governo federal criou um programa de emergência para o pagamento de salários aos agricultores flagelados pela seca, que passaram a trabalhar na construção de pequenos açudes, cacimbas e poços afim de amenizar os efeitos da próxima estiagem (VILLA, 2000; RIBEIRO, 2007).

Na década de 1990, os anos de 1993, 1996, 1997, 1998 e 1999 foram de escassez hídrica. A seca de 1998, afetou cerca de 5 milhões de pessoas no NEB, excetuando Maranhão, esta seca estava prevista a mais de 1 ano, porém nada foi feito para amenizá-la (VILLA, 2000; RIBEIRO, 2007).

Entre 1959 e 1991 ocorreu o período do desenvolvimento regional, que tem como marco o relatório realizado pelo GTDN culminando na criação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Esse grupo foi criado no governo de Juscelino Kubitschek, tinha o intuito de buscar soluções para o desenvolvimento do Nordeste (CAMPOS, 2014).

Com o surgimento da SUDENE, as políticas de combate à seca não mais se baseavam na construção de estradas e açudes, como visto na primeira metade do século XX e passaram a se fundamentar em um novo paradigma, que estava associada a questão estrutural da posse de terra, das desigualdades sociais e do aproveitamento racional dos recursos hídricos (SOUZA FILHO, 2006; PASSADOR *et al.*, 2007; TRAVASSOS *et al.*, 2013; CAMPOS, 2014).

De 1992 até 2012, começa a era das políticas de gerenciamento de água e do desenvolvimento sustentável, que tem como marca a Agenda 21. Nesse período eventos mundiais e opiniões de associações técnicas e científicas passaram a influenciar a formulação das políticas públicas (CAMPOS, 2014). A Agenda 21 alerta para as enchentes e secas que ficaram mais severas, para os problemas ocasionados pela poluição e para a falta de planos racionais de uso da água.

De 2012 até 2016, a seca é considerada a maior seca dos últimos 60 anos em termos quantitativos de pessoas afetadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o Nordeste perdeu mais de 4 milhões de animais (IBGE, 2013). Martins *et al.* (2017), comenta que em dezembro de 2016, só no Ceará foram registrados 30 reservatórios colapsados (vazios) e 42 em volume morto dos 153 açudes monitorados, o que ocasionou interrupção no abastecimento hídrico de 96 dos 1984 municípios.

Atualmente, programas sociais estabelecidos pelos governos ao longo dos anos diminuíram significativamente os impactos sobre as populações. As instituições evoluíram muito no conhecimento sobre a gestão do armazenamento de água em reservatórios, mas ainda há muitos desafios, como a redução de desigualdades regionais e o aumento do conhecimento da qualidade da água dos estoques hídricos (SOUZA FILHO, 2006; CAMPOS, 2014).

2.2 Clima, variabilidade e a previsão sazonal

2.2.1 Variabilidade climática no NEB

O NEB caracteriza-se por um clima semiárido, em que existe uma grande variação na distribuição da precipitação tanto na escala espacial quanto temporal. Para o NEB, tanto os períodos longos de escassez hídrica como os prolongados de chuvas intensas acarretam sérios problemas sociais e econômicos. A climatologia dessa região é bastante complexa, fica localizada na Zona Intertropical, os sistemas meteorológicos que influenciam são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade (LI), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e Sistemas Frontais (SF), principalmente em escala sazonal, e ainda fenômenos como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), em escala interanual e decadal.

A variação interanual da precipitação, associada aos baixos índices pluviométricos anuais, sobre o NEB, é um dos fatores preponderantes para a ocorrência de “secas” sobre a região, que são caracterizadas por uma elevada diminuição do total pluviométrico sazonal durante o período de fevereiro a maio. Geralmente, a variação interanual da pluviometria sobre o NEB está relacionada a variações de padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre os oceanos tropicais, os quais alteram a posição e a intensidade da ZCIT sobre o Oceano Atlântico, dimensionando assim a pluviometria sobre o NEB (REPELLI e ALVES, 1996).

Conforme Sousa *et al.* (2008), que fez uma análise de dados de precipitação diária entre 1941 e 2004, em Timbaúba, o leste do NEB é fortemente influenciado pela ODP, visto que houve redução nos acumulados anuais, mensais, desvios padrões anuais e nos dias chuvoso quando comparada a fase fria com a quente da ODP. Em estudo mais recente, Silva e Galvêncio (2011) observaram que os picos da variabilidade temporal da precipitação do Baixo São Francisco são da escala de 20-22 anos, com picos secundários em escala de 11 anos. Isso era acarretado devido ao aumento considerável das anomalias de precipitação positivas, durante a ocorrência simultânea de ENOS e ODP negativa. Com isso, nota-se que a ODP negativa aumenta os valores das anomalias de precipitação, durante os períodos de *El Niño* e *La Niña* (MANTUA e HARE, 2002).

O clima do Nordeste é fortemente influenciado pelas mudanças de temperatura da superfície do Oceano Pacífico tanto na escala interanual como na escala decadal. Na escala interanual, o fenômeno ENOS na fase positiva pode produzir escassez

hídrica no Nordeste e excesso de chuvas no Sul/Sudeste do país. Na escala decadal, as temperaturas das superfícies dos oceanos ficam mais aquecidas durante 20 a 30 anos e, em seguida, se resfriam durante outros 20 a 30 anos, totalizando um ciclo de 50 a 60 anos. Assim, entre 1947 e 1976, quando o oceano Pacífico se resfriou, às chuvas se reduziram no Nordeste e os Estados da costa leste tiveram chuvas abaixo da média durante praticamente 11 anos consecutivos (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

As mudanças e a variabilidade climática impactam diretamente na formação de escoamento nas bacias hidrográficas. Segundo Tucci (2009), em períodos de ocorrência de anos úmidos, o aumento de pluviometria acarreta acréscimos ainda maiores de vazão e, em períodos secos, a redução de precipitação causa diminuições ainda maiores de magnitude da vazão, pois não há grande aumento da infiltração e há uma atenuação da evapotranspiração potencial em anos úmidos e em anos de escassez hídrica tem-se um aumento significativo da evapotranspiração.

Nesse contexto, é possível ter a dimensão de quão importante é o estudo da variabilidade climática. Ter conhecimento da variabilidade, principalmente da precipitação, considerando alguns preditores climáticos, auxilia aos tomadores de decisões a fazer uma eficiente alocação da água.

2.2.2 Sistemas meteorológicos atuantes no regime pluviométrico no NEB

Conforme Molion e Bernardo (2002), as chuvas produzidas no NEB podem ser causadas por fenômenos de grande, meso e micro escala. Os de grande escala são causadores de 30% a 80% da pluviosidade dependendo da localidade. Dos sistemas de mesoescalas atuantes no NEB, destacam-se os SF, a ZCIT e perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios. Considerando os de microescala tem-se as circulações orográficas e pequenas células convectivas.

Os SF são camadas de nuvens que se formam no encontro entre uma massa de ar frio (mais densa) com uma massa de ar quente (menos densa). No encontro o ar quente e úmido sobe e forma nuvens, conseqüentemente, chuva. No NEB, geralmente, ocorrem entre os meses de novembro e janeiro.

A ZCIT é uma zona de baixa pressão na região equatorial, formada pelo encontro dos ventos Alísios de Sudeste e de Nordeste em baixos níveis. Região de alta intensidade convectiva e precipitação. Normalmente varia entre 14°N, entre agosto e outubro, e 4°S, entre fevereiro e abril. Essa amplitude da ZCIT tem relação com os

padrões de TSM do Oceano Atlântico Tropical. Estudos, como o de Uvo *et al.* (1998), mostram que a seca no NEB coincide com o posicionamento da ZCIT mais ao Norte em relação a sua posição climatológica.

O NEB também é afetado por distúrbios ondulatórios no campo dos ventos Alísios, mais conhecidos como Ondas de Leste (OL). Essas ondas se formam por penetrações de sistemas frontais em baixas latitudes no campo dos ventos Alísios, em que ventos de sul, associados aos sistemas frontais, com os ventos de leste, causam distúrbios ondulatórios nos Alísios que se propagam para oeste. Ferreira *et al.* (1990) verificou que no trimestre março a maio (MAM) tem uma maior ocorrência de OL que os demais trimestres do ano.

Os oceanos Pacífico e Atlântico tem grande influência no Nordeste, em anos de *El Niño* o aquecimento superficial das águas do Pacífico altera a dinâmica interna do próprio oceano, através de fluxos de calor (evaporação, ciclos convectivos, formação de nuvens), provocando mudanças na posição e no comportamento da ZCIT. Ocasionalmente também mudanças na circulação da célula de Walker, em que um dos ramos descendentes encontra-se sobre a Amazônia, que leva a inibição de convecção e conseqüentemente uma diminuição da precipitação na maior parte do NEB na estação chuvosa da região (ALVES *et al.*, 2005).

A ODP tem uma influência mais nítida no clima Norte-Americano, assim como o ENOS possui duas fases, quente e fria. Estudos como o de Molion (2005), mostraram que na fase negativa (ou fria) a ODP acarreta uma redução da frequência dos eventos de *El Niño*, e o de Andreoli e Kayano (2005) mostram que na fase positiva há uma tendência de aumento em número e intensidade de eventos de *El Niño*. Sendo, assim, a fase fria da ODP mais favorável a precipitação para o Nordeste Brasileiro.

2.2.3 Previsão Sazonal Climático-Hidrológica

A previsão sazonal, tanto climática como hidrológica, é uma ferramenta que pode auxiliar na tomada de decisão, tanto em nível de planejamento assim como em nível operacional de várias atividades socioeconômicas, tais como alerta precoce de desastres naturais, gestão de recursos hídricos, agricultura, saúde, turismo e outras, com o intuito de minimizar os impactos negativos de eventos climáticos extremos.

A previsão climática sazonal pode ser realizada com alto grau de acurácia para algumas regiões do mundo, o que faz esta informação importante para o gerenciamento de recursos hídricos. A região Nordeste do Brasil é uma das regiões que

apresentam alta previsibilidade da precipitação média sazonal (NOBRE *et al.*, 2001; REJAGOPALAN *et al.*, 2002; MARENGO *et al.*, 2003). Esta alta capacidade de predição das precipitações no NEB é resultado da influência das temperaturas dos oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical no comportamento dos fenômenos causadores de chuva, vistos na seção 2.2.2, sobre a região (NOBRE, 2012).

No Ceará, por exemplo, Cabral *et al.* (2016) fazem uma avaliação do desempenho da previsão climática no alto vale do rio Jaguaribe, utilizando o Heide Skill Score (HSS) como métrica de destreza ou acurácia da previsão, que alcançou valores acima de 0,62, valores de HSS desta magnitude mostram que a previsão climática pode ser utilizada para gerenciar os recursos hídricos no semiárido brasileiro.

Entretanto, apesar do uso da informação da previsão climática, em aplicações nos recursos hídricos, ter uma alta confiabilidade (ROBERTSON *et al.*, 2014) há algumas limitações, principalmente associadas à diferença entre as escalas em que ocorrem os fenômenos atmosféricos e os processos hidrológicos atrelados à bacia, o que vem sendo em parte resolvido por técnicas de *downscaling* e por acoplamento com modelos hidrológicos (STOLL *et al.*, 2011; TAYLOR *et al.*, 2012).

Nesse contexto, nas últimas décadas tem havido um interesse crescente na previsão sazonal climático-hidrológica. Essas previsões têm sido realizadas através de modelos dinâmicos (ALVES *et al.*, 2007; BLOCK *et al.*, 2009), podendo estes ser acoplados a modelos hidrológicos, por modelos estatísticos (SOUZA FILHO e LALL, 2003; SOUZA FILHO e LALL, 2004) e por modelos utilizando redes neurais artificiais (RNA) (FIGUEIREDO *et al.*, 2007; ARAUJO *et al.*, 2015).

Modelos dinâmicos são representações matemáticas dos processos físicos que ocorrem na distribuição de umidade e energia sobre todo o globo. Esses modelos, em geral, resolvem as equações básicas que regem o comportamento de fluidos, tais como a equação do momentum, da massa, da energia, por meio de aproximações numéricas e com parametrizações físicas para processos como transferência radiativa, formação de nuvens, convecção, transporte turbulento e interação oceano atmosfera.

Os modelos estatísticos do clima, por sua vez, associam relações estatisticamente significativas entre variáveis meteorológicas e/ou hidrológicas locais com preditores locais, que são variáveis observadas na mesma localidade do preditando, e remotos, que correspondem a variáveis em outras áreas que não sejam do local da previsão.

As redes neurais artificiais (RNAs) são modelos empíricos potencialmente úteis de se modelar sistemas não-lineares complexos com grande quantidade de dados, se

baseiam na estrutura cerebral, apresentam capacidade de aprendizado, associação, generalização e abstração (HAYKIN, 2001). Esses modelos são particularmente úteis em situações nas quais as relações dos processos físicos ainda não são completamente compreendidas. Os modelos RNAs podem, ainda, substituir os modelos matemáticos e estatísticos convencionais ou se associar a eles (SOUSA e SOUSA, 2010).

A seguir, nos subtópicos 2.2.3.1 e 2.2.3.2, serão apresentados alguns conceitos e mais estudos relacionados aos modelos de previsão sazonal climático-hidrológica usando os métodos de previsão supracitados.

2.2.3.1 Modelagem hidroclimática dinâmica e estatística acoplada

A modelagem dinâmica é uma técnica, conforme citado anteriormente, que tem como objetivo representar os vários processos físicos existentes na natureza, entender tais processos e prever os efeitos das suas interações e variações. Estes podem ser classificados como globais ou regionais. Os modelos globais resolvem as equações que regem o comportamento da atmosfera sobre todo o globo, sem se preocupar com as características particulares de cada região. Os modelos regionais cobrem regiões limitadas, permitindo uma análise mais detalhada de uma determinada área do planeta.

Reis Junior *et al.* (2010) mostram uma metodologia usada na previsão de vazão sazonal e mensal, usando a técnica de modelagem dinâmica acoplada. Para isso, foi utilizado um modelo de circulação geral da atmosfera, *European Community-Hamburg* versão 4.5 (ECHAM 4.5) e dois modelos regionais atmosféricos, o *Regional Spectral Model* (RSM) e o *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), que fazem a previsão de precipitação sazonal e mensal que, por sua vez são interpoladas para uma grade de resolução mais fina para estimar a precipitação média na bacia, em seguida é feita uma correção de viés dos dados simulados e então acoplado a um modelo hidrológico concentrado, *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP).

Alves e Campos (2010) fizeram uma análise de desempenho do acoplamento entre a modelagem dinâmica da precipitação e a modelagem hidrológica de vazão e operação de um reservatório no estado do Ceará, baseado no posto fluviométrico de Iguatu. Os resultados levaram a conclusão de que o modelo dinâmico apresenta um erro sistemático que precisa ser corrigido, para isso utilizou-se o método baseado nas frequências diárias das amostras (PDFs) previstas e observadas. A partir dessa correção, verificou-se que o acoplamento entre o modelo dinâmico e hidrológico teve bom

desempenho, sendo capaz de capturar a frequência das vazões observadas, não apresentando diferenças significativas em relação a frequência das vazões simuladas.

Outro estudo nesse mesmo molde é o de Lima e Alves (2010), que mostram uma aplicação da técnica de *downscaling* dinâmico em escala intrasazonal e seus efeitos no acoplamento com um modelo do tipo chuva-vazão em área de baixo skill. Dessa aplicação verificou-se que modelos atmosféricos regionais aninhados a modelos de circulação geral da atmosfera (MCGAs) geram resultados satisfatórios na estimativa de precipitação na escala de bacia hidrográfica e quando associados a uma correção de viés, melhoram a previsão de vazão na bacia em estudo, indicando que essa metodologia pode ser empregada na otimização do uso da água superficial.

Galvão *et al.* (2005) mostra o resultado da aplicação de um modelo atmosférico de alta resolução acoplados a modelos hidrológicos para a previsão de escoamento diário e seu uso na simulação de estoque de água em reservatórios. Evidenciando que essa abordagem é eficaz em fornecer informações úteis para avaliação de impactos hidrológicos devido a variabilidade climática na escala da bacia hidrográfica, podendo auxiliar na tomada de decisão na operação do reservatório, apesar das incertezas associadas.

Outra abordagem existente para a previsão de variáveis hidroclimáticas é a de modelagem estatística, que vem sendo muito utilizada na previsão de vazões sazonais com o uso de índices climáticos como variáveis explicatórias em modelos matemáticos (ALEXANDRE, 2012)

Nesse contexto, Souza Filho e Lall (2003) desenvolveram um sistema de previsão de vazão para 6 reservatórios hídricos no Ceará baseado nos índices do Gradiente Meridional da TSM do Atlântico ou Dipolo do Atlântico e do NIÑO3. O desenvolvimento desse sistema se deu através de uma abordagem semi-paramétrica, em que basicamente transforma-se as vazões em séries anuais e emprega-se uma técnica de “*pool-regression*” sobre os índices climáticos afim de realizar uma previsão comum das vazões anuais por meio da reamostragem das vazões de anos históricos dados os valores atuais de índices climáticos. Os resultados mostraram que as correlações das previsões de vazões com os índices climáticos citados indicaram que a metodologia produz previsões úteis para os próximos 18 meses de operação e gestão de reservatórios de água.

Golembesky *et al.* (2009) combinam previsões multi-modelos de vazões de 3 meses à frente com modelos de gestão de reservatórios no intuito de determinar níveis de restrições de abastecimento de água. As previsões de vazões são feitas com base em um

modelo paramétrico de regressão, com um outro de reamostragem semi-paramétrico e pela combinação dos mesmos. As análises mostraram que a probabilidade da vazão prevista onde o armazenamento sazonal é menor do que o armazenamento desejado é maior do que a estimativa de climatologia de vazões abaixo do normal e vice-versa. Os resultados ainda mostram que as previsões de vazão multi-modelo são melhores, apresentando redução de falso alarme e na predição de condições de armazenamento Abaixo-Normal.

Cardoso *et al.* (2006), buscando alternativas para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, se utilizam de previsões e informações climáticas no processo de alocação de água no Sistema Jaguaribe-Metropolitana (SJM). Como ferramenta, utilizam o método K-vizinhos na previsão de aflúências, que incorpora a partir de índices climáticos tais como El Niño e Dipolo do Atlântico, e o algoritmo de programação não linear, simplex Nelder-Mead, no intuito de otimizar as políticas na operação tática dos reservatórios do SJM. Os resultados mostraram que as técnicas utilizadas podem servir como uma ferramenta de suporte a decisão no gerenciamento dos recursos hídricos do Estado do Ceará.

Alves *et al.* (2007) comparam a modelagem dinâmica, em que foram usados o modelo global ECHAM 4.5 e os modelos RSM e o RAMS, com a modelagem estatística, através do método empírico K-vizinhos, da precipitação para o NEB. Com isso, verificou-se que o modelo empírico apresentou menor erro absoluto médio que a modelagem dinâmica, porém quando se caracterizou a previsibilidade em três categorias, Seca, Normal e Chuvosa, tem-se que os modelos dinâmicos apresentaram *skill* superiores ao modelo empírico, principalmente no setor norte do Nordeste na categoria chuvosa.

Robertson *et al.* (2014) avaliam o potencial do uso de previsões climáticas sazonais para melhorar a gestão dos recursos hídricos e da seca em regiões semiáridas, como Chile e Nordeste. O estudo se utiliza de previsões de precipitação feitas tanto por modelagem dinâmica como estatística. Para o Ceará, onde os gestores do sistema hídrico fornecem água para o setor industrial e agrícola, necessita-se de um determinado nível de confiabilidade.

Nesse contexto, ainda segundo Robertson *et al.* (2014), a experiência da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), que faz uso de previsões climáticas e cenários de otimização como parte de seu processo regular de alocação de água, enfatiza o potencial do uso da informação climática na otimização da gestão de recursos hídricos, principalmente, durante períodos de baixo fluxo de água.

2.2.3.2 Modelagem climática e/ou hidrológica utilizando redes neurais

Zealand *et al.* (1999) explora a capacidade de RNA e compara o desempenho desta ferramenta com outras abordagens utilizadas para previsão de vazões. Problemas como número de dados de entrada e/ou o tamanho de camadas ocultas na rede, são analisados. Os resultados obtidos mostraram que as RNA obtiveram uma curva de distribuição muito próxima durante a fase de calibração dos dados em estudo e na fase de verificação essa distribuição superou os modelos convencionais.

Coulibaly *et al.* (2000) treinou uma rede RNA feed-forward (FNN), que faz predição de um passo à frente da série temporal, de múltiplas camadas para previsão em tempo real de afluições de reservatório em Quebec. O desempenho do modelo utilizado é comparado como modelos estatísticos e conceituais já reconhecidos por sua destreza. Os resultados mostram que o método é eficaz na precisão da previsão e pode servir como uma alternativa quando se deseja uma previsão dinâmica adaptável.

Wang *et al.* (2006) utiliza três tipos de modelos RNA híbridas, a primeira baseada em limiares, denominada de *threshold-based* RNA (TANN), a segunda baseada em agrupamento, conhecida como *cluster-based* RNA (CANN), a terceira baseada em períodos, nomeada de *periodic-based* RNA (PANN), para prever vazões diárias. O desempenho desses modelos é comparado com modelos de RNA de múltiplas camadas de perceptrons (MLP-RNA). Os resultados mostraram que o modelo PANN é o melhor entre os três tipos de modelo híbridos, além disso foi possível perceber que os modelos do tipo MLP-RNA a função de ativação ou transferência tangente sigmoide é a que propicia melhores resultados com dados com e sem sazonalidade em relação a outros métodos de transferência.

Menezes Junior e Barreto (2008) fazem uma previsão de series temporais com um modelo não-linear auto-Regressivo com variáveis exógenas (NARX) baseado em RNA. Para avaliar em termos qualitativos e quantitativos essa capacidade preditiva da rede NARX, fazem uma comparação com redes do tipo ELMAN, também denominada de rede Neural Recorrente Simples (SRN), e com uma rede neural de um passo à frente com atrasadores (TDNN). Todas as redes usadas possuem duas camadas ocultas e um neurônio de saída, em que este utiliza a função de ativação tangente hiperbólica. Com isso, foi possível concluir que a rede NARX é apropriada para a predição de series temporais complexas, possuindo um desempenho melhor do que redes com arquiteturas TDNN e ELMAN.

Gomes *et al.* (2010) utilizam dois métodos RNA distintos, a MLP e a rede composta por blocos de regressões sigmóide não lineares (NSRBN) para a previsão de

vazões naturais médias diárias para o reservatório de Três Marias. Os resultados apontam que a rede NSBRN teve um melhor desempenho para previsões semanais, enquanto a rede MLP foi melhor para previsões diárias.

Sousa e Sousa (2010) desenvolveram um modelo não linear entre chuva e vazão na bacia hidrográfica do rio Piancó baseado na técnica de RNA, capaz de assumir diferentes arquiteturas de rede. A RNA utilizada é do tipo MLP com três camadas, a primeira, de entrada, não se atribuí funções de ativação indicando que essa camada não faz processamento apenas envia dados para a segunda camada com seus respectivos pesos sinápticos. Observado os resultados, é possível concluir o melhor desempenho estatístico geral, considerando-se os valores médios dos parâmetros estatísticos em cada arquitetura, é a que os dados de entrada são normalizados, possui 15 neurônios na camada intermediária e a função de transferência é a log-sigmóide.

Castro (2011) desenvolveu um modelo de previsão de chuvas sazonais para o estado do Ceará baseado em RNA com o uso de Neo-Fuzzy Neuron (NFN), em que os neurônios são unidos por funções baseadas em lógica fuzzy, para gerar a previsão para as oito regiões homogêneas do Estado, no período de janeiro a junho. Os resultados obtidos foram comparados de maneira direta com os modelos utilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os resultados mostraram que o modelo RNA-NFN tem grande potencial para a previsão de acumulados trimestrais de chuva, exceto na região do Cariri, em que modelos dinâmicos apontaram melhor desempenho.

Abhishek *et al.* (2012) examina a utilização de modelos não-lineares baseados em RNA para a previsão da temperatura máxima da atmosfera, além disso avalia o desempenho dos modelos com diferentes funções de ativação e quantidades de neurônios e camadas ocultas. Assim, os autores buscam compreender como o aumento de neurônios artificiais e/ou camadas ocultas afeta o desempenho das RNA. Os resultados mostraram que para apenas uma camada oculta, o aumento do número de neurônios diminui o erro quadrático médio, assim como o número de aumento das amostras. Entretanto, quando se trabalha com mais de uma camada oculta, há uma quantidade ótima de neurônios, em que valores além desse limite ótimo tendem a diminuir o desempenho dos modelos. Em relação a função de transferência para a camada oculta, verificaram que a tangente sigmóide é a melhor escolha em virtude da sua rápida taxa de aprendizagem e sensibilidade ao número de amostras e neurônios.

Farajzadeh *et al.* (2014) fizeram uma previsão da precipitação pluviométrica mensal para estimar o escoamento superficial para a bacia do lago Urmia, segundo maior

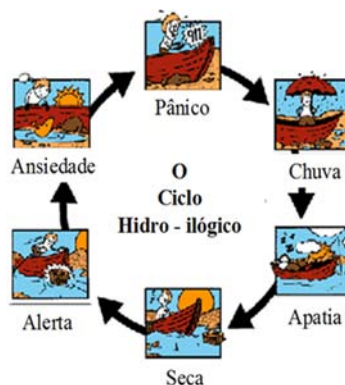
lago salino do mundo, usando FNN e modelos regressivos de autocorrelação integrados com médias móveis (ARIMA). Os resultados indicaram que a previsão por ambos os métodos não possui diferenças significativas, ficando a previsão de ambos próximos aos dados reais.

Araújo *et al.* (2015) fazem previsão sazonal de vazões para a bacia do açude Orós utilizando como ferramenta as RNA. O modelo utiliza como preditores anomalias de temperatura dos oceanos Atlântico Norte, Sul e Pacífico Equatorial, em relação ao horizonte temporal de predição, a mesma é feita em julho para prever o primeiro semestre do ano seguinte (janeiro a junho). O estudo utilizou várias arquiteturas de rede, em que todas tiveram como função de ativação a tangente sigmóide com variação da taxa de aprendizagem entre 0,01 e 0,15. A arquitetura que teve melhor desempenho apresentou eficiência de Nash-Sutcliffe de (0,80).

2.3 Gestão de risco da seca e aplicações em forma de planejamento

Como visto, historicamente as ações associadas a seca somente acontecem em período de ocorrência da mesma, caracterizando o que pode ser chamado de ciclo Hidro-ilógico (Figura 1), em que a apatia é a primeira etapa desse ciclo, em que há água suficiente para assegurar todos os usos. Em seguida vem a falta de chuva que no primeiro momento passa despercebida, mas com o prolongamento da escassez hídrica a população vai ficando ansiosa e começam as campanhas reativas de restrições de usos, com o agravamento da seca a sociedade começa a entrar em pânico, mas com a chegada da chuva vem o alívio e com isso nem os cidadãos nem os tomadores de decisões sentem ou vêm a necessidade de se preparar para a próxima seca, porém quando essas retornam, despertam mais uma vez preocupação e medo ao enfrentá-la (WILHITE *et al.*, 2005).

Figura 1 – Ciclo Hidro-ilógico.



Fonte: Adaptado de Wilhite. *et al.* (2005)

Um dos instrumentos capazes de fazer esse ciclo vicioso se romper é o planejamento que, conceitualmente, é um mecanismo capaz de conduzir a reflexões antecipadas e sistemáticas, faz-se necessário como um processo contínuo e integrado dentro de uma visão de gerenciamento de riscos de secas (Figura 2).

Figura 2 – Planejamento da seca nas visões de gerenciamento de risco e de crise.



Fonte: Adaptado de Wilhite *et al.* (2000)

A gestão de riscos de seca tem como principal característica uma abordagem proativa das ações de curto e longo prazo, que devem ser tomadas, associadas à seca. Essa abordagem, em geral, considera de maneira integrada diferentes aspectos de riscos de modo a propiciar alguns benefícios, tais como geração de uma base robusta e confiável para o planejamento e tomada de decisão, melhoria na identificação das ameaças e oportunidades, alocação e uso mais efetivo dos recursos e melhoria na conformidade com a legislação vigente (WILHITE *et al.*, 2000; MARCELINO, 2008).

Segundo Giddens (2000), conceitualmente o risco inter-relaciona de maneira direta as noções de probabilidade e incerteza, ou seja, o risco apresenta uma dupla face, que são oportunidade e perigo. O risco associado a seca é resultado da exposição local (probabilidade de ocorrência de vários níveis de severidade) e da vulnerabilidade da sociedade (WILHITE e BUCHANAN-SMITH, 2005), assim, o desenvolvimento de um plano de preparação para a seca é um passo significativo na adoção de uma abordagem proativa do processo de gestão.

Outro elemento importante no processo de gestão de risco da seca é a disseminação da importância do planejamento por todos os setores da sociedade, bem como a compreensão da seca como uma questão interdisciplinar, devendo o planejamento ser elaborado em período não seco a fim de evitar que suas ações se restrinjam a ações

emergenciais, indo na contramão de uma lógica proativa que caracteriza a gestão dos riscos (WILHITE *et al.*, 2000).

Segundo González e Morcillo (2007), a gestão da seca no seu sentido mais amplo deve integrar o planejamento dos sistemas hídricos com ações, no intuito de garantir o equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda em horizontes futuros, além de regras de operação desses sistemas para as condições atuais e regras para cenários futuros de seca, e ainda estratégias de gestão e resolução de cenários operacionais para mitigar as condições de seca.

Desse modo, com essa visão de gerenciamento de risco, pelo mundo, tem aparecido diversas iniciativas favorecendo o desenvolvimento de mecanismos proativos de adaptação as secas, promovendo a elaboração de políticas de gestão de seca fundamentadas em ações que têm o intuito de melhorar a previsão ou alerta precoce dos eventos de seca e mitigar os seus impactos.

Em 2008, um estudo realizado na cidade Texas nos Estados Unidos (EUA) avaliou o papel das medidas de gestão de seca no processo de planejamento regional de água, analisando as potenciais vantagens e desvantagens de gestão, incluindo a seca como uma estratégia regional de gestão de água. Os resultados mostraram que o planejamento hídrico contínuo a cada dia vem se sofisticando mais, e abordagens como a modelagem probabilística de suprimentos futuros tem sido implementada (BBC Research & Consulting, 2009).

O Departamento do Meio Ambiente e Conservação de Tennessee (TDEC), em 2010, terminou a atualização de um plano de gestão de seca realizado em 1989, e tinha por objetivo maximizar a capacidade dos recursos hídricos do rio Tennessee nos EUA para suportar seus múltiplos usos independente da ocorrência de episódios de seca, além de fornecer um quadro de ação e cooperação na gestão de recursos hídricos entre agências estaduais e federais com responsabilidades relacionadas à seca (TDEC, 2010).

Venton (2012) por meio do Programa de Desenvolvimento das Terras Secas do Centro de Desenvolvimento das Nações Unidas (UNDP-DDC) mostrou os resultados do Projeto de Assistência de Gerenciamento de Risco de Seca dos Pares África-Ásia que visa facilitar a disseminação de conhecimentos e cooperação técnica entre os países propensos à seca na África e Ásia a fim de promover as melhores práticas de gestão de risco de seca para o desenvolvimento das duas regiões. Do trabalho conclui-se que a abordagem utilizada é uma resposta aos principais impactos da seca (por exemplo, diminuição de rendimento

das colheitas, aumento da insegurança alimentar e exaustão de água para uso humano), em vez de uma tentativa de resolver a seca propriamente dita.

No continente europeu, um exemplo positivo de gestão de risco de seca é representado pelo projeto MEDROPLAN (*Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning*) que tinha o objetivo de desenvolver diretrizes para a elaboração de planos de prevenção e preparação para situações de seca. Como parte desse projeto, Cubillo e Ibáñez (2007) desenvolveram o manual do sistema de abastecimento de água urbana do Canal de Isabel II que expressa que, para se obter um bom gerenciamento de seca, é preciso estabelecer o risco de escassez e incapacidade do sistema de abastecimento de satisfazer todas as demandas, estabelecer políticas de gerenciamento eficiente dos recursos e da demanda hídrica, assegurar um gerenciamento sustentável e integrado dos recursos, estabelecer diretrizes, integrar a satisfação de restrições ambientais e de sustentabilidade dos ecossistemas relacionados à operação do sistema de abastecimento, gerenciar o sistema de abastecimento em caso de contingências de larga escala e anomalias e planejar ações para garantir o abastecimento de água a médio e longo prazo com o estabelecimento de níveis de risco.

Ainda no domínio europeu, Andreu *et al.* (2009) descreve como gerenciar a seca e comenta a importância do uso de um sistema de Sistema de Suporte a Decisão (SSD) como uma ferramenta capaz de prover informações sobre estimativa de risco, avaliação sobre a eficiência das medidas de mitigação e uma visão compartilhada comum do sistema de recursos hídricos na resolução de conflitos entre partes interessadas. O trabalho foi desenvolvido na bacia do rio Jucar, na Espanha.

Outro trabalho na Espanha foi desenvolvido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2007, um Plano Especial de Secas da Bacia Hidrográfica do Tejo, em que o objetivo básico era articular medidas de controle, avaliação de risco, organização das tomadas de decisões e implantação de medidas de mitigação para minimizar a frequência e a intensidade das situações de escassez de recursos hídricos, assim como reduzir os efeitos ambientais e socioeconômicos desta situação extrema. Nesse contexto, o plano tenta resolver questões fundamentais de quando e como atuar e quem são os responsáveis pela gestão (MMA, 2007).

Medicino *et al.* (2008) mostram um exemplo de gerenciamento dos recursos hídricos sobre condições de seca agrícola aplicado no Sul da Itália. O estudo mostrou que o conceito de abordagem proativa pode ser alcançado através do desenvolvimento de três planos, que são o Plano Estratégico de Escassez de Água, com o objetivo reduzir a

vulnerabilidade do sistema de abastecimento adotando medidas de mitigação de longo prazo em condições normais, o Plano de Gerenciamento do Sistema de Abastecimento Hídrico, que deve ser adotado para evitar o início de uma emergência hídrica real, e o Plano de Contingência de Seca, adotado quando secas excepcionais causam grandes impactos. A metodologia adotada, utilizou simulação de modelos e técnicas de análise de decisão multicritério, mostrou um exemplo para escolha de alternativas preferíveis minimizando o nível de subjetividade, considerando os aspectos ambientais, econômicos e sociais, levando em consideração o ponto de vista de todas as partes interessadas.

Na Austrália, o Conselho Australiano de Agricultura, Recursos Econômicos e Ciências (ABARES) em 2011 finalizou um relatório que detalha o estudo do contexto australiano de política e gestão de seca e dos recursos hídricos. Os objetivos gerais do trabalho desenvolvido são fornecer contramedidas para melhorar as políticas e as medidas preventivas em relação a seca severa e de longa duração para a realização de um gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, desenvolver acordos e parcerias entre agências australianas semelhantes e aumentar a capacidade dos funcionários e especialistas envolvidos na atividade de implementar novas políticas e medidas defensivas. Os objetivos mais específicos são mais consistentes com a prática agrícola sustentável, com o sistema de plantio direto, com o manejo de vegetação nativa e retenção do solo, frequentemente abordado em programas de gestão de recursos naturais. Os resultados mostraram que a investigação sobre a mitigação das mudanças climáticas, opções de adaptação e o desenvolvimento e promoção de estratégias serão vitais para auxiliar os agricultores a gerenciar os riscos climáticos. Além disso, foi possível concluir que o governo tem um papel de incentivar uma melhor gestão de riscos e fornecer informações para o uso de agricultores, tomadores de decisão e outros interessados, mesmo reconhecendo que a maioria dos agricultores não eram dependentes do apoio do governo durante as secas (ABARES, 2012).

2.4 Sistemas de alerta precoce de seca e experiências

Na visão de gerenciamento de risco, um sistema de alerta precoce de seca (SAPS) pode servir como um mecanismo proativo de mitigação e adaptação, possibilitando a previsão de eventos de seca e antecipando a visualização de prováveis impactos.

Entretanto, um SAPS envolve mais do que um simples desenvolvimento e difusão de uma previsão hidroclimática, devendo ser capaz de determinar a probabilidade de ocorrência de eventos de seca e de monitorar a sua extensão espacial, duração e severidade a fim de poder fornecer recursos para avaliação de riscos e cenários relevantes que possam antecipar uma crise hídrica, bem como sua evolução (PULWART e SIVAKUMAR, 2014).

A Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres (UNISDR, 2006) considera que sistemas de alerta precoce devem integrar quatro elementos básicos: conhecimento dos riscos, acompanhamento técnico e serviço de alerta, emissão de alertas para grupos em risco, sensibilização do público e preparação para ações de mitigação.

Wilhete e Svodoba (2000) discutem o estado do planejamento da seca nos Estados Unidos e enfatizam o papel fundamental desempenhado pelo SAPS na elaboração de planos de seca, pois fornecem a base sobre a qual as decisões oportunas podem ser feitas por tomadores de decisão. O estudo comenta que, o monitoramento e a previsão de componentes do sistema hidrológico são os únicos mecanismos que se tem para detectar o início precoce da seca e seus potenciais impactos, sendo esta informação relevante para o arranque e suspensão dos programas de mitigação e respostas emergenciais que fazem para o plano de preparação para a seca.

Nesse âmbito, Buchanan-Smith (2000) comenta que um SAPS deve fazer sua informação acessível e fácil de interpretar, de maneira a entregar uma mensagem clara e consistente para os tomadores de decisão. Ainda comenta, que a informação de aviso prévio provavelmente só será utilizada se essa for confiável, sendo mais provável que seja confiável se os tomadores de decisão têm uma participação no sistema, pois embora ainda haja espaço para melhoria da metodologia de alerta precoce, o maior desafio para muitos é garantir que a informação de sistemas como esse seja levada a sério pelos tomadores de decisões, de maneira que eles possam agir em tempo oportuno.

Além disso, Buchanan-Smith (2000) toma nota de que medidas de contingência da seca devem ser integradas em planos de desenvolvimento e de emergência de maneira que uma resposta apropriada com a identificação da responsabilidade institucional e da tomada de decisão esteja indicada quando a seca ocorre.

Pulwart e Sivakumar (2014) analisam até que ponto a informação de monitoramento, previsão, avaliação de riscos e a geração de cenários, dos quais a alerta precoce é uma componente de saída, é incorporada nas respostas e práticas de adaptação.

Em uma breve pesquisa sobre SAPS nacionais e internacionais, o artigo mostra que um alerta eficaz depende de uma colaboração multi-setorial e interdisciplinar entre todos os agentes ou órgãos envolvidos no processo de monitoramento, alerta, avaliação e resposta. Ainda segundo os autores do estudo, em uma abordagem proativa, sistemas de alerta precoce são fundamentais para a avaliação integrada dos riscos, sistema de suporte a decisão e comunicação dos sistemas de informação de seca.

Nessa temática, a seguir serão apresentados alguns estudos sobre sistemas de alerta precoce em diferentes escalas espaciais e temporais à níveis internacional, nacional, regional e local no intuito de promover práticas e conhecimentos que gerem um melhor entendimento, aceitabilidade e confiança em relação aos mesmos.

Pozzi *et al.* (2013), em escala mundial, destaca um sistema de informação precoce de seca global em desenvolvimento, que visa melhorar o monitoramento e a capacidade de previsão continental em várias escalas, aumentando a capacidade das instituições nacionais e regionais que não possuem sistemas de alerta precoce ou complementando os já existentes, além de propiciar uma melhor coordenação da entrega de informação para atividades relacionadas com a seca.

Kirang Li (2000) discute sobre o progresso do SAPS e do sistema de avaliação do impacto climático na China. Usando técnicas de sensoriamento remoto e estações de observação, foi possível um grande progresso na monitoração dinâmica da umidade do solo e da seca na China. O sistema de monitoração da seca-cheia e o sistema operacional para avaliação do impacto do clima e da previsão de clima de curto prazo, desenvolvidos pela *China National Climate Center* (CNCC), atualmente fornecem cerca de 14 produtos que informam sobre a ocorrência e a evolução das secas em tempo real, além de emitir alertas precoces, e publica informativos para tomada de decisão e bem-estar público.

Akeh *et al.* (2000) avaliam o desempenho das previsões de um sistema de alerta precoce desenvolvido pela equipe do Departamento Nigeriano de Serviços Meteorológicos (NDMS) e a sua eficácia para a preparação e gestão das secas na Nigéria. Os resultados identificaram que na região norte há uma maior incidência que eventos de seca do que na região sul, em relação ao desempenho dos modelos de previsão nota-se que o skill é baixo, porém ainda satisfatórios para fins de planejamento conforme evidenciado pelos utilizadores do sistema, tais como as organizações governamentais, indústria agrícola, mídia e público em geral.

Liu *et al.* (2004) propõem um SAPS baseado em dados de previsão do clima no intuito de fornecer informações para a gestão de recursos hídricos em Taipei,

localizada em Taiwan. O sistema é consistido por um modelo dinâmico acoplado a um modelo de vazões e de demanda, que simula o sistema de abastecimento de água por um período de três a seis meses. Os resultados mostraram que o sistema de alerta é capaz de fornecer subsídio para os tomadores de decisões determinar com antecedência estratégias de gestão de recursos hídricos, apesar de o sistema proposto ainda necessitar de melhorias na técnica de redução de escala e na transformação de dados.

Hallegate (2012) estima os potenciais custos e benefícios de se produzir informação hidroclimática e sistemas de alerta precoce em países em desenvolvimento. Segundo o estudo, um sistema de alerta poderia evitar entre 46 milhões e 2,7 bilhões de euros de perdas por desastres por ano e produzir um custo-benefício total que poderia alcançar entre US\$ 3 bilhões e US\$ 36 bilhões de dólares por ano, além de salvar muitas vidas.

Vieira *et al.* (2013) discutem as bases conceituais e metodológicas para um sistema de detecção precoce de seca e desertificação no NEB. Esse sistema integra dados de sensoriamento remoto e previsões meteorológicas que permitem avaliar as áreas mais suscetíveis, melhorando a compreensão dos efeitos combinados de seca e desertificação.

Vieira *et al.* (2015) usam a metodologia do projeto da União Europeia MEDALUS (*Mediterranean Desertification and Land Use*) para identificar áreas que são sensíveis à desertificação no NEB. O estudo utilizou dados consolidados do projeto denominado Sistema de Alerta Precoce Contra a Seca e Desertificação desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com o MMA. A implementação da metodologia fornece informações básicas para o diagnóstico e prognóstico da desertificação, conjecturando uma base técnica para tomadas de decisão que envolvem ações de mitigação e adaptação.

Medeiros (2015) no intuito de contribuir com um instrumento de monitoramento e alerta dos municípios mais vulneráveis as adversidades da seca no estado do Ceará, através do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) disponibiliza para a sociedade o Índice Municipal de Alerta (IMA), que visa mensurar as vulnerabilidades climáticas, agrícolas e de assistência social, de maneira que, tais indicadores analisados conjuntamente possam permitir a adoção de ações voltadas para a mitigação dos problemas decorrentes variabilidade climática e da instabilidade econômica e social dos municípios. Sob perspectiva de sistema de alerta, têm-se que em 2015 constatou-se que 27 municípios se encontravam na classe de alta vulnerabilidade do IMA, indicando que estes constituíram o grupo de prioridade no que tange a implementação de ações de mitigação pelo governo do Estado.

2.5 Índices de seca

Um índice de seca, por definição, é uma variável que serve para identificar e avaliar as condições de seca, isto é, um indicador utilizado para caracterizar a intensidade, duração, severidade e até extensão espacial da seca. Comumente, índices de seca são baseados em variáveis meteorológicas e/ou hidrológicas, tais como precipitação, temperatura, evaporação, evapotranspiração, umidade do solo, vazão, volume armazenado de água, entre outras e expressam em números o nível de gravidade da seca, facilitando a compreensão da complexidade da situação de seca para os tomadores de decisões (BARRA *et al.*, 2002; STEINEMANN, 2003).

Heim Junior (2002) faz um levantamento histórico e uma síntese dos principais índices de seca desenvolvidos no século XX nos EUA, onde foi possível verificar que o índice mais amplamente utilizado é o *Palmer Drought Severity Index* (PDSI). Outros índices dentre os mais aceitos no EUA são o *Standardized Precipitation Index* (SPI), o *Crop Moisture Index* (CMI), o *Surface Water Supply Index* (SWSI) e o *Reclamation Drought Index* (RDI).

Outro estudo relevante realizado nos EUA é o de Keyantash e Dracup (2002), que avalia os índices de seca mais proeminente para vários tipos de seca (meteorológica, hidrológica e agrícola), aplicando um conjunto ponderado de seis critérios (robustez, tratabilidade, transparência, sofisticação, extensibilidade e dimensionalidade) de avaliação. Para seca meteorológica, os índices analisados foram a anomalia de precipitação acumulada e discreta, decim de chuva, o PDSI, o índice de área seca, o índice de anomalia de chuva e o SPI. Para seca hidrológica, os índices avaliados foram o déficit total de água, a anomalia de vazões acumuladas, o índice de severidade de seca hidrológica Palmer (PHDI) e o SWSI. Para seca agrícola, os índices em estudo foram o (CMI), o índice de anomalia umidade Palmer, a umidade do solo computadorizada e o índice de anomalia da umidade do solo.

Os resultados de Keyantash e Dracup (2002) mostraram que os índices que obtiveram as melhores pontuações segundo os critérios de avaliação escolhidos foram os decim de chuva e o SPI na ocorrência de seca meteorológica, o déficit total de água na ocorrência de seca hidrológica, sendo interessante enfatizar também o SWSI como o mais robusto dentre os índices que representam seca hidrológica, e a umidade de solo computada na seca agrícola.

O SPI foi desenvolvido por McKee *et al.* (1993, 1995), teve grande divulgação e baseia-se na distribuição de probabilidade da precipitação e pode ser calculado em

diferentes escalas de tempo. Por ser um índice normalizado, permite adequada comparação entre diferentes locais e climas.

Hayes et al. (1999) fizeram uma análise da seca de 1996 em planícies do sul e sudoeste dos EUA e no Texas, utilizando o SPI que permite o monitoramento do abastecimento de água a curto prazo, como umidade do solo, e a longo prazo, como recursos hídricos. Os resultados mostraram que o SPI foi capaz de monitorar o início e a progressão da seca de 1996, sendo que o SPI detectou a seca pelo menos um mês antes do que o PDSI.

Domingos (2006) realizou um estudo no intuito de implementar e avaliar o SPI para o Portugal Continental, investigando sua capacidade de informação complementar ao PDSI no acompanhamento de situações de seca. Para isso, foi feita uma comparação entre os dois índices. Pelos resultados, verifica-se que houve uma maior ocorrência de seca na segunda metade da série em estudo e que correlação entre o SPI e PDSI é mais forte nas escalas de 3 a 6 meses para a maior parte das estações em estudo.

Um índice associado ao SPI é o *Standardized Runoff Index* (SRI), que são semelhantes quando se baseiam em um longo período de acumulação, porém o SRI incorpora processos hidrológicos que determinam defasagens sazonais na influência de clima na vazão. Em escalas de tempo mensal para sazonal, o SRI é um complemento útil do SPI para retratar os aspectos hidrológicos de seca (SHUKLA e WOOD, 2008).

Outro índice de seca semelhante ao SPI é o *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI), recentemente desenvolvido por Vicente-Serrano *et al.* (2010). O SPEI, assim como o PDSI, considera os efeitos da evapotranspiração de referência sobre a severidade da seca, porém a natureza multi-escalar do SPEI permite identificar os tipos diferentes de secas e de impactos da seca sobre diversos sistemas. Com isso, o SPEI tem a sensibilidade do PDSI em relação a evapotranspiração demandada e é multi-escalar como o SPI (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2012). Adicionalmente, têm-se que o SPEI tem sido usado em sistemas de monitoramento de seca e muitos estudos relataram que o SPEI tem uma melhor correlação com variáveis ecológicas e hidrológicas que outros índices de seca (LORENZO-LACRUZ *et al.*, 2010).

Índices de seca quando relacionados com o método de análise de clusters ou método das Análises das Componentes Principais (PCA), facilitam a detecção dos padrões de variabilidade espacial e temporal das secas, além de permitir a definição de regiões homogêneas e heterogêneas quanto à seca e a identificação de tendências e mudanças dentro dessas regiões (BORDI *et al.*, 2004; PAULO, 2010; SANTOS *et al.*, 2010).

Índices de seca também podem ser utilizados para predição das transições do grau de severidade das secas, sendo isso possível por meio da utilização de técnicas como a cadeia de *Markov* homogênea e não-homogênea e modelos log-lineares (LOHANI e LOGANATHAN, 1997; STEINEMANN, 2003; PAULO et al., 2005; MOREIRA et al., 2006; PAULO e PEREIRA, 2007; PIRES e SOUZA, 2010).

Nesse contexto, os índices de seca têm se tornado uma das ferramentas mais adequadas para entender e enfrentar a escassez hídrica. Entretanto, necessita-se de um certo cuidado quanto a utilização dos índices de seca, pois a maioria destes possuem formulações que não podem ser adequadas às condições climáticas da região. Outra desvantagem da utilização desses índices é que para se alcançar resultados consistentes é necessária uma série histórica longa (mínimo 30 anos), o que ainda é agravado pela difícil obtenção de algumas variáveis (ALBUQUERQUE, 2010).

3 LOCAL DE APLICAÇÃO: SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANA

O sistema Jaguaribe-Metropolitana é formado pela região hidrográfica do Jaguaribe (RHJ) e região metropolitana de Fortaleza (RMF), as quais estão interligadas pelo Eixão das Águas, localizados no estado do Ceará. A RHJ é dividida em cinco sub-bacias: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado. O sistema de abastecimento da RMF, aqui considerado, é composto por cinco reservatórios, são eles: Gavião, Pacoti, Riachão e Pacajus, sendo estes reservatórios interligados por canais e adutoras.

A bacia do Alto Jaguaribe é onde encontra-se as nascentes do rio Jaguaribe, abrange uma área de drenagem de aproximadamente 24.640.000 m² com capacidade total de acumulação de água superficiais de aproximadamente 2.792.563.000 m³, sendo o açude Orós o maior reservatório de acumulação de água desta região, com uma capacidade total de 1.940.000.000 m³.

A bacia do Médio Jaguaribe situa-se entre o açude Orós e o distrito Peixe Gordo, tendo uma área equivalente a aproximadamente 13% do território cearense, correspondendo a uma área de drenagem de 10.335 km². Nesta região ocorre a perenização do rio Jaguaribe através da liberação de vazão do açude Orós que se encontra a montante e nela também está localizado o açude Castanhão, o maior do estado, com capacidade de acumulação de 6.700.000.000 m³ correspondendo a mais de 97% da capacidade total armazenada nesta sub-região.

A sub-região do Baixo Jaguaribe é a de menor área que compõe a região RHJ, correspondendo apenas a 4,64 % do território cearense, drenando aproximadamente 7.021 km², que se estende desde a localidade de Peixe Gordo até sua foz em Fortim. O principal açude da região é chamado de Santo Antônio de Russas, possuindo uma capacidade total de acumulação de 24.000.000 m³.

A sub-região do Banabuiú tem uma posição central dentro do Estado, sendo uma das áreas mais submetidas a rigurosidade do semiárido. Esta bacia apresenta uma capacidade de acumulação de 2.768.074.745 m³ obtidos pelo total de 18 açudes gerenciados pela COGERH. O açude Banabuiú é o responsável por mais de 50% do volume de acumulação desta sub-região, sendo este a terceira reserva hídrica mais importante da RHJ.

A sub-região do Salgado possui uma área de drenagem de 126.238.900 m², equivalente a 9% do território cearense, com uma baixa capacidade de acumulação de

aguas superficiais, destacando-se os açudes Atalho e Lima Campos que juntos respondem por 39% da capacidade de acumulação total.

A RHJ possui demanda hidricamente cerca de 31 m³/s, sendo 52% destinados a irrigação de culturas e 41% ao Eixão das Águas. Brasil (2011) comenta que a irrigação representa aproximadamente 90% da produção agrícola dessa região, em que pode-se destacar 2 dos 15 perímetros de irrigação aqui localizados, o Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi (DIJA) e o perímetro de Morada Nova.

O Produto Interno Bruto (PIB) da mesorregião Jaguaribe em 2013 foi R\$ 5.683.215.000, com um crescimento de cerca de 2 bilhões de reais em 3 anos, tendo como referência o ano de 2010 com um PIB de R\$ 3.666.338.000. Para um mesmo intervalo de tempo, tem-se que o PIB de 2010 cresceu aproximadamente 1 bilhão de reais, tendo como referência o ano de 2007 com um PIB de R\$ 2.575.224.000 (IBGE, 2016). Como a região do Jaguaribe tem um PIB bastante dependente da agricultura irrigada, pode-se inferir que o aumento do PIB indica um crescimento da demanda por água na bacia.

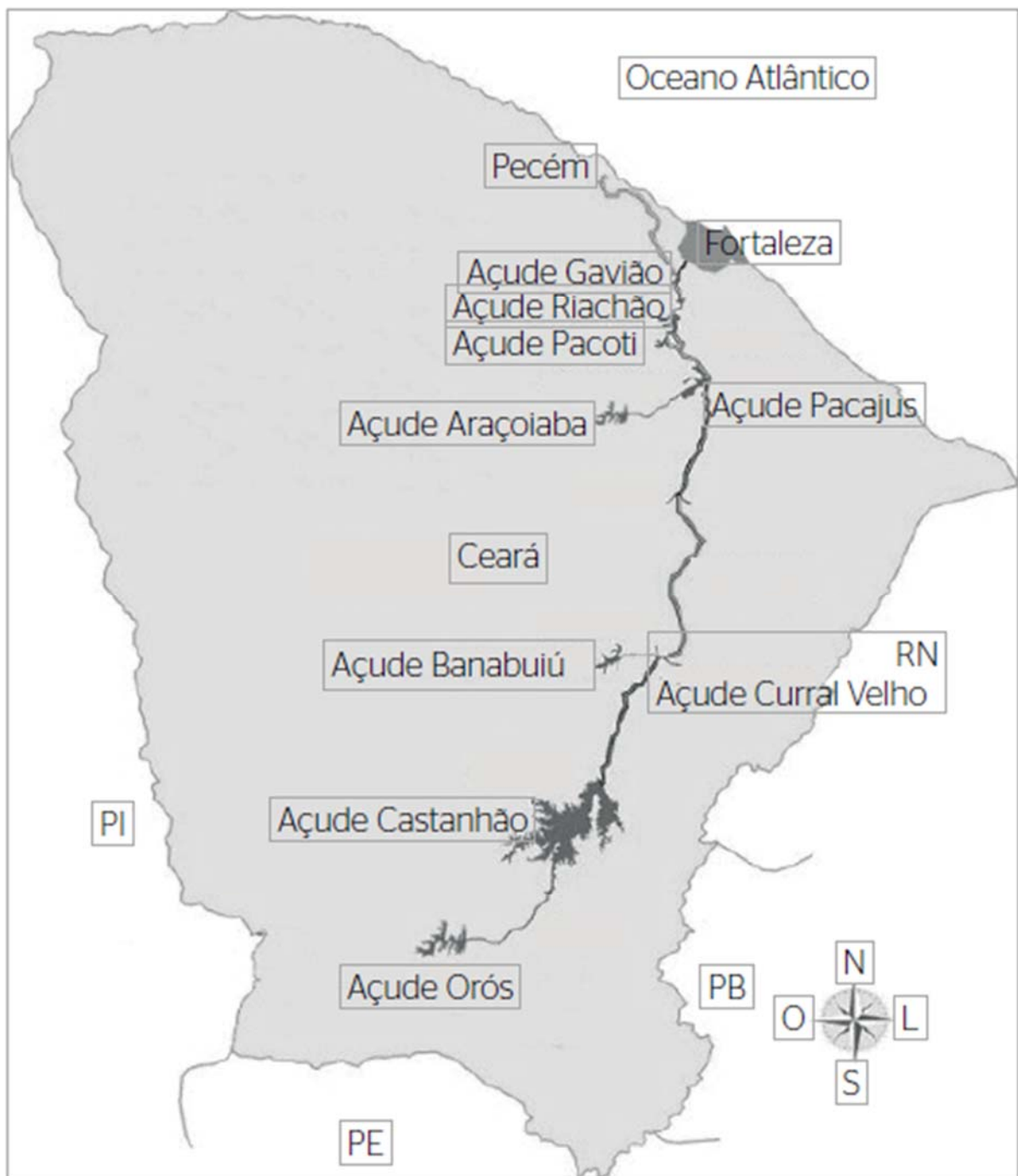
A RMF compõe-se de 15 municípios que constituem um importante aglomerado demográfico, são eles: Aquiraz, Cascavel, Caucaia, Chorozinho, Eusébio, Fortaleza, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajus, Pacatuba, Pindoretama e São Gonçalo do Amarante. Ela possui 4.514.694 habitantes dos quais 74% são residentes de Fortaleza (IBGE, 2013).

Na RMF o PIB em 2013 foi de R\$ 68.484.861.000 e em 2010 de R\$ 49.911.488.000, um crescimento de cerca de 18,5 bilhões de reais. Comparando com o ano de 2007, em que o PIB foi de R\$ 31.811.591.000, tem-se que o crescimento foi de aproximadamente 36,6 bilhão de reais (IBGE, 2016).

Atualmente, devido às políticas de industrialização do Estado, que ocasionaram aumentos significativos na demanda hídrica desta região, o abastecimento tem sido atendido por águas provenientes da transposição de bacias da Região Hidrográfica do Jaguaribe através do canal do trabalhador e pelo Eixão das Águas formando o Sistema de abastecimento Jaguaribe-Metropolitano (FIGURA 3).

A transposição das águas inicia a jusante da barragem do Açude Castanhão e termina nos Açudes Pacoti, Riachão e Gavião, reservatórios integrantes do Sistema de Abastecimento de Água da RMF. Esta transposição estende-se por 255 Km atingindo o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), localizado no município de São Gonçalo do Amarante na RMF.

Figura 3 – Sistema de abastecimento Jaguaribe-Metropolitana.



Fonte: Adaptado de Silva et al., 2017.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata dos dados e da metodologia utilizada no desenvolvimento desta tese, sendo dividido em três seções. A primeira seção trata da obtenção dos dados base, pelo qual foi possível extrair e analisar os resultados que serão discutidos neste trabalho. A segunda seção discute a metodologia utilizada por um sistema de gerenciamento de seca, de um ponto de vista mais amplo, e trata de um modo mais específico, dos diferentes métodos de previsão de aflúências e/ou volume empregados no estudo, das técnicas de ensemble utilizadas para o agrupamento das previsões e da verificação da previsão, dos cálculos dos índices de seca que serão investigados e da avaliação de desempenho dos mesmos, da estimativa da probabilidade de transição entre estados de seca e por fim de um esquema simbólico matricial de planejamento com aversão ao risco. A última seção sintetiza os procedimentos metodológicos para a elaboração de planos de seca em hidrossistemas urbanos.

4.1 Obtenção de dados do sistema hídrico Jaguaribe-Metropolitana

No desenvolvimento dessa tese foram utilizados dados observados diários de precipitação de postos pluviométricos da FUNCEME agregados com dados da SUDENE, entre o período de 1912 e 2015, distribuídos sobre a região de estudo. Os dados diários adquiridos foram transformados em séries mensais.

Os dados de evaporação foram obtidos nas Normais Climatológicas de 1961-1990 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que utiliza o Evaporímetro de Piché para cálculo destes valores sendo que as evaporações associadas aos reservatórios que compõem o sistema hídrico são aquelas disponíveis da estação mais próxima ao mesmo.

Dados de aflúência foram obtidos no relatório de regionalização de vazões da COGERH (2013) para o período de 1912 a 2012. Neste relatório da COGERH foi utilizado o modelo SMAP para a calibração e geração de vazões, com discretização temporal mensal. Tais dados foram tratados como observação no desenvolvimento dessa tese. A COGERH também cedeu uma série histórica de cotas, em que se interpola a curva cota-área-volume de cada reservatório do sistema Jaguaribe Metropolitano, a fim de se obter o volume.

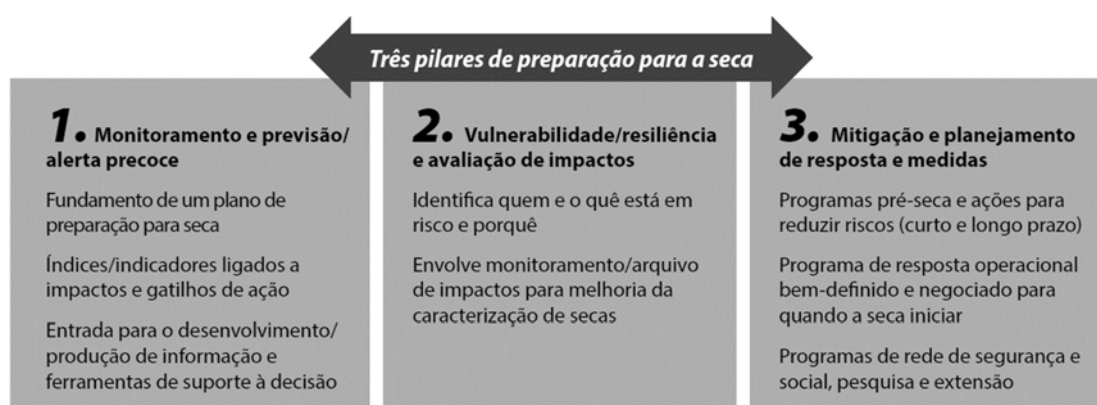
Os dados de aflúência previstas foram gerados primeiro por downscaling dinâmico, realizado pela FUNCEME, acoplado a um modelo hidrológico do tipo chuva-

vazão, e segundo por um método de reamostragem condicional baseados nos dados de afluência cedidos pela COGERH e também pela modelagem baseado em técnica de rede neural (ver seção 4.2.1). Adicionalmente, simulou-se dados de volume por meio do modelo de operação de reservatório (CID, 2017) utilizando os dados de vazão afluente supracitados com uma determinada retirada mensal, simulados para o mesmo período das vazões de entrada.

4.2 Sistema de gerenciamento de seca

O sistema de gerenciamento de seca proposto nesse estudo é baseado nos três pilares de preparação as secas, que contempla o monitoramento e a previsão sazonal de afluências do sistema hídrico em foco, a análise de vulnerabilidades e o desenvolvimento de ações categorizadas de mitigação para cada estado de seca (QUADRO 1).

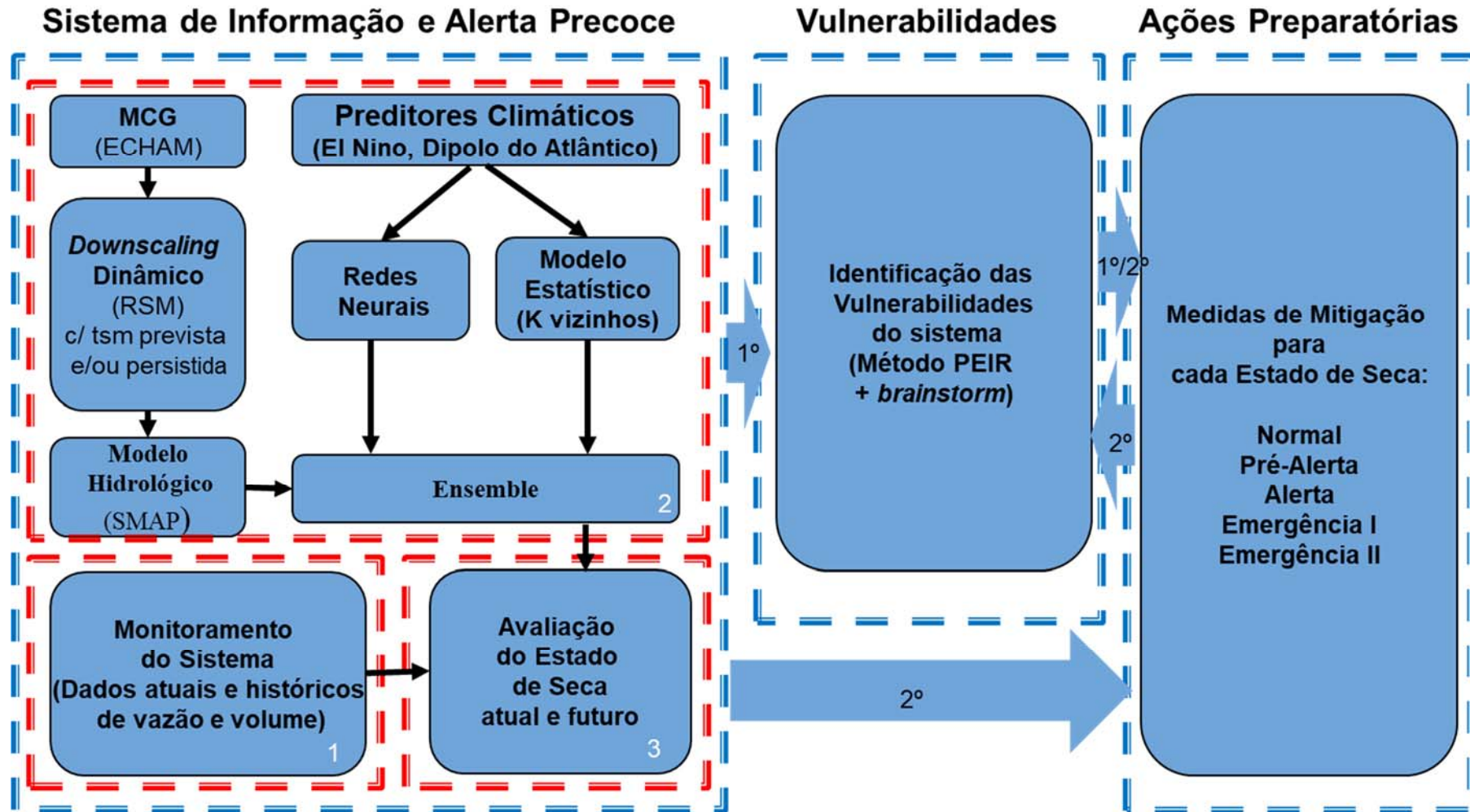
Quadro 1 – Pilares de preparação para a seca.



Fonte: De Nys e Engle (2014).

Para o monitoramento e a alerta precoce, principal foco desse estudo, foi criado um Sistema de Informação e Alerta Precoce de Seca (SIAPS) capaz de fornecer suporte para a identificação de impactos e vulnerabilidade das secas, bem como possibilitar o disparo de ações de mitigação de curto e longo prazo para esse evento. A arquitetura do SIAPS com seus três blocos componentes e dos demais elementos do sistema de gerenciamento de seca aqui utilizado podem ser observados em forma de fluxograma na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do sistema de gerenciamento de seca.



Fonte: Elaboração própria.

O monitoramento, componente primordial e primário do SIAPS, é feito pela análise de séries temporais históricas e de dados atuais de precipitação, vazão e volume dos sistemas hídricos em estudo, esses dados servem para identificar o estado de seca atual e passado, no intuito de se ter noção de tendência de agravamento da seca ou de alívio da mesma, permitindo o disparo de ações proativas de mitigação para cada estado de seca, que poderão ser deflagradas mediante limiares dos índices de seca baseado nas variáveis citadas.

O segundo bloco do SIAPS se refere a previsão de afluências e/ou volumes, que foram realizados por métodos dinâmicos, estatísticos e técnicas de *machine learning*, e utilizando-se de limiares (ver seção 4.2.3) para monitorar e prognosticar o estado de seca de cada sistema hídrico e o cálculo da probabilidade de transição do mesmo (ver seção 4.2.5), permitindo uma avaliação integrada do estado de seca atual e futuro, especificado pelo terceiro bloco do SIAPS, a fim de antecipar as ações implementadas, ou seja, saber o momento de planejar o próximo estado de seca.

Em seguida, faz-se uma análise das vulnerabilidades do sistema hídrico (seção 4.3.2), a fim de identificar as áreas, que mais são afetadas pela escassez hídrica, a gravidade da seca e as ações que devem ser tomadas conforme uma matriz de aversão ao risco, explanada na seção 4.2.6. Os resultados extraídos do SIAPS aqui proposto, são fundamentais para o planejamento estratégico, tático e emergencial de ações de mitigação e respostas às secas em uma abordagem proativa.

4.2.1 Modelos de Previsão de Afluências

4.2.1.1 *Downscaling* dinâmico acoplado a um modelo chuva-vazão

O método dinâmico, o primeiro citado, para previsão de afluência se baseia em uma técnica de redução de escala, conhecida como *downscaling* dinâmico, em que modelos de circulação geral alimentam modelos climáticos regionais. Para melhor entendimento verificar Reis Junior *et al.* (2010).

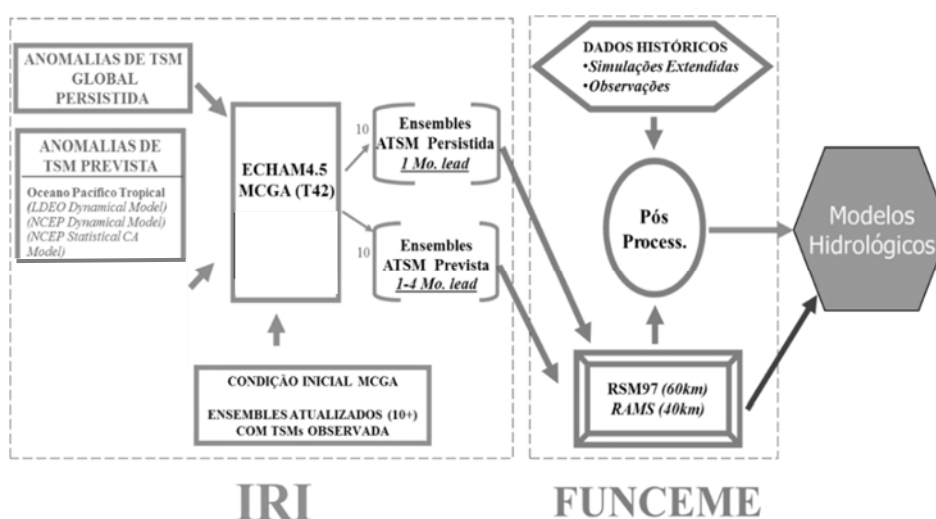
O processamento utilizado nesta técnica, como já dito, foi feito pela FUNCEME, conforme Figura 5, em que dados de anomalias globais de TSM observadas, persistidas e previstas são inseridos no modelo global ECHAM4.5, este por sua vez gera um conjunto de 10 membros de anomalias da TSM persistida e prevista, através de cálculos das equações que regem a dinâmica e a conservação de energia da atmosfera em

escala global, essa primeira fase do método dinâmico foi operacionalizada pelo *International Research Institute (IRI)*. Uma descrição detalhada do ECHAM4.5 pode ser obtida em Roeckner (1996).

Em seguida os resultados do modelo global são aninhados unidirecionalmente a dois modelos numéricos regionais, o RSM de 1997 (RSM97) e o RAMS versão 4.4 (RAMS4.4), que através das equações da dinâmica e da conservação da energia considerando características intrínsecas da região, como por exemplo o relevo, fornecem dados tais como a precipitação pluviométrica, evaporação, entres outros. O RSM97 foi desenvolvido por Juang e Kanamitsu (1994) no centro de modelagem do meio ambiente do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* e sua física está descrita em Kanamitsu *et al.* (1991), em relação RAMS4.4 maiores detalhes da física do modelo são encontrados em Chen e Cotton (1983, 1987), Tremback (1990), Pielke *et al.* (1992), Walko *et al.* (1995), Harrington (1997). A implementação desse downscaling foi realizada conforme Sun *et al.* (2006). As previsões de precipitação utilizadas nessa tese foram a do RSM97.

A precipitação pluviométrica saída dos modelos regionais por sua vez são acoplados, também de maneira unidirecional, ao modelo hidrológico SMAP, gerando finalmente a previsão de vazões de uma determinada localidade ou sistema hídrico. Em caso de sistemas hídricos complexos, como o caso do sistema Jaguaribe-Metropolitana usado nessa tese, considera-se a precipitação média na bacia hidrográfica como entrada do modelo hidrológico. Maiores detalhes sobre a estrutura e calibração do modelo SMAP podem ser obtidos em Lopes *et al.* (1981).

Figura 5 – Esquema utilizado do downscaling dinâmico acoplado ao modelo hidrológico.



Fonte: Traduzido de Sun *et al.* (2006)

4.2.1.2 Método dos k-vizinhos

Para o desenvolvimento desse método foi utilizado uma abordagem semi-paramétrica, semelhante a utilizada em Souza Filho e Lall (2003). Esse método usa a informação de preditores climáticos, previamente conhecidos, que possuem uma boa correlação com a precipitação sobre o local de estudo.

Segundo Moura e Shukla (1981) e Hastenrath (1990) os preditores climáticos que melhor se correlacionam com o Nordeste Brasileiro, e conseqüentemente com o sistema Jaguaribe-Metropolitana, são as Temperaturas do Atlântico Sul (TAS) e as Temperaturas do Atlântico Norte (TAN), cujo gradiente forma o Dipolo do Atlântico Tropical, e o NINO3, disponíveis no site do *Climate Prediction Center* (CPC).

Esse esquema de reamostragem condicional baseia-se em uma regressão linear múltipla, conforme a equação (1),

$$Q = X_1 \beta_1 + X_2 \beta_2 + X_3 \beta_3 + \xi \quad (1)$$

em que Q é o vetor da variável explicada, no caso vazão anual padronizada do hidrossistema, X₁ a X₃ são as componentes da matriz das variáveis explicativas, aqui representadas pelos três preditores climáticos que melhor se relacionam com a vazão, β₁ a β₃ compõem o vetor dos coeficientes da regressão correspondentes aos fatores climáticos utilizados, comumente chamado de “pesos” das variáveis explicativas e ξ é o vetor da variável aleatória residual na qual se procura incluir todas as influências no comportamento de Q que não podem ser explicadas linearmente.

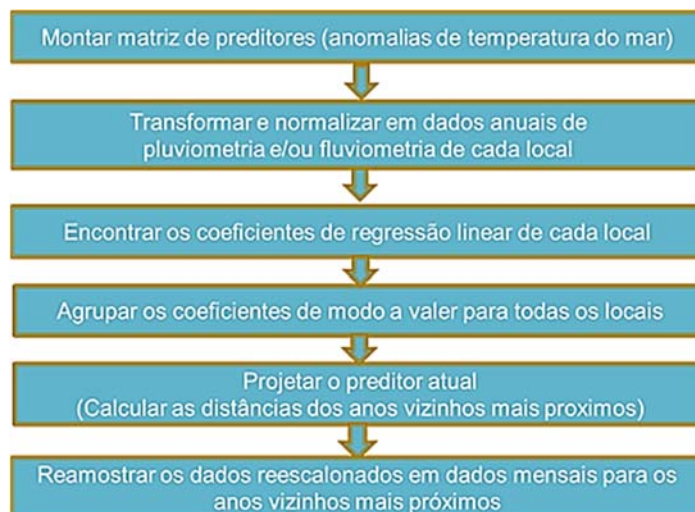
Ainda em relação a regressão múltipla, tem-se que a vazão anual padronizada é utilizada a fim de assegurar que o resíduo dessa regressão tenha um padrão de distribuição e uma variância aproximadamente constante, sendo essa normalização feita pela diminuição do valor da vazão anual pela sua média e dividida pelo desvio padrão da mesma. A matriz dos preditores climáticos é uma matriz da media sazonal dos mesmos, para igual período de tempo da variável reduzida. Através dessa regressão os pesos são obtidos para cada região que compõe o sistema hídrico e depois agrupados por meio do valor médio, técnica denominada de “*pooled regression*” obtendo-se os coeficientes de regressão agrupada para o sistema hídrico como um todo.

Todavia, a regressão não foi usada de maneira direta na previsão, sendo a mesma usada somente na identificação do peso do cálculo da distância entre a condição o ano de previsão e os anos da série histórica, conforme equação (2):

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^3 [(x_j^* - x_{i,j})\beta_j]^2} \quad (2)$$

em que x_j^* é o vetor de preditores atual, $x_{i,j}$ é o valor dos preditores durante o i -ésimo ano da série histórica e β_j é o vetor dos coeficientes da regressão agrupada. Com o vetor distancia calculado tem-se a informação dos anos vizinhos mais próximos, a partir daí faz-se um ordenamento desses valores, de maneira crescente, sendo então a reamostragem baseada no número (k) de vizinhos arbitrados, que no caso desse estudo são 30, ou seja, as estatísticas das vazões previstas serão baseadas nos 30 anos mais próximos. A Figura 6 mostra o mostra um fluxograma que sintetiza os passos para realização dessa modelagem estatística.

Figura 6 – Fluxograma síntese do algoritmo de previsão sazonal multivariado dados um conjunto de preditores climáticos.



Fonte: Adaptado de Souza Filho e Lall (2003).

4.2.1.3 Método Baseado em Redes Neurais com Múltiplas Entradas e uma Saída

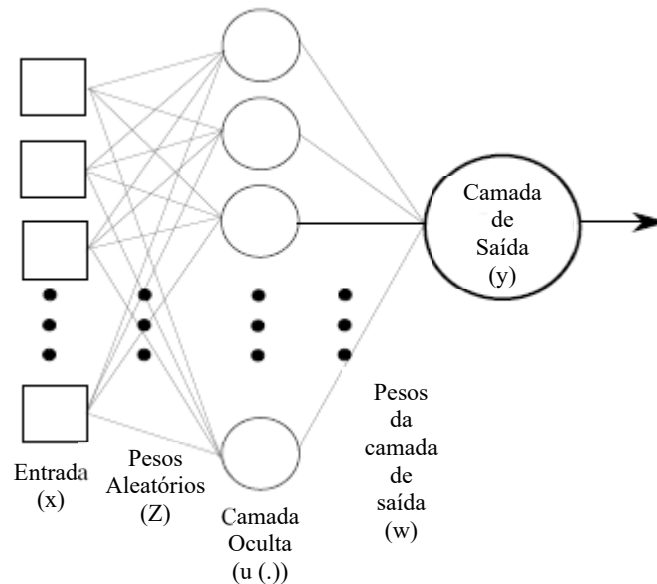
Para o desenvolvimento de mais uma componente do modelo de previsão foram empregadas 2 arquiteturas de redes neurais artificiais (RNA), a primeira conhecida como *Extreme Learning Machines* (ELM) e a segunda conhecida como *MultiLayer Perceptrons* (MLP), ambas são do tipo não-recorrentes, ou seja, precisam de uma fonte de informação externa em relação ao problemas a ser resolvido.

Segundo Menezes Junior (2006) redes neurais do tipo não recorrentes tem um comprovado desempenho em classificação de padrões e na interpolação de funções, pois

combinam características computacionalmente relevantes, tais como capacidade de aprendizado, não linearidade e generalização.

As ELM são compostas por um algoritmo para treinamento de apenas duas camadas, a camada escondida e a camada de saída. As principais peculiaridades desse algoritmo são que, o treinamento dos pesos das camadas existentes é realizado separadamente, os pesos da camada oculta são escolhidos aleatoriamente e os pesos da camada de saída são determinados de maneira analítica, isto é, sem a presença de ciclos iterativos para ajuste dos pesos, geralmente são obtidos de forma direta usando o método da matriz pseudoinversa. A Figura 7 amostra um fluxograma típico das ELM.

Figura 7 – Fluxograma representativo de uma rede neural ELM.



Fonte: Adaptado de Horta (2015)

Os pesos sinápticos associados aos neurônios da camada oculta (z_i), podem ser representados em forma de vetor como

$$z_i = \begin{pmatrix} z_{i0} \\ z_{i1} \\ \vdots \\ z_{id} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_i \\ z_{i1} \\ \vdots \\ z_{id} \end{pmatrix} \quad (3)$$

em que θ_i é o limite relacionado ao i -ésimo neurônio. Para a camada de saída o vetor de pesos sinápticos (w_k) é representado de maneira similar como

$$w_k = \begin{pmatrix} w_{k0} \\ w_{k1} \\ \vdots \\ w_{kq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_k \\ w_{k1} \\ \vdots \\ w_{kq} \end{pmatrix} \quad (4)$$

em que θ_k é o limiar associado ao neurônio de saída k (MENEZES JUNIOR, 2012).

Sendo a inicialização dos pesos da camada oculta feita de forma aleatória pode-se escrever que $z_{ij} \sim U(a,b)$ ou que $z_{ij} \sim N(0,\sigma^2)$, onde $U(a,b)$ é um número pseudoaleatório distribuído uniformemente e $N(0,\sigma^2)$ é um número pseudoaleatório normalmente distribuído com média zero e variância σ^2 (MENEZES JUNIOR, 2012). Neste trabalho, optou-se pela inicialização em que os pesos são uniformemente distribuídos sobre um intervalo aberto entre 0 e 1.

Para a implementação dessa etapa de atribuição de pesos da camada oculta precisa-se definir uma matriz de pesos Z com q linhas e $d + 1$ colunas

$$Z = \begin{pmatrix} z_{10} & z_{11} & \cdots & z_{1d} \\ z_{20} & z_{21} & \cdots & z_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{q0} & z_{q1} & \cdots & z_{qd} \end{pmatrix}_{q \times (d+1)} \quad (5)$$

em que observa-se que as linhas da matriz Z é composta pelos vetores de pesos de cada neurônio oculto (MENEZES JUNIOR, 2012).

Para o treinamento da rede, etapa na qual se faz o cálculo das ativações dos neurônios ocultos e se obtém suas respectivas saídas, após a apresentação do vetor de entrada x , no passo de tempo n , as ativações dos neurônios da camada escondida é realizada através da equação (6):

$$u_i(n) = \sum_{j=1}^d z_{ij} x_j(n) = \mathbf{z}_i^T \mathbf{x}(n), \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (6)$$

em que T se refere ao vetor ou matriz transposta, q indica o número de neurônios da camada escondida e d o número de iterações do treinamento. Em seguida computa-se uma matriz de mapeamento H , ou matriz de saída da camada oculta, por meio da equação (7):

$$H = g[u_i(n)] \quad (7)$$

em que $g[\]$ é uma função de ativação sigmoidal, sendo que nesse estudo optou-se pela função sigmóide logística, dada por:

$$g[u_i(n)] = \frac{1}{1+e^{-u_i(n)}} \cdot \quad (8)$$

A equação (7) ou (8) é por fim utilizada para calcular os valores dos pesos dos neurônios da camada de saída (MENEZES JUNIOR, 2012). Para isso, a arquitetura ELM aqui empregada utilizou-se de duas regras de aprendizagem, a primeira denominada de *Least Mean Square* (LMS) normalizada, também conhecida como regra delta ou regra da pseudoinversa, e a segunda de *Recursive Least Square* (RLS).

O cálculo dos pesos dos neurônios de saída (\mathbf{w}) da rede ELM-LMS envolve a determinação de parâmetros de equacionamento linear. A função do vetor de entrada para

a camada de saída é interpretada pelo vetor $H(n)$ enquanto o vetor da “saída” desejada é representado pelo escalar $ds(n)$, dado por:

$$ds(n) = \mathbf{w}^T \mathbf{H}(n) \quad (9)$$

em que se busca definir o vetor \mathbf{w} que melhor retrata a situação desejada, sendo que o neurônio dessa rede possui regra de aprendizagem dada por

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \frac{\xi e_k H(n)}{\|H(n)\|^2} \quad (10)$$

em que ξ é o passo de aprendizado, e_k é o erro na iteração n obtido pela diferença entre a função alvo e o escalar ds , o $\|H(n)\|^2$ é a norma euclidiana do vetor de saída da camada oculta (LIMA, 2010). O cálculo da saída do k -ésimo neurônio dessa rede é dado por

$$y_k(n) = \mathbf{w}_k^T \mathbf{H}(n) = \sum_{j=1}^q w_{kj} H_j(n) \quad (11)$$

sendo a função custo da regra de aprendizagem dada por,

$$J[w_k] = \min \|\theta_k(n) - y_k(n)\|^2 \quad (12)$$

Para a rede ELM-RLS, o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos se utiliza de uma técnica diferente de minimização da média do quadrado do erro do k -ésimo neurônio $e_k(n)$, a regra de aprendizado dessa rede é dada por

$$w_k(n) = w_k(n-1) + \hat{\mathbf{R}}^{-1}(n) H(n) \mathbf{e}_k^T(n) \quad (13)$$

em que $\mathbf{R}(n)$ é a matriz de auto correlação do vetor $H(n)$ ponderada por um fator de esquecimento que α varia entre 0 e 1,

$$\hat{\mathbf{R}}(n) = \sum \alpha H(n) H^T(n) \quad (14)$$

a inversão dessa matriz e o grande número de cálculos exigidos para sua geração a cada iteração n implica em um grande custo computacional, porém usando a técnica conhecida como lema de inversão de matrizes, $P(n)$, a inversão a cada iteração é evitada, e é dada por

$$P(n) = \hat{\mathbf{R}}^{-1}(n) = \frac{1}{\alpha} \left[P(n-1) - \frac{P(n-1) H(n) H^T(n) P(n-1)}{\alpha + H^T(n) P(n-1) H(n)} \right] \quad (15)$$

em que $P(0) = \rho I$, sendo I a matriz identidade com dimensão $q \times q$ e ρ é uma constante positiva (LIMA, 2010).

A diferença entre as duas matrizes que compõem a expressão (15), conforme Lima (2010), pode originar uma matriz $P(n)$ assimétrica, e isto poderia transformar $P(n)$ em uma função singular. Para minimizar este problema pode-se obter a equação (15) em termos do ganho de Kalman, $k(n)$, explicitado pela transformação do vetor $H(n)$ pela a inversa da matriz $\mathbf{R}(n)$, ou seja,

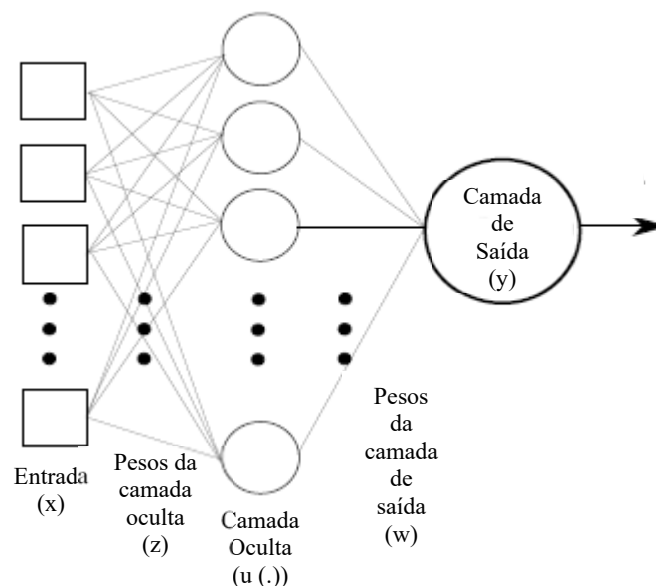
$$k(n) = P(n) H(n) = \hat{\mathbf{R}}^{-1}(n) H(n) \quad (16)$$

com isso, a regra de aprendizagem da rede ELM-RLS em função do ganho de Kalman pode ser expressa por

$$w_k(n) = w_k(n - 1) + k(n) e_k^T(n) \quad (17)$$

A outra arquitetura de rede testada foi a MLP, constituída de uma camada de entrada que recebe as forçantes externas, uma ou mais camadas ocultas compostas geralmente por funções de ativação não lineares, o que possibilita a resolução de problemas complexos, e uma camada de saída composta por neurônios somares cuja função de ativação pode ser linear, sendo o papel dessa última camada o de fornecer a solução ao problema proposto. A Figura 8 esquematiza em um fluxograma os processos de uma rede MLP (MENEZES JÚNIOR, 2012; ARAÚJO, 2013).

Figura 8 – Fluxograma representativo de uma rede neural MLP com uma camada oculta.



Fonte: Adaptado de Horta (2015)

Outra característica relevante, ainda não citada, dessa arquitetura é seu alto nível de conectividade, que está relacionada a comunicação entre os neurônios de diferentes camadas por intermédio de pesos sinápticos. A aprendizagem dessa RNA é feita pelo ajuste dos pesos e limiares calculados por meio de um algoritmo de retropropagação do erro que ocorre em duas etapas, uma direta e outra reversa.

Os pesos sinápticos, da arquitetura MLP, associados aos neurônios da camada oculta (z_i) e aos da camada de saída (w_k) e os limiares dessas camadas, respectivamente θ_i e θ_k , são representados da mesma forma das equações (3) e (4), ou seja, independe do tipo de arquitetura que se está utilizando.

Na primeira etapa da aprendizagem, sentido direto, o fluxo de informação se propaga do neurônio de entrada em direção ao neurônio de saída, e os resultados extraídos dos neurônios ocultos e dos de saída são dados por (LIMA, 2010):

$$v_j(n) = g[u_j(n)] = g\left[\sum_{i=1}^q z_{ij}x_i(n) - z_{i0}\right] \quad (18)$$

$$y_k(n) = g[u_k(n)] = g\left[\sum_{j=1}^c w_{kj}x_j(n) - w_{k0}\right] \quad (19)$$

em que q e c são os números de neurônios ocultos e de saída, respectivamente, e z_{i0} e w_{k0} são os respectivos limiares de ativação de cada camada. As funções de ativação $g[\]$ utilizadas pelas equações (18) e (19) foram a sigmóide logística, conforme equação (8), e uma função linear semelhante a equação (6).

No sentido reverso, segunda etapa de aprendizagem, o fluxo de informação se dar dos neurônios de saída para os da camada oculta. Assim, com os erros obtidos após a finalização da primeira etapa $e_k(n)$, calcula-se os gradientes locais $\delta(n)$ de todos os neurônios da rede, seja ele oculto ou de saída. Para a camada de saída $\delta_k(n)$ é dado por

$$\delta_k(n) = e_k(n)g'[u_k(n)] \quad (20)$$

em que $g'[u_k(n)]$ é a derivada da função linear. Para a camada escondida $\delta_j(n)$ é dado por

$$\delta_j(n) = g'[u_j(n)] \sum_{k=1}^c w_{kj} \delta_k(n) \quad (21)$$

em que $g'[u_j(n)]$ é a derivada da função sigmoide logística expressa na equação (22),

$$g'[u_j(n)] = \frac{1}{1+e^{-u_j(n)}} \left(1 - \frac{1}{1+e^{-u_j(n)}}\right). \quad (22)$$

O próximo passo da fase reversa está relacionado ao processo de atualização dos pesos e limiares. Os pesos sinápticos que conectam os neurônios de entrada com os neurônios ocultos possuem regra de aprendizagem dada por,

$$z_{ji}(n+1) = z_{ji}(n) + \xi \delta_j(n) x_i(n) \quad (23)$$

e a regra de aprendizagem dos pesos que ligam os neurônios da camada escondida e de saída é dado por

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \xi \delta_k(n) v_j(n) \quad (23)$$

com isso, conclui-se uma iteração de treinamento (LIMA, 2010; MENEZES JÚNIOR, 2012).

Após a fase de treinamento, sucede-se a fase de teste e capacidade de generalização das redes ELM e MPL em estudo. Para rede ELM, uma vez definidas as matrizes de pesos Z e W , adquiridas após a fase de treinamento, calcula-se as ativações dos neurônios de saída por meio da equação (24)

$$a(t) = WH(t) \quad (24)$$

em que t representação uma iteração qualquer dentro do período de generalização.

Para esta fase da rede ELM assume-se que os neurônios de saída são iguais as suas ativações, logo (LIMA, 2010):

$$y(t) = g[a(t)] = a(t) \quad (25)$$

Para rede MLP, após o procedimento de determinação dos pesos sinápticos Z e W , computa-se as ativações dos neurônios ocultos e da camada de saída, respectivamente, pelas equações (26) e (27):

$$v(t) = g[Zx(t)] \quad (26)$$

$$y(t) = g[Wv(t)] \quad (27)$$

4.2.1.3.1 Desagregação e *bootstrap* dos dados de saída das Redes Neurais

Para auxiliar na qualidade de previsão por RNA das afluições dos reservatórios que compõem o SJM, optou-se por se fazer o prognóstico da vazão média sazonal, mais especificamente a vazão média agregada dos meses de janeiro a junho de cada ano previsto. Entretanto, para esta tese o que interessa é a previsão de vazões mensais para o 1º semestre, pois serão necessárias para realizar a operação dos reservatórios que será vista mais adiante.

Dessa forma, afim de obter os dados de afluições mensais optou-se por uma desagregação obtida pelo método dos fragmentos de Svanidze(1980) , que se caracteriza pela determinação de um coeficiente de fragmentação (f_j) para cada mês, dados por:

$$f_j = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j} \quad (28)$$

sendo n = número de meses ($n = 6$) e Q_j é o valor mensal climatológico obtido a partir da série histórica dos dados observados. Os fragmentos f_j se referem à porcentagem da vazão semestral climatológica, esses coeficientes são obtidos para cada reservatório em estudo.

Assim, para se obter a vazão prevista para um respectivo mês de um ano qualquer contido na previsão da vazão sazonal basta multiplicar o valor de f_j pela vazão sazonal do ano previsto.

Em seguida à obtenção dos dados de vazões mensais, realizou-se um procedimento *bootstrap*, que é uma técnica de reamostragem de dados com reposição dos mesmos, isto é, um número de valores pode ser sorteado a partir de uma amostra, com direito a reposição dos valores já sorteados. Essa técnica pode ser repetida definidas vezes até que se obtenha um número de desejado de amostras.

Existem diversas maneiras de realização de um *bootstrap*, porém para esse estudo foi utilizado o método de reamostragem dos resíduos para a construção do *bootstrap*, conforme proposto por Efron (1979). Esse método consiste na utilização dos resíduos para formar uma amostra de pseudo-erros aleatórios, que posteriormente servem para estabelecer pseudodados.

O procedimento, de forma detalhada, para realização do bootstrap dos resíduos realizado nesse estudo foi:

1. Calcular o erro para período histórico, que está associado ao período do modelo de previsão dinâmica no modo *hindcast*;
2. Criar uma matriz de erro mês x ano, afim de se ter uma amostra de erros para cada mês;
3. Retirar uma amostra aleatória do erro de cada mês com reposição de tamanho T associado ao número de anos do período do modelo de previsão dinâmica no modo *forecast*;
4. Somar a reamostragem do erro obtido aos respectivos meses de cada ano previsto para o período do modelo de previsão dinâmica no modo *forecast*;
5. Verificar se a vazão obtida para cada um dos meses é menor do que 0. Caso seja, um novo erro é reamostrado para o mês em questão até que a vazão obtida seja maior que zero (OLIVEIRA, 2010);
6. Repetir os processos 3, 4, 5, trinta vezes, sendo este o número de amostras “bootstrapadas” associado ao numero de anos vizinhos do modelo de previsão estatístico.

O erro associado aos passos acima foi computado por,

$$\hat{e} = Q_{obs_{hind}} - Q_{rna_{hind}} \quad (29)$$

em que $Q_{obs_{hind}}$ é a vazão mensal observada para o período *hindcast* e $Q_{rna_{hind}}$ é a vazão mensal prevista pelo modelo de RNA para o período *hindcast*. A vazão prevista reamostrada é dada por,

$$Q_{r,m}^{(b)} = Q_{rna_{fcst}} + \hat{e}_m^{(b)} \quad (30)$$

Sendo $Q_{r,m}^{(b)}$ a vazão reamostrada para uma dada amostra *bootstrap* de índice (b) em um mês m , $Q_{rna_{fcst}}$ a vazão de saída do modelo de rede neural para o período forecast e $\hat{\epsilon}_m^{(b)}$ o erro mensal em uma amostra “bootstrapada” de índice (b).

4.2.2 Ensemble de Multi-modelos e verificação de previsão

Na Figura 4, que trata da arquitetura do SIAPS, nota-se que todas as “caixas” de modelos enviam dados para a “caixa” de “Previsão Sazonal das Afluências e geração de índices”, aqui os resultados das afluências previstas pelos diferentes modelos são combinados de maneira a forma uma única previsão agrupada.

A técnica utilizada, conhecida como *pooled ensemble*, é a técnica mais simples que existe para combinar conjuntos, em que são dados pesos iguais aos conjuntos de cada modelo aglutinando-os de maneira a produzir um único conjunto (*superensemble*), a probabilidade de previsão de um ensemble de i -ésimos (I) modelos é,

$$P_{kt}^{Pool}(y) = \frac{1}{m_p} \sum_{i=1}^I m_{ikt} \quad (31)$$

em que $m_p = \sum_{i=1}^I m_i$ é o número total de membros do conjunto, k é a categoria em um tempo t (ROBERTSON *et al.*, 2004; BLOCK *et al.*, 2009). Apesar de simples, essa abordagem tem um melhor desempenho que simplesmente uma única previsão, devido apresentar previsões de maior confiabilidade (HAGEDORN *et al.*, 2005; BLOCK *et al.*, 2009).

Para investigar o desempenho das simulações e do *ensemble* de multi-modelos, foram realizadas comparações com os dados de afluência obtidos no relatório de regionalização de vazões da COGERH (2013) sobre os reservatórios que constituem o sistema Jaguaribe-Metropolitana. Com isso, diversas medidas de desempenho foram utilizadas, pois conforme De Maria (2007) um conjunto de índices estatísticos é a melhor maneira de julgar o desempenho de um modelo.

Para isso, vazões mensais do modelo hidrológico são agregadas em períodos sazonais, suavizando e aumentando a destreza dos dados por reduzir a variabilidade do ruído. Para a validação dos dados de previsão de vazão, os anos utilizados foram de 2004 a 2012 totalizando um período de 9 anos. O período considerado para o cálculo da climatologia dos dados observados, eventualmente considerado para o cálculo de alguns índices estatísticos, foi de 1974 a 2000 totalizando um período de 27 anos.

Os índices estatísticos utilizados na verificação da previsão são: Erro Quadrático Médio (EQM), Índice de Concordância (Ic), Coeficiente de Determinação (R^2)

e o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). As formulações matemáticas associadas a cada um desses índices são mostradas na Tabela 1, a definição das variáveis presente nas fórmulas, encontra-se na lista de símbolos.

Tabela 1 – Índices de verificação de previsão com seus respectivos símbolos, fórmulas, valores ideais e faixas de variação.

Índice	Símbolo	Fórmula	Valor Ideal	Faixa de Variação
Erro Quadrático Médio	EQ	$EQ = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \psi_i)^2 \right]^{1/2}$	0	0 a ∞
Índice de Concordância	I_c	$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \phi_i - \psi_i ^2}{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\psi}_i + \psi_i - \bar{\psi}_i)}$	1	0 a 1
Coeficiente de Determinação	R^2	$R^2 = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\phi'_i \psi'_i}{\sigma_\phi \sigma_\psi} \right]^2$	1	0 a 1
Coeficiente de Nash-Sutcliffe	NS	$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \psi_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2}$	1	$-\infty$ a 1

Fonte: Elaboração própria

O EQ indica o quanto o erro varia em torno do erro absoluto. Conforme Drob e Picone (2000), EQ é um índice sensível à variabilidade natural das observações, está por sua vez depende fortemente da região geográfica e da estação climática. Segundo De Maria (2007), EQ torna-se mais relevante quanto se deseja prevenir grandes erros sistemáticos. Em geral, o EQ é menos preciso do que o erro absoluto, principalmente por conta que EQ penaliza quadraticamente os erros e os *outliers* (valores extremos dentro de uma série de dados).

Segundo Willmott (1982), a utilização do I_c é de grande valia principalmente por que EQ não informam o tamanho relativo da diferença sistemática, ou mesmo a natureza dessa diferença. Nesse índice o viés é completamente eliminado, há uma presença indireta do viés tanto no denominador como no numerador que atua como um removedor de viés.

Em relação ao R^2 , este coeficiente mede quanto a variabilidade de uma variável é explicada pela variação da outra, servindo como uma descrição da qualidade do ajuste realizado. Entretanto deve-se ter parcimônia com seu uso, pois esse coeficiente depende do número de observações, tendendo a se elevar quando o número destas diminuem e valores repetidos na amostra levam a uma diminuição de R^2 .

O NS determina a magnitude relativa da variância residual entre os dados simulados e os observados, isso permite a avaliação do poder preditivo de um modelo (MORIASI *et al.*, 2007). Segundo Machado e Vettorazzi (2003), o NS é um dos mais importantes critérios de avaliação de ajustes de modelos hidrológicos. Este índice de verificação de previsão pode variar de $-\infty$ a 1, quando NS igual a 1 indica uma correspondência perfeita entre os dados observados e modelados, quando NS igual a 0 entende-se que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados e se NS menor do que 0 tem-se que a média dos dados modelados não são tão boas quanto a média dos dados observados.

Além dos índices estatísticos indicados na Tabela 1, é usada a razão de verossimilhança (LR) para avaliar o desempenho das previsões. Para estimá-la é necessário definir uma função de verossimilhança (L) tanto para climatologia dos dados observados como para cada ano previsto, dada conforme equação (32),

$$L(\theta') = \prod_{i=1}^n f_Y(y_i | \theta') \quad (32)$$

em que θ' é um vetor de parâmetros estimados, $f_Y(y_1)$ é a função densidade de probabilidade (FDP) utilizada no ajuste dos dados. Para o cálculo da equação (32), duas FDP foram testadas, a *biweight* dada por,

$$f_Y(y | \theta') = \begin{cases} \frac{15}{16}(1 - y^2)^2 & \text{se } |y| \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (33)$$

e a *gamma* dada por,

$$f_Y(y | \theta') = f(x | \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (34)$$

em que $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma, $\beta > 0$ o parâmetro de escala, x é a variável aleatória em estudo e

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (35)$$

a função gama.

Com isso, o cálculo de desempenho por LR da previsão com a climatologia observada é genericamente dado conforme equação (36),

$$LR = \left(\frac{L(\theta')_{previsão}}{L(\theta')_{climatologia}} \right)^{1/n} \quad (36)$$

em que n é o número de anos da série de previsão utilizadas. Se $LR > 1$, indica que a previsão é melhor que a climatologia e se $LR < 1$, tem-se que a previsão é pior que a climatologia.

4.2.3 Metodologia dos indicadores de seca utilizados e da avaliação de desempenho

Para o desenvolvimento do estudo, índices de seca foram gerados no intuito de verificar a persistência e a severidade da seca no reservatório de acumulação de água ao longo dos anos. Deste modo, com dados de precipitação foi obtido o SPI, associado a seca meteorológica, com os dados de vazão afluyente calculou-se o SRI, associado a seca hidrológica, aos quais foram feitos para as escalas temporais de 12, 24 e 36 meses, baseadas no tempo de residência da água no reservatório, que conceitualmente se refere a quantidade média de tempo que a capacidade máxima de acumulação do reservatório levaria para se extinguir a uma taxa de fluxo máxima da água ou vazão regularizada máxima. As escalas de tempo utilizadas para os cálculos dos índices estão diretamente relacionadas com o tempo necessário para que os efeitos da seca sejam sentidos sobre os diferentes setores de atividades e sobre os recursos hídricos em geral.

Em seguida, computou-se uma classificação de severidade da seca, para os índices citados. O SRI pode ser computado da mesma maneira que o SPI, esses índices são adimensionais, sendo que valores negativos indicam seca e valores positivos indicam períodos úmidos. Com esses índices, a intensidade da seca, a magnitude e a duração podem ser determinadas, bem como a probabilidade de surgir uma seca específica a partir de uma série histórica.

Ainda associado a seca hidrológica, foram calculados índices que relacionam o estado da seca com o estoque de água armazenada no reservatório. Um destes índices é denominado de Indicador de Estado (IE) (Estrela et al., 2006), e associado a ele tem-se o Índice Sintético (IS).

Outro índice calculado foi o Nível Meta (NM) que avalia a disponibilidade hídrica de uma região e permite a avaliação da severidade de seca (CID et al., 2014). Esse índice foi extraído apenas para os meses de dezembro de cada ano, para efeito de classificação, assim como os IE e IS.

4.2.3.1 Indicadores meteorológicos

O índice normalizado de precipitação, SPI, desenvolvido por McKee *et al.* (1993, 1995), baseia-se na distribuição de probabilidade da precipitação e pode ser

calculado em diferentes escalas de tempo. Por ser um índice normalizado, permite adequada comparação entre diferentes locais e climas.

Para o cálculo do SPI segue-se os seguintes passos: (i) escolhe-se uma escala de tempo, por exemplo, total de precipitação mensal ou em um conjunto de meses (por exemplo, 3 meses), (ii) ajusta-se uma distribuição de probabilidade para a série temporal destes valores (frequentemente distribuição Gama), (iii) estima-se os valores da probabilidade de não excedência (probabilidade acumulada de valores de precipitação serem menores que este na série temporal) do evento de precipitação do ano que se deseja avaliar a seca, em seguida (iv) utilizando uma distribuição normal padrão calcula-se a variável reduzida (z) correspondente ao valor da probabilidade de não excedência. Este procedimento será detalhado a seguir.

A distribuição de probabilidade utilizada no ajuste dos dados foi a gama dois parâmetros, definida por

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (37)$$

em que $\alpha > 0$ é o parâmetros de forma, $\beta > 0$ o parâmetro de escala, x é a variável aleatória em estudo e

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (38)$$

a função gama. A distribuição gama, conforme exposto na equação (6), só está definida para $x > 0$, logo quando um dado mês apresenta valores nulos, faz-se necessário o uso de uma transformação da distribuição de probabilidade acumulada, dada por

$$F(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (39)$$

sendo $G(x)$ conhecida como função gama incompleta, que é a função de distribuição estimada a partir dos valores não nulos da série de dados utilizada e q a probabilidade de zeros na amostra. Com isso, define-se o SPI, conforme Pereira e Paulo (2004), como

$$SPI = \varphi^{-1}[F(x)] \quad (40)$$

em que φ a função de distribuição normal reduzida. Os valores de SPI podem ser classificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Limiares dos índices com as devidas categorias e estados.

SPI e SRI	Classificação	Categoria	Estado
> -0,79	D0	Próximo a Normalidade	Normal

-0,80 a -1,29	D1	Seca Fraca	Pré-Alerta
-1,30 a -1,59	D2	Seca Moderada	Alerta
-1,60 a -1,99	D3	Seca Severa	Emergência I
$\leq -2,00$	D4	Seca Extrema	Emergência II

Fonte: Adaptada de Cunha (2008).

4.2.3.2 Indicadores hidrológicos

Para o cálculo do SRI, utiliza-se dados de vazão fluvial. O cálculo segue a mesma formulação utilizada para se obter o SPI. As vazões representam de forma sintética os processos hidrológicos da bacia hidrográfica associada à sua seção fluvial. Em escalas de tempo mensal a sazonal, o SRI é um complemento útil do SPI para retratar os aspectos hidrológicos de seca (Shukla e Wood, 2008). Assim como SPI, o SRI permite sua aplicação para diferentes escalas temporais. Os valores de SRI podem ser classificados conforme mostrado na Tabela 2.

O IE, assim como os demais índices já explicitados, é padronizado e conseqüentemente um índice adimensional, a formula que tem sido adotada é definida com valores num intervalo de 0, correspondente ao valor mínimo histórico, até 1, correspondente ao valor máximo histórico, e é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Se } V_i \geq V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right] \quad (41)$$

$$\text{e se } V_i < V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{V_i - V_{min}}{2(V_{med} - V_{min})}$$

em que V_i é o volume medido do período analisado, V_{med} o volume médio para o período histórico, V_{max} o volume máximo do período histórico e V_{min} o volume mínimo do período histórico. Para o cálculo do IE foram utilizados apenas os valores referentes a dezembro de cada ano da série de volume em análise.

Com a utilização dos dados de volume simulados por um modelo de operação de reservatório, conforme Cid *et al.* (2014), o IE foi renomeado para índice sintético (IS). Suplementarmente, ainda se calculou tanto o IE como o IS alterando o volume médio pelo volume mediano objetivando reduzir o efeito do dimensionamento do reservatório.

Através do modelo de operação, ainda foi possível extrair os NM associados aos volumes acumulados. Os valores de IE, IS e NM são classificados conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Categorização dos índices IE, IS e NM.

IE e IS	NM	Classificação	Categoria	Estado
> 0,5	1	D0	Próximo a Normalidade	Normal
0,50 a 0,31	2	D1	Seca Fraca	Pré-Alerta
0,30 a 0,16	3	D2	Seca Moderada	Alerta
0,15 a 0,076	4	D3	Seca Severa	Emergência I
≤ 0,075	5	D4	Seca Extrema	Emergência II

Fonte: Adaptado de Estrela *et al.* (2006) e Cid *et al.* (2014).

O equacionamento para obtenção do NM é semelhante ao que será visto na seção 4.2.4 que trata da operação do reservatório para as vazões previstas, diferenciando-se basicamente pela entrada no modelo de operação ser os dados de vazão agregada observada para cada sistema.

4.2.3.3 Avaliação de desempenho

No intuito de avaliar o desempenho dos índices de seca no hidrossistema, foi feita uma avaliação dos acertos e erros ocorridos em cada estado de seca por meio de uma previsão categorial, baseando-se apenas na ocorrência ou não dos estados de seca.

Em sistemas de recursos hídricos superficiais com reservatórios, os níveis dos reservatórios seriam teoricamente o melhor indicador para as secas. No entanto, há um inconveniente em indicadores baseados nos volumes estocados devido a possibilidade de falha humana em sua operação. Baseado nisso, utilizou-se o IS de volume mediano, que representa uma operação ideal do mesmo, como índice de referência. Estes índices foram considerados para avaliar a capacidade dos demais índices (SPI, SRI e NM) de prever seu estado de seca.

Para fazer essa avaliação, utilizou-se o método de análise de contingência como ferramenta matemática de comparação, e a partir disso inferiu-se a probabilidade de detecção de eventos (POD), que é a razão do número de eventos que foram corretamente previstos pelo número total de eventos, e a razão de falso alarme (FAR),

que é proporção das previsões de ocorrência de eventos que na verdade não se materializaram, mostrados nas equações 42 e 43, respectivamente (SCHAEFER, 1990).

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (42)$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (43)$$

sendo, (a) quando o modelo previu o evento e este ocorreu, (b) quando o modelo previu o evento e este não ocorreu, (c) quando o modelo não previu o evento e este ocorreu e (d) quando o modelo não previu o evento e este não ocorreu. A Tabela 4 mostra uma síntese do método de análise de contingência.

Tabela 4 – Síntese do método de análise de contingência, com indicativo dos cálculos de POD e FAR.

		Observação		FAR
		Sim	Não	
Previsão	Sim	A	B	b / (a + b)
	Não	C	D	
POD		a / (a + c)		

Fonte: Adaptado de Amanajas (2008).

Para o desenvolvimento dessa análise quantitativa dos índices de seca, nos estudos de casos citados agrupou-se as contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI e do SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, além do NM. Esse agrupamento de categorias foi feito conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre os agrupamentos de estado e grau de severidade da seca.

ESTADO DE SECA	GRAU DE SEVERIDADE DA SECA		
	Úmido e D0	D1 e D2	D3 e D4
Normal			
Alerta			
Emergência			

Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Operação do SJM

A operação do SJM nesta tese utiliza uma técnica de simulação e otimização para estabelecer níveis metas de operação, utilizando o software MATLAB® para a programação de um algoritmo de simulação.

Para a operação do SJM, optou-se por uma simplificação do sistema, no intuito de diminuir o número de variáveis na otimização da mesma. Dessa forma, o SJM foi agregado em duas bacias: bacia do Jaguaribe aqui composta pelos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós; e bacia Metropolitana aqui composta por Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião. Com isso, variáveis como vazões afluentes observadas ou previstas, evaporações, CAV e demandas agregam-se para construção do Reservatório Equivalente do Jaguaribe (REJ) e do Reservatório Equivalente Metropolitano (REM).

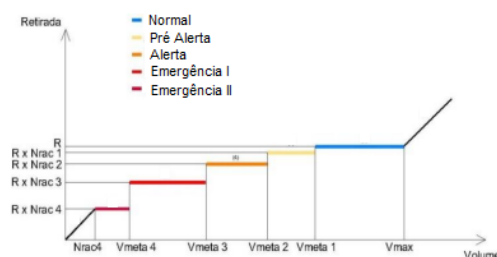
Para o cálculo da acumulação do reservatório, utilizou-se a equação do balanço hídrico de massa, que pode ser dada por,

$$V_{t+\Delta t} = V_t + I_t - E_t \cdot A_t - R_t - P_t - S_t \quad (44)$$

sendo, $V_{t+\Delta t}$ o volume do reservatório no período de tempo $t + \Delta t$, V_t o volume armazenado no início do período de tempo t , I_t o volume afluente ao reservatório durante o período de tempo t , E_t a lâmina evaporada durante o período de tempo t , suposta constante ao longo do período, A_t a área do espelho d'água no início do período t , suposta constante para intervalos de tempos pequenos, R_t as retiradas operacionais visando suprimento das demandas e transferências, P_t as perdas por infiltração, consideradas nulas neste trabalho e S_t o vertimento. A unidade de medida básica considerada no balanço hídrico foi o hectômetro (hm), ou seja, variáveis como a área e volume foram dadas em hm^2 e hm^3 respectivamente.

A vazão a ser liberada para o atendimento das demandas foi definida por uma regra de operação com salvaguardas baseada em 7 estágios de liberação, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Regra de operação



Fonte: Adaptada de Cid (2017)

Os coeficientes de racionamento foram definidos através de reuniões com agentes envolvidos na alocação de recursos hídricos do SJM, onde foi possível obter diversos cenários de riscos toleráveis, sendo escolhido aquela regra de operação que transpusesse maiores valores de água entre as duas bacias. A Tabela 6 mostra os coeficientes de racionamento definidas para cada estado de seca, sendo a numeração abaixo de cada estado de severidade da seca um indicativo do nível de racionamento adotado na operação.

Tabela 6 – Coeficientes de racionamento

Reservatório Equivalente	Normal (1)	Pré-alerta (2)	Alerta (3)	Emergência I (4)	Emergência II (5)
Jaguaribe	0	0	0,1	0,4	0,7
Metropolitano	0	0	0,1	0,2	0,6

Fonte: Adaptado de Cid (2017).

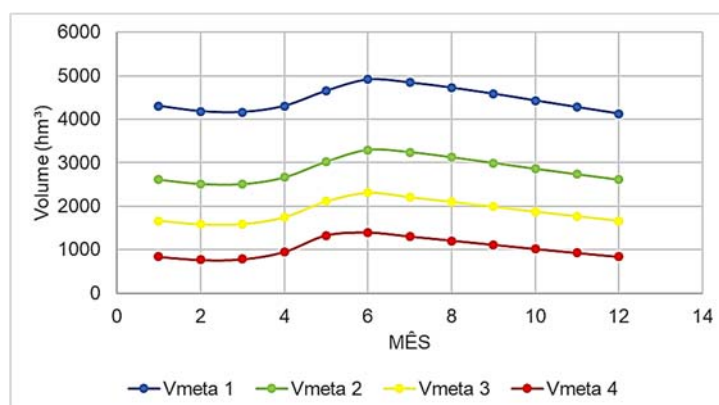
A tomada de decisão sobre o racionamento das demandas foi feita duas vezes ao ano, nos meses de janeiro e junho, ou seja, tomada a decisão em janeiro de um nível de racionamento a permanência nesse nível deve ocorrer até o mês de junho, quando se tomará uma nova decisão sobre o nível de racionamento, sendo esta nova decisão persistida até o mês de janeiro do ano seguinte, em que acontecerá uma nova tomada de decisão. Essa restrição impossibilita a alternância de diversos cenários de racionamentos por ano, encaixando-se bem dentro de um planejamento de aversão ao risco, possibilitando a preparação de ações e medidas para um estado de seca mais severo.

Ainda associado a definição de riscos toleráveis, uma outra variável importante na operação é a transferência de água entre as bacias também chamada de regra de bombeamento. Nessa aplicação, a transferência pode variar mensalmente entre os sistemas e se dar com base no NM do reservatório, isto é, com base nos estados de secas. A matriz *trade-off* de transferência utilizada foi a que transpõe os maiores valores de água entre as duas bacias, conforme já mencionado, e pode ser vista em Cid (2017).

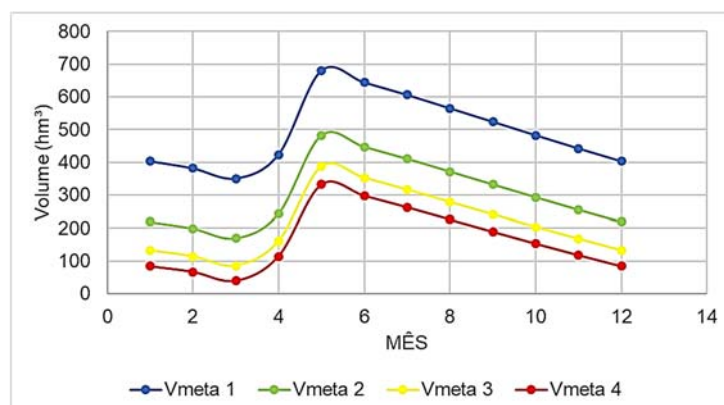
Os estados de secas dos reservatórios são definidos por limiares denominados de volumes metas, que são construídas a partir da disponibilidade hídrica utilizando a otimização de uma curva genérica. O processo de construção das curvas de volumes metas pode ser visto na integra em Cid (2017), tendo que a construção dos mesmos não é o foco desse estudo.

Conforme observado na Figura 9, a regra de operação se utilizou de quatro volumes metas, acima do volume meta 1, define-se o NM 1, entre o volume meta 1 e o volume meta 2, define-se o NM 2, entre o volume meta 2 e o volume meta 3, define-se o NM 3, entre o volume meta 3 e o volume meta 4, define-se o NM 4, abaixo do volume meta 4, tem-se o NM5. A Tabela 3 mostrou a relação dos níveis metas e os estados de seca. A Figura 10 mostra os volumes metas, utilizados nessa tese.

Figura 10 - Volumes metas dos reservatórios equivalentes (a) Jaguaribe e (b) Metropolitano.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

4.2.5 Matriz de transição entre os estados de seca

Uma cadeia de Markov é um processo estocástico X , tal como em qualquer instante t , X_{t+1} é condicionalmente independente a partir de $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}$, dado X_t , a

probabilidade P de que X_{t+1} tenha um valor particular j depende do passado somente através de seu valor X_t mais recente:

$$P\{X_{t+1} = j \mid X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}\} = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\} \quad \forall i, j \in S, t \in T \quad (45)$$

em que t é a posição temporal num dado conjunto de tempo T e S é o conjunto de estados de seca.

Uma rede de Markov é caracterizada por um conjunto de estados S e por sua probabilidade de transição, p_{ij} , entre os estados, ou seja, a probabilidade da cadeia de Markov estar no passo de tempo seguinte no estado j , dado que no momento atual está no estado i . A probabilidade de transição $P = [p_{ij}] = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$ é estimada de uma amostra por contagem do número de vezes que passa do estado i para o estado j , n_{ij} , assim,

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad (46)$$

O tamanho da amostra e o número de graus de severidade da seca influenciam a precisão das estimativas, o número de parâmetros do modelo depende do número de estados. Neste estudo 5 categorias de seca ou estados foram considerados, conforme exemplificado nas Tabelas 2 e 3. Adicionalmente, partindo da matriz de transição, os seguintes itens foram estimados nesta tese:

- As **probabilidades de ocorrência** de várias classes de seca.
- O **tempo de permanência esperado em cada classe de severidade**, que é o tempo médio que o processo permanece em uma classe especial antes de migrar para outra classe, e representa a duração desse estado de seca.
- O **tempo médio de recorrência** que indica o tempo esperado para sair de uma classe inicial i e retornar a essa classe

A longo prazo, a probabilidade de classe de seca independe do estado inicial, pois a probabilidade de transição de i para j em n passos, sendo n grande o suficiente, pode convergir para valores de equilíbrio que não dependem do estado inicial. Essa probabilidade, π_j , conhecida como probabilidade de estado estacionário é a única solução de um sistema de equações lineares:

$$\begin{cases} \pi_j = \sum_{k \in S} \pi_k p_{kj}, j \in S \\ \sum_{j \in S} \pi_j = 1, \forall j \in S \end{cases} \quad (47)$$

em que p_{kj} é a probabilidade de transição de um estado k qualquer do conjunto de estados, π_k é um estado k desse conjunto e π_j é a probabilidade de longo prazo de uma classe de seca j , ou seja,

$$\pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty, \forall i} P(X_t = j | X_0 = i), i \wedge j \in S \quad (48)$$

A probabilidade de um estado de permanência durante m meses em um estado qualquer i é estimado pelo produto da probabilidade das sucessivas transições entre X_0 e X_m , matematicamente expressa por:

$$\begin{aligned} & P(X_1 = i | X_0 = i) P(X_2 = i | X_1 = i) \dots P(X_{m-1} = i | X_{m-2} = i) P(X_m \neq i | X_{m-1} = i) \\ & = p_{ii}^{m-1} (1-p_{ii}) \end{aligned} \quad (49)$$

Conhecendo a probabilidade de permanência em cada classe de seca i durante m meses, o tempo de residência esperado em qualquer classe i , $E(T_i | X_0)$, é dado por:

$$E(T_i | X_0 = i) = \sum_t t P(m = t | X_0 = i) \quad (50)$$

O tempo esperado para atingir pela primeira vez o estado j partindo do estado i , ou seja, o tempo esperado para a primeira visita ao estado i é a solução única do sistema de equações lineares:

$$t_{ij} = 1 + \sum_{k \neq j} p_{ik} t_{kj}, \forall i, j \in S \quad (51)$$

em que p_{ik} é a probabilidade de transição de um estado i qualquer para um estado k .

O tempo médio de recorrência do estado i , t_{ii} , é um caso particular do tempo esperado para primeira passagem, pode ser calculado a partir da probabilidade do estado estacionário π_i :

$$t_{ii} = 1 / \pi_i \quad (52)$$

O equacionamento explicitado nessa seção é característica da cadeia de Markov do tipo homogênea, em que os mecanismos de transição dependem apenas dos estados i e j , conforme Paulo (2004). A forma de avaliação da matriz de transição segue os moldes de Steinemann (2003).

4.2.6 Matriz de planejamento de aversão ao risco

Sendo vazão afluyente de natureza estocástica, tem-se que o planejamento associado a sistemas de recursos hídricos estão necessariamente sujeitos a incertezas. Nesse contexto, a matriz de planejamento de um sistema de abastecimento de múltiplos usos, deve ser uma matriz em que as medidas de mitigação das secas relacionadas a cada grau de severidade obedecem ao critério de aversão ao risco, isto é, ações de respostas a secas mais amenas só podem ser tomadas quando o monitoramento indicar uma diminuição da severidade das secas.

De forma objetiva, nos casos em que a previsão indicar uma melhoria na condição do nível de seca e o monitoramento não diagnosticar tal melhora, então as ações

aplicadas devem permanecer baseadas no grau de severidade atual (do monitoramento), já se o prognóstico das aflúências mostra uma piora no estado de seca, medidas do atual estado de seca devem ser intensificadas e dependendo do grau de severidade previsto pode-se começar a preparação para o estado de seca seguinte.

A intensificação das ações de mitigação às secas se dar de duas maneiras, a primeira pela ordem de prioridade, que pode variar de 1 a 3, sendo que 1 representa as ações “Necessárias”, 2 significa ações “Importantes” e 3 ações “Complementares”, a segunda está relacionada a adoção de um maior rigor nas ações tomadas, principalmente nas que se referem a fiscalização e penalização.

A Tabela 7 mostra a matriz simbólica das ações de respostas a seca para cada nível de severidade, em que “M” representa a medida a ser tomada, o primeiro algarismo numérico indica o grau de severidade da seca apontada no monitoramento e o segundo algarismo numérico representa a prioridade arbitrada, previamente por técnicos e gestores do sistema hídrico, para a ação a ser desenvolvida.

Em relação as cores, ir do “branco” até o “vermelho escuro”, implica em um aumento real da severidade da seca ou no caso contrário em que se vai do “vermelho escuro” até o “branco” indica uma melhora no quadro de seca, ao percorrer uma dada coluna da Tabela 7, sendo a coluna representativa do monitoramento. Percorrendo a Tabela 7 em linhas, ir do “branco” até o “vermelho escuro” significa uma tendência de agravamento da seca atual, e o inverso estar relacionado a uma tendência de recuperação do sistema hídrico. A diagonal da esquerda para a direita é indicativo de persistência do quadro de seca atual.

Tabela 7 – Matriz simbólica de planejamento com aversão ao risco de seca.

		Previsão				
		D0	D1	D2	D3	D4
Monitoramento	D0	M01	M01*	M02*	M03*	M03*
	D1	M11	M11	M12*	M13*	M13*
	D2	M21	M21	M21	M22*	M23*
	D3	M31	M31	M31	M31	M32*
	D4	M41	M41	M41	M41	M41

* Iniciar preparação para o estado de seca seguinte

M – Medidas; 1º algarismo – Estado de seca observado; 2º algarismos – Prioridade das medidas.

As ações de cada estado de seca com suas respectivas prioridades arbitradas podem ser observadas nos Quadros 5 a 17 disposta no Apêndice B, em que a metodologia de elaboração das medidas de mitigação é descrita na secção 4.3.2.

4.3 Processos para o planejamento de seca

4.3.1 Fases do planejamento

Para o desenvolvimento de um plano de seca com base no gerenciamento do risco o processo de planejamento tem que ser contínuo, sendo desejável que o mesmo observe o ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Checar e Agir), que é uma ferramenta de gestão mundialmente conhecida. Como estratégia de desenvolvimento desse plano propôs-se dividi-lo em três fases: Diagnóstico, Planejamento e Execução (Ver Figura 11).

O Diagnóstico visa caracterizar o local de aplicação do estudo, identificar a evolução histórica e o estado atual frente às secas do sistema de abastecimento de água urbano, além de prever o estado futuro da seca com o intuito de avaliar os impactos e vulnerabilidades da seca operacional se utilizando de uma visão de gestão de risco.

A fase de Planejamento constitui na tomada de decisão sobre as estratégias e ações que serão operacionalizadas para evitar ou reduzir os danos (impactos) devido às secas operacionais através de medidas que reduzam as vulnerabilidades do sistema apontadas no diagnóstico.

A fase de Execução do plano consiste em monitorar os estados de seca identificando a ocasião de se realizar as estratégias e ações decididas na fase de planejamento. Após cada experiência de seca, as mesmas devem ser incorporadas no plano, ensejando a atualização do mesmo.

Estratégias e ações objeto do planejamento devem ser realizadas em período que antecede e durante a seca. As medidas a serem tomadas devem ser adequadas com a severidade da seca, que segundo González e Morcillo (2007) podem ser descritas em cinco linhas características:

- Normal: as demandas são supridas sem nenhum tipo de restrição.
- Alerta: preparação administrativa e operacional para o início efetivo da seca operacional.
- Conservação (Reduções): reduzindo o consumo por meio de incentivos econômicos e campanhas de conservação da água, assim como, incremento de recursos financeiros para ampliação da oferta hídrica e redução de perdas.

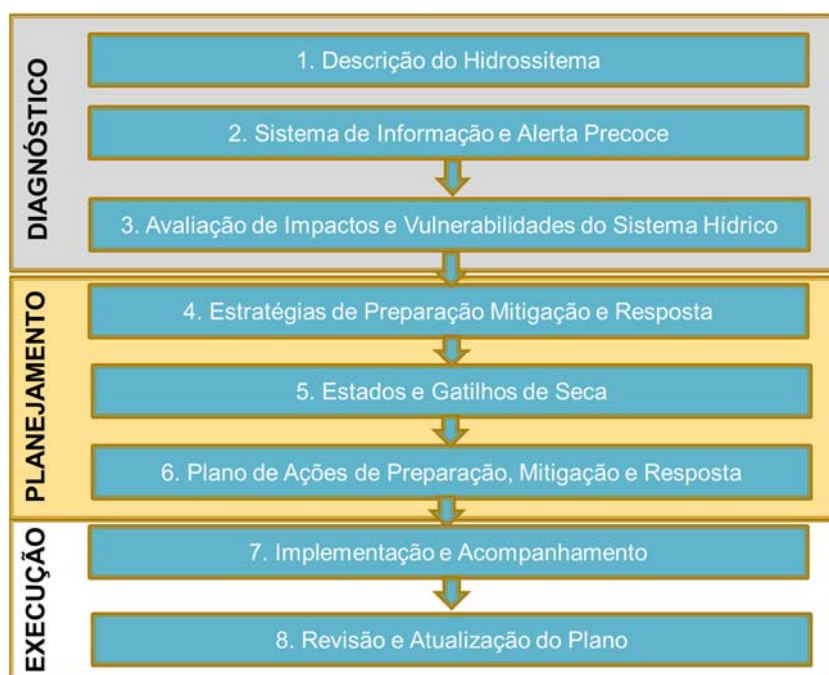
- Restrições: redução física do consumo para o reforço das medidas de execução de impacto socioeconômico mais elevado.
- Emergência: grande gravidade com impactos severos, medidas de alto custo social e econômico-financeiro para evitar o colapso total do sistema.

Esse planejamento deverá ocorrer em um processo evolutivo e adaptativo no qual serão analisadas diferentes configurações do processo de construção do plano com vistas a possibilitar alternativas para diferentes escalas de problemas. Isto deve ser realizado através de um processo participativo incluindo os principais atores do sistema de Abastecimento.

4.3.2 Etapas metodológicas do planejamento

As construções das fases de estratégia de desenvolvimento do plano de secas em cidades devem ser efetuadas com base em oito etapas metodológicas articuladas, conforme ilustrado na Figura 11, descritas em seguida separadamente, destacando a matriz teórica metodológica, equações, dados colhidos e forma de obtenção dos mesmos, dentre outros procedimentos.

Figura 11 – Etapas metodológicas para a elaboração de um plano de secas urbano.



Fonte: Elaborado a partir de Colorado Water Conservation Board (2010).

4.3.2.1 Descrição do hidrossistema

Esta etapa trata da descrição da região de estudo, em que faz-se um levantamento da região e/ou das sub-regiões, se tiver, no intuito de saber a capacidade de armazenamento, quais as áreas de drenagem, quais os maiores reservatórios presentes no hidrossistema, quais as maiores demandas. Pode-se citar ainda alguns indicadores econômicos da região (PIB, por exemplo), alguma política pública de expansão socioeconômica, caso exista. Nesta tese, isso foi feito no capítulo 3.

Este tipo de abordagem de caráter descritivo busca compreender o objeto/fenômeno em sua complexidade, onde os dados coletados são o instrumento principal para a análise, em que se busca analisar o mundo empírico em seu próprio ambiente sem recorrer a instrumentais estatísticos.

Essa etapa metodológica ainda pode ser utilizada para identificar e analisar os marcos normativos e institucionais relativos à gestão de seca sob a ótica dos recursos hídricos e saneamento por possibilitar não apenas um conhecimento quantitativo de dados da realidade, mas a interpretação dos fenômenos e a atribuição de seus significados. Esta abordagem é escolhida porque oportuniza a avaliação da qualidade das informações, considerando fundamental a percepção dos atores.

4.3.2.2 Sistema de informação e alerta precoce

O sistema de informação e alerta precoce deve ter como princípio a visão de gerenciamento de risco. Nesse âmbito, o sistema utilizado deve ser capaz de a partir de variáveis hidrometeorológicas atuais ou recentes fornecer, em tempo hábil, a tendência de diminuição ou agravamento da severidade da escassez hídrica. Adicionalmente, a avaliação de séries históricas inseridas no sistema pode facilitar o entendimento ou compreensão do motivo de ocorrência, bem como observar padrões espaciais e temporais, de um determinado estado de seca.

Isso pode ser realizado através da construção de indicadores que sinalizem o estado de uma seca em um ambiente urbano. Estes indicadores podem ser construídos de acordo com os métodos apresentados na seção 4.2 desta tese. A revelação do nível de severidade de uma seca ocorre por meio de uma gama de valores específicos utilizados, que vai depender do índice de seca considerado.

Esse sistema deve funcionar como um catalizador de informações tanto para um macrossistema, que seria o sistema de gerenciamento de seca, como para os tomadores de decisões, possibilitando que ações rápidas e eficientes sejam executadas frente a um determinado estado de seca.

4.3.2.3 Avaliação de impactos e vulnerabilidades do sistema hídrico

Outro passo importante no planejamento de preparação para à seca é a identificação de impactos e avaliação de vulnerabilidades existentes, pois isso possibilita a identificação de elementos que suscitam a elaboração de medidas dentro de uma lógica pró-ativa, e contribui para a orientação dos tomadores de decisões, permitindo a avaliação das regiões mais vulneráveis e gerando auxílios teóricos ou conceituais para uma gestão mais eficaz dos riscos.

Para identificar os impactos inicialmente foi elaborada uma lista com base no Plano de Seca de Denver (DENVER WATER, 2014) e no Guia Espanhol de Elaboração de Plano de Seca (GONZÁLEZ e MORCILLO, 2007), esta por sua vez foi disponibilizada para grupos de trabalhos formados por planejadores, gestores e responsáveis pelo abastecimento de água na qual realizaram a identificação dos impactos históricos e existentes e construíram um ranking de severidade dos impactos, em que classificaram os impactos listados como significativo, moderado e menor.

Após a análise dos impactos, realizou-se a avaliação de vulnerabilidades, possibilitando a ligação entre o impacto potencial ou sofrido e a construção da política de mitigação e respostas às secas, buscando identificar o grau de suscetibilidade que a região abastecida pelo sistema hídrico Jaguaribe-Metropolitana tem em relação a uma seca e gerar informações para elaboração de respostas e/ou estratégias de ação contra a seca.

A avaliação de vulnerabilidades proporciona uma estrutura para a identificação das causas sociais, econômicas ou ambientais dos impactos da seca, e conforme o *Colorado Water Conservation Board* (2013) esta avaliação consta de um processo de identificação, quantificação e priorização das vulnerabilidades de um sistema.

Na literatura científica existem diversas técnicas de avaliação de vulnerabilidades, contudo nesse estudo foi aplicada a técnica de sessão de “*brainstorming*” que possui um caráter qualitativo.

Esse método permite a análise dos impactos passados da seca e das condições atuais, esses por sua vez foram utilizados para formar uma árvore de impactos com a

identificação de sua causa basal, que é o fator que torna o sistema vulnerável a seca, os gestores então avaliaram se esta causa podia ser modificada ou não. A identificação do que torna o sistema vulnerável foi feita através das metodologias Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR), descrita em Turner *et al.* (2003) e em Pahl-Wostl (2007) mas com algumas adaptações, sendo a Pressão relacionada aos elementos que interferem e podem alterar o estado do sistema, o Estado indicando a situação do sistema, o Impacto servindo como indicador da vulnerabilidade e a Resposta associada a ações e medidas a serem tomadas pela sociedade.

4.3.2.4 Estratégias de preparação, mitigação e resposta

Nessa etapa foram identificadas ações elegíveis que possam ser operacionalizadas em cada um dos estágios de seca, no intuito de reduzir a vulnerabilidade do sistema as secas e consequentemente a severidade dos impactos.

De maneira mais ampla as ações contempladas devem produzir aumento da oferta em quantidade e qualidade, redução da demanda, minimização dos impactos e gestão de conflitos. No sistema Jaguaribe-Metropolitana, em virtude da complexidade do sistema e dos diferentes usos a que lhe são atribuídos, o conjunto de medidas de mitigação e respostas às secas foram organizados em tipos de medidas que foram categorizadas em dez classes:

- Medidas Preventivas – São ações que se destinam a evitar a ocorrência de uma seca e são implementadas em caráter de avaliação sistemática.
- Medidas de Gestão e Operação do Sistema – São ações de natureza interna das instituições responsável pela gestão e operação e pelo abastecimento público.
- Medidas de Caráter Institucional – São ações que visam a integração das instituições e entidades com competência para lidar com a seca.
- Medidas de Caráter Legal e Normativo – São ações que devem ser tomadas em compatibilidade com o quadro legal e normativo de gestão dos recursos hídricos.
- Medidas de Impacto Social – São ações que podem reduzir a demanda hídrica e que asseguram uma informação adequada e útil aos consumidores.

- Medidas de Impacto Ambiental – São ações que tem o intuito de reduzir os impactos ambientais significativos decorrentes do uso dos recursos hídricos.
- Medidas de Cumprimento dos Objetivos de Gestão de Seca – São ações que visam o cumprimento dos objetivos estabelecidos para cada fase de seca.
- Medidas de Expansão e Melhoria da Infraestrutura e da Disponibilidade Hídrica – São ações para aumentar a disponibilidade hídrica de qualquer sistema.
- Medidas para o Acompanhamento da Situação e do Risco – São ações que buscam desenvolver indicadores para avaliar a situação de seca.
- Medidas de Gestão do Plano – Úteis para a efetiva implementação das várias ações e objetivam preparar planos, projetos ou campanhas para gerenciamento das secas.

Essa etapa metodológica tem como foco a identificação de ações concretas para cada um desses tipos de medidas de modo que na conjuntura técnica, social, política e institucional dos sistemas hídricos em estudo possam ser alternativas viáveis para favorecer os resultados desejados.

O levantamento destas ações foi feito através de levantamento bibliográfico, entrevistas e consultas aos gestores do sistema através de questionários semiestruturados disposto nos Quadros 2 e 3 (Apêndice A) e análises sistemáticas das causas das vulnerabilidades identificadas como prioritárias e ações para reduzir sua ocorrência ou severidade.

4.3.2.5 Estados e gatilhos de seca

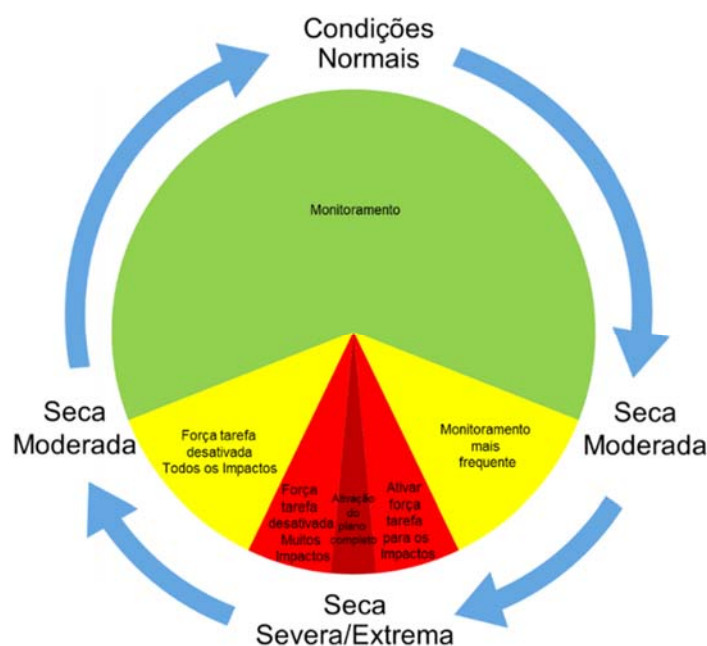
Nessa etapa desenvolveu-se ferramentas que possam ser utilizadas tanto na previsão como no monitoramento de estados de seca através da caracterização da intensidade, duração e frequência com que este fenômeno ocorre. Para isso, utilizou-se um indicador que funciona como os ponteiros de um relógio que sinalizam qual o estágio da seca (ver Figura 12), entretanto este relógio em especial pode retroceder no tempo, isto é, a seca pode perder severidade antes que alcance níveis mais severos.

Com isso, índices de seca baseados em dados de precipitação, vazão e volume foram testados como indicadores para identificar os estados de seca em diversas escalas com vistas a descobrir indicadores mais apropriados para a seca, a qual impacta a acumulação de água em reservatórios, conforme explanado na seção 4.2.

Nesse estudo a classificação de severidade da seca divide-se em cinco estados denominados **Normal, Pré-alerta, Alerta, Emergência I e Emergência II**, conforme já indicados nas Tabelas 2 e 3. O estado Normal limita-se as situações em que o não há déficit hídrico ou o grau de severidade é próximo a normalidade. O estado de Pré-Alerta é decretado quando há sinais proeminentes de seca, nesta fase inicia-se propriamente um evento de seca. Com a persistência e o agravamento do episódio de seca faz-se necessária a imposição de medidas restritivas de uso de água, anunciando o estado de Alerta. O estado de Emergência nível I é proclamado quando o agravamento e/ou a persistência da seca acarretam interrupções no abastecimento hídrico. O estado de Emergência nível II ocorre quando o sistema hídrico corre risco de colapso de abastecimento.

Nesta tese o indicador utilizado foi o volume dos reservatórios, em que para um dado volume atual do reservatório, que indique escassez hídrica, é possível prever se a tendência desse “ponteiro” é retroceder, isto é, diminuir a severidade da seca, ou se adiantar, diminuindo o volume e aumentando ainda mais a severidade da mesma.

Figura 12 – Relógio da seca.



Fonte: Adaptado de *Colorado Water Conservation Board* (2010).

O acionamento de cada uma das medidas de preparação, mitigação e resposta são condicionados pelo estado da seca. A separação entre estes estados se dá por um valor no indicador (limiar entre os estágios de seca) que quando ultrapassado aciona uma ação. Por servir para o disparo de uma ação este limiar é chamado de gatilho. O conjunto das ações associadas a um estado de seca tem por objetivo cumprir uma meta de ampliação da oferta, redução da demanda, mitigação de impactos e conflitos associados a seca. A relação entre indicador, estado de seca, medida e nível de planejamento são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Caracterização dos estados de seca, tipos de medidas e nível de planejamento.

Tipos de Medidas de Gestão de Secas					
Indicador	O que melhor indique a acumulação em reservatório hídrico.				
Estado da Seca	Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Tipo das Medidas	Planejamento e Informação	Informação e Preparação	Conservação (Imposição de algumas medidas restritivas)	Restrição (Racionamento)	Restrição Severa
Nível do Planejamento	Estratégica		Tática	Emergencial	Emergencial

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2.6 Plano de ações de preparação, mitigação e resposta

Nessa fase do planejamento foi identificada efetivamente as ações gerais e específicas que devem ser implementadas para a preparação, mitigação e resposta à seca. Essas ações devem envolver medidas ambientais, sociais e institucionais, além de melhorias no sistema de monitoramento, no intuito de assegurar que as diretrizes do sistema de gerenciamento de seca sejam cumpridas.

Isso deve ser realizado com base no levantamento bibliográfico afim de elaborar uma lista de ações associadas a cada tipo de medidas e com a participação de planejadores, órgãos de abastecimento e usuários visando a redução da demanda de água e a melhora da oferta de água durante cada estágio de seca. As ações indicadas seguem uma ordem de prioridade explicada na seção 4.2.6.

4.3.2.7 Implementação e acompanhamento

A implementação e acompanhamento do plano de gestão da seca deve incluir um plano de ação para: mitigação, monitoramento de indicadores de seca; implementação

e execução do programa de resposta à seca; planejamento de receita e acompanhamento do esforço de resposta à seca. Lembrando que isso deve ser construído de forma participativa e como um planejamento contínuo.

Dessa forma, nessa fase sugere-se que seja adotada como matriz metodológica a abordagem qualitativa por reconhecer a relevância dos atores e do significado de suas ações e decisões, tendo por base o marco institucional e organizacional para que possa ser discutido, elaborado e validado pelos atores envolvidos no processo de gestão de recursos hídricos, com foco na gestão de secas, o modelo institucional de operacionalização do plano.

Isso se dará por meio de reuniões com uso de exposição dialogada, as quais privilegiarão processos de avaliação contínua com vistas não apenas a verificar a eficiência e a eficácia do plano, mas possibilitar aprendizagem institucional, bem como seu fortalecimento (VOLTOLINI, 2004). Além disso, proporcionará ganho de relevância, credibilidade e confiabilidade ao modelo institucional de operacionalização do plano.

4.3.2.8 Revisão e atualização do plano

A etapa final do planejamento de seca é criar um conjunto de procedimentos para assegurar a avaliação adequada do plano e a definição do tempo de revisão. Esta revisão pode ser realizada durante a seca e pós-seca.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de possibilitar um melhor entendimento, dividiu-se em 5 partes os resultados obtidos. A primeira parte trata-se de uma abordagem qualitativa e quantitativa do monitoramento dos índices SPI, SRI, IE, IS e NM, que permitiu verificar os padrões do grau de severidade de seca de cada um desses índices e relacioná-los. A segunda parte implica nos resultados da utilização de técnicas de análise estatística para verificar o desempenho dos modelos de previsão bem como do ensemble destes. A terceira parte discute a operação do SJM bem como os resultados da matriz de transição. A quarta parte se atém a avaliação das vulnerabilidades do sistema em estudo. A quinta parte resume o plano proativo de seca propriamente dito.

5.1 Análise qualitativa e quantitativa dos índices de seca

5.1.1 Análise qualitativa para o monitoramento do Sistema Jaguaribe-Metropolitana

As Tabelas 8 a 15, mostram a variação anual dos índices SPI e SRI para as escalas temporais de 12, 24 e 36 meses nos sistemas hídricos em estudo, além dos IE, IS e NM, identificando as variáveis de entrada para cada índice de seca e classificando a severidade da seca, de acordo como os limiares já apresentados nas Tabela 2 e 3.

As Tabelas 8 a 11 são referentes a RHJ, nelas observam-se independente do índice, que o sistema hídrico na maior parte do tempo encontra-se no estado próximo a normalidade ou normal, porém anos como o de 1915, 1932, 1942, 1951-1955, 1958-1959, 1983 e 1993 todos os índices em análise identificaram a ocorrência de seca, porém houve uma divergência quanto ao grau de severidade ou do estado de seca, em que os IE e os IS apresentaram na maioria dos casos uma maior severidade de seca que os demais índices (SPI e SRI).

Analisando a corroboração dos índices de seca com os registros histórico da região em estudo, verifica-se que entre os anos de 1979 e 1984, em que ocorreu uma das mais prolongada e abrangente seca histórica do NEB, tem-se que todos o índice identificaram satisfatoriamente a ocorrência de seca entre os anos de 1982 e 1984, apresentando uma maior intensificação da seca no ano de 1983, sendo que neste o SPI-12, SPI-24 e NM ficou classificado como estado de Emergência I, o SRI de modo geral classificou a seca como moderada, e os IS, tanto o que leva em consideração o volume médio como o mediano classificaram como estado de Emergência II.

Tabela 8 – Valores anuais entre 1913 e 1937 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1913	0,38	–	–	0,40	–	–	–	–	0,71	0,67	2
1914	0,96	0,84	–	0,73	0,60	–	–	–	0,72	0,68	2
1915	-2,77	-0,76	-0,44	-1,94	-0,24	-0,06	–	–	0,53	0,45	3
1916	0,30	-1,35	-0,48	-0,25	-1,13	-0,39	–	–	0,43	0,32	3
1917	1,89	1,49	0,20	2,00	1,27	0,60	–	–	0,73	0,70	1
1918	0,95	1,88	1,70	0,95	1,76	1,33	–	–	0,75	0,72	1
1919	-2,38	-0,62	0,69	-1,70	0,00	1,09	–	–	0,56	0,51	1
1920	0,01	-1,44	-0,54	-0,41	-1,21	-0,27	–	–	0,46	0,35	2
1921	1,50	1,03	-0,14	1,48	0,78	0,15	–	–	0,70	0,66	1
1922	1,16	1,73	1,44	1,33	1,61	1,16	–	–	0,81	0,78	1
1923	0,61	1,13	1,72	0,83	1,23	1,55	–	–	0,83	0,80	1
1924	2,41	2,06	2,29	3,06	2,50	2,49	–	–	0,99	0,98	1
1925	1,01	2,29	2,21	1,44	2,76	2,53	–	–	0,97	0,96	1
1926	0,54	0,98	2,17	0,68	1,22	2,49	–	–	0,94	0,93	1
1927	-0,70	-0,12	0,45	-0,48	0,12	0,79	–	–	0,80	0,78	1
1928	-0,63	-0,96	-0,48	-0,80	-0,87	-0,29	–	–	0,66	0,62	1
1929	0,14	-0,38	-0,73	-0,15	-0,64	-0,81	–	–	0,59	0,54	2
1930	-0,49	-0,29	-0,62	-0,78	-0,63	-0,94	–	–	0,43	0,32	2
1931	-0,80	-0,93	-0,71	-0,95	-1,16	-1,00	–	–	0,12	0,09	4
1932	-1,72	-1,73	-1,71	-1,90	-1,73	-1,75	–	–	0,02	0,01	5
1933	-0,10	-1,20	-1,47	-0,41	-1,27	-1,52	–	–	0,00	0,00	5
1934	1,11	0,66	-0,26	1,11	0,49	-0,16	–	–	0,53	0,44	3
1935	0,86	1,27	0,97	0,87	1,11	0,70	–	–	0,62	0,57	2
1936	-0,96	-0,02	0,59	-0,78	0,16	0,61	–	–	0,50	0,38	3
1937	-0,21	-0,84	-0,18	-0,43	-0,83	-0,14	–	–	0,30	0,23	3

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Valores anuais entre 1938 e 1962 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume (V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1938	-0,63	-0,63	-1,08	-0,65	-0,76	-1,04	–	–	0,10	0,08	4
1939	-0,21	-0,63	-0,68	-0,51	-0,81	-0,92	–	–	0,05	0,03	4
1940	1,29	0,73	0,26	1,35	0,64	0,22	–	–	0,57	0,52	2
1941	-0,58	0,53	0,28	-0,40	0,68	0,29	–	–	0,50	0,37	2
1942	-2,06	-1,76	-0,51	-1,80	-1,23	0,03	–	–	0,08	0,06	4
1943	-0,25	-1,49	-1,59	-0,65	-1,44	-1,34	–	–	0,00	0,00	4
1944	-0,64	-0,66	-1,62	-0,77	-0,97	-1,55	–	–	0,00	0,00	4
1945	0,75	0,08	-0,12	0,54	-0,10	-0,44	–	–	0,27	0,20	3
1946	0,41	0,72	0,24	0,46	0,51	0,06	–	–	0,41	0,31	3
1947	0,59	0,60	0,86	0,53	0,50	0,55	–	–	0,53	0,44	2
1948	0,15	0,44	0,53	0,00	0,24	0,31	–	–	0,46	0,34	3
1949	-0,48	-0,28	0,07	-0,51	-0,39	-0,09	–	–	0,27	0,21	3
1950	0,37	-0,11	-0,06	0,31	-0,17	-0,22	–	–	0,34	0,26	2
1951	-1,40	-0,64	-0,84	-1,19	-0,44	-0,67	–	–	0,05	0,04	3
1952	-0,84	-1,57	-1,03	-0,95	-1,41	-0,84	–	–	0,00	0,00	4
1953	-1,25	-1,47	-2,02	-1,43	-1,53	-1,83	–	–	0,00	0,00	5
1954	-1,05	-1,62	-1,83	-1,21	-1,71	-1,84	–	–	0,00	0,00	5
1955	-0,26	-0,92	-1,48	-0,47	-1,07	-1,55	–	–	0,00	0,00	5
1956	0,00	-0,24	-0,79	-0,06	-0,41	-0,90	–	–	0,07	0,05	4
1957	-0,21	-0,21	-0,36	-0,30	-0,32	-0,55	–	–	0,01	0,01	4
1958	-2,19	-1,53	-1,25	-2,00	-1,19	-0,97	–	–	0,00	0,00	5
1959	-0,55	-1,80	-1,59	-0,94	-1,75	-1,45	–	–	0,00	0,00	5
1960	-0,21	-0,58	-1,59	-0,42	-0,90	-1,53	–	–	0,02	0,02	5
1961	0,00	-0,21	-0,52	0,08	-0,29	-0,70	–	–	0,10	0,08	4
1962	-0,26	-0,24	-0,36	-0,24	-0,20	-0,43	–	–	0,06	0,04	4

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Valores anuais entre 1963 e 1987 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1963	0,66	0,23	0,14	0,74	0,27	0,16	–	–	0,38	0,28	2
1964	1,72	1,57	1,17	1,73	1,46	1,06	–	–	0,74	0,71	1
1965	0,11	1,25	1,34	0,31	1,26	1,24	–	–	0,72	0,68	1
1966	-0,43	-0,27	0,81	-0,45	-0,14	0,83	–	–	0,61	0,56	2
1967	0,87	0,29	0,25	0,87	0,28	0,27	–	–	0,69	0,65	1
1968	0,20	0,67	0,30	0,27	0,61	0,25	–	–	0,66	0,62	1
1969	0,27	0,25	0,65	0,09	0,12	0,44	–	–	0,62	0,58	2
1970	-1,05	-0,53	-0,36	-0,87	-0,50	-0,32	–	–	0,50	0,38	2
1971	0,19	-0,60	-0,37	-0,18	-0,70	-0,56	–	–	0,38	0,29	2
1972	-0,57	-0,30	-0,85	-0,56	-0,54	-0,89	–	–	0,16	0,12	3
1973	0,87	0,21	0,23	0,53	-0,03	-0,19	–	–	0,37	0,28	2
1974	2,05	1,95	1,38	2,48	1,93	1,42	–	–	0,82	0,80	1
1975	0,78	1,89	1,99	0,94	2,10	1,87	–	–	0,85	0,84	1
1976	-0,66	0,09	1,29	-0,39	0,36	1,62	–	–	0,74	0,71	1
1977	0,89	0,17	0,54	0,58	0,08	0,46	–	–	0,75	0,72	1
1978	0,38	0,80	0,30	0,35	0,47	0,14	–	–	0,73	0,70	1
1979	-0,38	-0,05	0,43	-0,34	-0,06	0,16	–	–	0,63	0,59	1
1980	-0,07	-0,37	-0,13	-0,11	-0,37	-0,19	–	–	0,57	0,52	1
1981	-0,44	-0,40	-0,59	-0,53	-0,48	-0,62	–	–	0,44	0,33	2
1982	-0,66	-0,81	-0,74	-0,87	-0,95	-0,84	–	–	0,14	0,11	3
1983	-1,71	-1,62	-1,60	-1,48	-1,49	-1,45	–	–	0,00	0,00	4
1984	0,27	-0,89	-1,14	0,15	-0,66	-1,00	–	–	0,18	0,13	4
1985	2,44	1,90	0,91	2,74	2,00	1,35	–	–	0,95	0,95	1
1986	1,17	2,42	2,16	1,60	2,60	2,20	–	–	1,00	1,00	1
1987	-0,13	0,69	1,98	0,05	1,05	2,18	–	–	0,90	0,89	1

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Valores anuais entre 1988 e 2012 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RHJ.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1988	0,03	-0,13	0,54	0,02	-0,06	0,78	–	–	0,82	0,80	1
1989	1,27	0,86	0,60	1,22	0,75	0,54	–	–	0,94	0,94	1
1990	-0,03	0,82	0,66	0,05	0,76	0,54	–	–	0,85	0,84	1
1991	-0,33	-0,31	0,48	-0,30	-0,24	0,43	–	–	0,75	0,72	1
1992	-0,28	-0,48	-0,45	-0,42	-0,54	-0,47	–	–	0,64	0,60	1
1993	-1,87	-1,41	-1,37	-1,74	-1,22	-1,13	–	–	0,43	0,32	2
1994	0,41	-0,85	-0,89	-0,04	-0,89	-0,97	–	–	0,36	0,27	2
1995	0,68	0,67	-0,31	0,61	0,28	-0,35	–	–	0,53	0,43	2
1996	0,72	0,87	0,90	0,73	0,72	0,48	–	–	0,60	0,55	2
1997	0,05	0,47	0,71	0,06	0,41	0,51	–	–	0,56	0,50	2
1998	-1,48	-0,94	-0,35	-1,29	-0,68	-0,15	–	–	0,28	0,21	3
1999	-0,19	-1,13	-0,92	-0,57	-1,18	-0,89	–	–	0,11	0,08	4
2000	0,63	0,25	-0,54	0,34	-0,17	-0,70	–	–	0,22	0,16	3
2001	-1,06	-0,25	-0,36	-0,82	-0,28	-0,56	–	–	0,01	0,01	4
2002	0,23	-0,56	-0,12	0,04	-0,51	-0,29	0,00	0,00	0,07	0,05	3
2003	-0,26	-0,08	-0,66	-0,28	-0,24	-0,62	0,00	0,00	0,05	0,04	4
2004	1,32	0,73	0,68	1,28	0,68	0,47	0,76	0,76	0,56	0,51	2
2005	-1,09	0,29	0,05	-0,81	0,50	0,20	0,50	0,50	0,36	0,27	3
2006	0,10	-0,68	0,24	-0,11	-0,62	0,27	0,50	0,50	0,27	0,20	3
2007	-0,21	-0,14	-0,72	-0,33	-0,37	-0,73	0,41	0,41	0,13	0,09	3
2008	1,07	0,57	0,47	1,07	0,49	0,26	0,94	0,94	0,53	0,45	2
2009	0,91	1,27	0,92	1,01	1,17	0,78	1,00	1,00	0,66	0,62	1
2010	-1,10	-0,05	0,54	-0,82	0,27	0,66	0,59	0,59	0,54	0,46	2
2011	1,18	0,17	0,61	0,84	0,12	0,53	0,90	0,90	0,63	0,58	2
2012	-1,02	0,21	-0,42	-0,78	0,13	-0,29	0,48	0,48	0,49	0,37	2

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Valores anuais entre 1913 e 1937 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1913	0,84	–	–	0,58	–	–	–	–	0,53	0,48	1
1914	0,83	1,10	–	0,86	0,78	–	–	–	0,53	0,48	1
1915	-2,63	-0,78	-0,13	-1,89	-0,06	0,15	–	–	0,21	0,18	2
1916	-0,07	-1,67	-0,75	-0,84	-1,66	-0,48	–	–	0,08	0,06	2
1917	1,93	1,40	0,17	2,08	1,23	0,59	–	–	0,50	0,42	1
1918	0,09	1,49	1,18	0,11	1,48	0,96	–	–	0,54	0,50	1
1919	-2,36	-1,40	0,33	-1,73	-0,75	0,86	–	–	0,11	0,09	2
1920	-0,05	-1,54	-1,22	-0,84	-1,61	-1,08	–	–	0,04	0,03	2
1921	1,56	1,10	-0,07	1,28	0,51	-0,10	–	–	0,54	0,49	1
1922	0,47	1,41	1,12	0,50	1,02	0,52	–	–	0,55	0,51	1
1923	-0,35	0,02	0,98	-0,16	0,12	0,70	–	–	0,52	0,46	1
1924	1,42	0,81	0,88	1,49	0,90	0,83	–	–	0,52	0,47	1
1925	-0,85	0,54	0,20	-0,84	0,69	0,40	–	–	0,12	0,10	1
1926	0,31	-0,42	0,56	-0,11	-0,66	0,42	–	–	0,32	0,27	1
1927	-0,08	0,08	-0,46	-0,22	-0,33	-0,72	–	–	0,50	0,43	1
1928	-0,89	-0,77	-0,49	-0,89	-0,76	-0,73	–	–	0,12	0,10	2
1929	0,17	-0,57	-0,58	-0,18	-0,73	-0,77	–	–	0,26	0,22	1
1930	-1,04	-0,65	-1,13	-1,11	-0,82	-1,17	–	–	0,04	0,04	2
1931	-0,67	-1,32	-1,01	-0,83	-1,33	-1,14	–	–	0,08	0,06	2
1932	-1,81	-1,81	-2,18	-1,82	-1,63	-1,91	–	–	0,13	0,11	4
1933	-0,01	-1,24	-1,49	-0,59	-1,41	-1,60	–	–	0,05	0,04	2
1934	0,75	0,46	-0,52	0,48	-0,08	-0,70	–	–	0,46	0,39	1
1935	0,79	1,01	0,78	0,92	0,76	0,34	–	–	0,55	0,51	1
1936	-1,40	-0,31	0,16	-1,15	0,12	0,22	–	–	0,26	0,22	2
1937	0,07	-0,95	-0,29	-0,52	-1,11	-0,22	–	–	0,16	0,14	1

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Valores anuais entre 1938 e 1962 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1938	0,28	0,15	-0,65	0,06	-0,38	-0,86	–	–	0,47	0,39	1
1939	0,01	0,11	0,06	-0,15	-0,18	-0,48	–	–	0,47	0,40	1
1940	1,09	0,74	0,71	1,09	0,58	0,39	–	–	0,54	0,50	1
1941	-1,05	0,14	0,05	-0,46	0,47	0,21	–	–	0,52	0,47	1
1942	-1,60	-1,99	-0,75	-1,60	-1,24	-0,14	–	–	0,05	0,04	2
1943	-0,86	-1,84	-2,22	-1,32	-1,93	-1,68	–	–	0,07	0,06	3
1944	0,17	-0,55	-1,38	-0,31	-1,01	-1,56	–	–	0,25	0,21	2
1945	0,87	0,67	0,07	0,73	0,23	-0,33	–	–	0,51	0,44	1
1946	0,15	0,66	0,58	0,31	0,53	0,21	–	–	0,45	0,38	1
1947	-0,15	-0,10	0,40	0,13	0,15	0,37	–	–	0,50	0,42	1
1948	-0,13	-0,30	-0,23	-0,04	-0,07	-0,01	–	–	0,43	0,36	1
1949	0,39	0,10	-0,08	0,35	0,08	0,01	–	–	0,52	0,46	1
1950	0,48	0,53	0,30	0,79	0,60	0,37	–	–	0,37	0,31	1
1951	-0,76	-0,23	-0,02	-0,57	0,18	0,20	–	–	0,24	0,20	2
1952	-0,17	-0,75	-0,36	-0,32	-0,67	-0,10	–	–	0,38	0,32	1
1953	-1,13	-0,99	-1,34	-1,20	-0,98	-1,14	–	–	0,06	0,05	2
1954	-0,56	-1,30	-1,22	-0,87	-1,40	-1,29	–	–	0,00	0,00	3
1955	-0,17	-0,62	-1,22	-0,40	-0,89	-1,34	–	–	0,13	0,11	2
1956	-0,20	-0,37	-0,70	-0,30	-0,56	-0,94	–	–	0,28	0,23	1
1957	0,08	-0,18	-0,32	0,01	-0,30	-0,53	–	–	0,53	0,47	1
1958	-2,19	-1,33	-1,27	-1,77	-0,85	-0,91	–	–	0,00	0,00	3
1959	0,20	-1,22	-0,99	-0,31	-1,14	-0,91	–	–	0,16	0,14	2
1960	-0,67	-0,40	-1,48	-0,67	-0,72	-1,32	–	–	0,05	0,04	2
1961	0,91	0,18	0,20	0,82	0,17	-0,10	–	–	0,75	0,73	1
1962	0,20	0,71	0,19	0,60	0,76	0,32	–	–	0,51	0,44	1

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Valores anuais entre 1963 e 1987 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluyente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1963	0,84	0,66	1,02	1,09	0,95	1,02	–	–	0,77	0,75	1
1964	1,96	1,96	1,73	2,22	2,01	1,81	–	–	0,99	0,99	1
1965	0,47	1,74	1,87	0,75	1,85	1,87	–	–	0,93	0,93	1
1966	-0,77	-0,24	1,10	-0,63	0,12	1,35	–	–	0,65	0,62	1
1967	0,67	-0,08	0,16	0,52	-0,07	0,24	–	–	0,93	0,92	1
1968	-0,05	0,37	-0,16	0,04	0,25	-0,14	–	–	0,86	0,84	1
1969	0,74	0,42	0,68	0,36	0,13	0,25	–	–	1,00	1,00	1
1970	-0,78	-0,02	-0,12	-0,88	-0,29	-0,32	–	–	0,87	0,86	1
1971	0,79	0,02	0,41	0,06	-0,54	-0,31	–	–	0,92	0,91	1
1972	-0,73	0,05	-0,45	-0,74	-0,48	-0,87	–	–	0,68	0,65	1
1973	1,34	0,53	0,84	1,17	0,45	0,28	–	–	0,94	0,93	1
1974	2,37	2,61	1,94	3,12	2,74	2,18	–	–	0,93	0,93	1
1975	1,01	2,41	2,71	1,44	2,85	2,74	–	–	0,94	0,93	1
1976	-0,28	0,50	1,92	0,10	0,96	2,44	–	–	0,83	0,82	1
1977	1,29	0,73	1,14	1,20	0,78	1,22	–	–	0,90	0,89	1
1978	-0,17	0,80	0,46	0,03	0,74	0,54	–	–	0,82	0,81	1
1979	-0,86	-0,82	0,19	-0,93	-0,59	0,24	–	–	0,50	0,43	1
1980	-0,27	-0,90	-0,90	-0,43	-0,94	-0,77	–	–	0,21	0,18	2
1981	-0,97	-0,97	-1,38	-1,00	-0,98	-1,31	–	–	0,05	0,04	2
1982	-0,28	-0,97	-1,03	-0,69	-1,16	-1,20	–	–	0,09	0,08	2
1983	-1,27	-1,16	-1,61	-1,33	-1,32	-1,62	–	–	0,02	0,02	3
1984	0,75	-0,28	-0,47	0,18	-0,59	-0,89	–	–	0,67	0,64	1
1985	2,00	1,94	1,10	2,36	1,74	1,15	–	–	0,91	0,90	1
1986	1,49	2,43	2,42	2,18	2,71	2,32	–	–	0,91	0,90	1
1987	-0,21	0,95	1,97	0,19	1,60	2,32	–	–	0,80	0,79	1

□ Normal □ Pré-Alerta □ Alerta □ Emergência I □ Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Valores anuais entre 1988 e 2012 dos índices SPI e SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, e dos índices IE, IS e NM, além da classificação de estado de seca, para a RMF.

Ano	Precipitação (P)			Vazão Afluyente (Q)			Volume(V)				
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}	NM
1988	0,54	0,16	1,03	0,51	0,32	1,42	–	–	0,88	0,86	1
1989	0,78	0,85	0,54	0,94	0,79	0,62	–	–	0,88	0,88	1
1990	-0,71	0,05	0,30	-0,29	0,40	0,45	–	–	0,68	0,66	1
1991	-0,24	-0,77	-0,17	-0,30	-0,49	0,10	–	–	0,50	0,42	1
1992	-0,30	-0,49	-0,89	-0,20	-0,44	-0,59	–	–	0,27	0,23	1
1993	-2,25	-1,72	-1,58	-1,89	-1,07	-1,06	–	–	0,02	0,01	2
1994	1,24	-0,24	-0,44	0,66	-0,25	-0,41	0,95	0,94	0,79	0,77	1
1995	0,96	1,49	0,36	1,16	1,03	0,40	1,00	1,00	0,87	0,86	1
1996	0,80	1,17	1,64	1,16	1,32	1,25	0,94	0,93	0,81	0,79	1
1997	-0,98	-0,08	0,47	-0,70	0,45	0,83	0,50	0,43	0,58	0,54	2
1998	-1,39	-1,81	-0,86	-1,44	-1,38	-0,13	0,12	0,10	-0,06	-0,05	2
1999	-0,46	-1,39	-1,80	-1,04	-1,64	-1,68	0,00	0,00	-0,04	-0,04	2
2000	0,80	0,22	-0,58	0,07	-0,60	-1,14	0,50	0,43	0,70	0,68	1
2001	-0,82	0,01	-0,32	-0,80	-0,50	-0,94	0,48	0,41	0,63	0,60	1
2002	0,69	-0,09	0,36	0,24	-0,37	-0,36	0,92	0,90	0,90	0,89	1
2003	0,48	0,74	0,15	0,44	0,30	-0,14	0,87	0,84	0,86	0,85	1
2004	0,61	0,68	0,90	0,71	0,60	0,48	0,88	0,86	0,86	0,85	1
2005	-0,47	0,05	0,26	-0,43	0,16	0,23	0,44	0,38	0,66	0,63	1
2006	0,49	-0,04	0,27	0,45	-0,04	0,24	0,52	0,45	0,78	0,76	1
2007	-0,43	-0,02	-0,35	-0,27	0,04	-0,26	0,28	0,24	0,58	0,54	1
2008	0,03	-0,38	-0,07	-0,15	-0,38	-0,15	0,47	0,41	0,57	0,53	1
2009	1,69	1,25	0,79	1,86	1,21	0,84	0,96	0,95	0,92	0,92	1
2010	-1,43	0,52	0,38	-0,59	1,09	0,76	0,33	0,28	0,58	0,55	2
2011	0,81	-0,31	0,84	0,55	-0,03	1,01	0,67	0,60	0,71	0,69	1
2012	-1,65	-0,41	-1,18	-1,14	-0,21	-0,53	0,32	0,28	0,09	0,08	2

Normal
 Pré-Alerta
 Alerta
 Emergência I
 Emergência II

Fonte: Elaboração própria

Outra seca famosa no NEB é a de 1993, nesse evento os índices que caracterizam a seca hidrológica na RHJ, como o SRI-24 e SRI-36 classificaram o estado de seca como Pré-Alerta enquanto o SRI-12 classificou como estado de Emergência I, mostrando que a RHJ sofreu uma seca intensa mais de curta duração, concordando com a gravidade dos impactos da seca encontrados nos registros históricos.

A seca de 1998 é um outro episódio conhecido pela sua severidade, segundo registros históricos. Neste ano, todos os índices conseguiram identificar a ocorrência de seca, porém o pior estado de seca indicado foi o de Alerta, registrado pelo SPI-12 e pelos índices associados ao volume ($IS_{média}$, $IS_{mediana}$ e NM), não correspondendo em sua totalidade com a gravidade dos impactos reais ocorridos.

A seca do final da década de 90, se prolongou até o ano de 2001, dando uma trégua no ano 2000, como mostra muito bem os IS e NM, chegando ao final de 2001 com a RHJ em situação de Emergência tipo II. Os anos seguintes de 2002 e 2003 apesar de não serem considerados como secos, o que é confirmado pelos índices SPI e SRI, não indicam a situação real do hidrossistema, como apontado pelos IE e IS, pois necessita de um tempo para se reestabelecer.

Em relação RMF, pode-se observar nas Tabelas 12 a 15 um comportamento similar aos índices SPI e SRI da RHJ, porém com tendência das secas indicadas se apresentarem com antecedência e com uma vulnerabilidade hídrica mais elevada, conforme o comportamento do IS. Ainda é possível destacar, que em anos de pluviometria historicamente muito baixa, como 1915, 1919, 1942, 1993 e 2012, os índices como SPI e SRI chegam a diagnosticar estados de Emergência dos tipos I e II, e os IS dos mesmo anos citados ou dos anos seguintes a estes também diagnosticam estado de Emergência, o que mostra a falta de resiliência hidrológica da RMF às secas.

Extrai-se ainda que, através da análise qualitativa feita entre os índices avaliados e registros históricos de seca, os índices baseados na variável volume de água acumulado nos reservatórios representam mais realisticamente o estado de seca de um sistema hídrico frente aos seus múltiplos usos.

5.1.2 Análise quantitativa para o monitoramento do Sistema Jaguaribe-Metropolitana

Para a análise quantitativa dos índices de seca, agrupou-se as contingências comparando os estados de seca do IS baseado na mediana dos estoques de água com as

classificações de severidade do SPI e do SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, além do NM.

Dessa maneira, para uma melhor avaliação dos índices de seca, agrupou-se os estados de Pré-Alerta e Alerta e os Emergência I e II no IS e no NM, chamando os agrupamentos apenas de Alerta e Emergência, respectivamente, e também foi feito um agrupamento dos graus de severidade da seca dos índices SPI e SRI, ficando em conjunto Úmido e D0, D1 e D2, D3 e D4. A Tabela 5 (ver tabela na seção 4.2.3) mostrou a associação entre os agrupamentos dos estados e dos graus de severidade de seca.

Com isso, as Tabelas 16 a 18 apresentam os valores calculados da FAR e do POD, considerando-se uma inter-comparação do IS mediano com os índices SPI e SRI, nas três escalas de tempo em estudo, e com os NM.

Pela Tabela 16, para a RHJ, verifica-se que para o SPI-12 no estado de Alerta o FAR é de 0,73 e o POD é de 0,13, para o SPI-24 tem-se um FAR de 0,59 e um POD de 0,30, para o SPI-36 têm-se um FAR alto, cerca de 0,73, implicando que em 73% das vezes foi estimada a ocorrência do estado de Alerta e ele não ocorreu.

Em relação ao SRI-12, nota-se um baixo POD para os estados de Alerta e Emergência, indicando que a quantidade de acertos dos eventos que efetivamente ocorreram foi de 9% e 11%, respectivamente, ou seja, das vezes que o IS_{mediana} informou o estado de alerta em apenas 9% o SRI concordou, o mesmo é válido para o estado de Emergência, porém para um percentual de 11%. Ainda em relação ao nível de Alerta, tem-se que o FAR atingiu um valor de 85 %, o mais alto dentre os demais índices.

Para o SRI-24 e SRI-36, bem como para o SPI-24 e SPI-36, destacam-se os valores de FAR em ocorrência de estado de Emergência que foram de 0%, indicando que em nenhuma das vezes que o IS_{mediana} afirmou ser Emergência esses índices de seca meteorológica e hidrológica afirmaram que não era.

Ainda com relação a Tabela 16, nota-se que todos os índices mostraram valores de POD iguais ou superiores a 90% para o estado de normalidade em todos os horizontes de tempo em estudo, apontando uma boa capacidade de detecção para esse estado de seca, porém o interesse desse estudo não é esse. Para o estado de Alerta, no SPI, os valores de POD atingiram um máximo de 30% entre as escalas temporais em análise enquanto o FAR atingiu o mínimo de 59% para todos os horizontes temporais em estudo, no SRI, um comportamento similar é verificado. Para o estado de Emergência, tem-se que os índices de seca em geral não tiveram capacidade de detecção maior que 0,20.

Tabela 16 – Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, na RHJ.

Índice Sintético (mediana)	SPI12		SPI24		SPI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
Normal	0,45	0,90	0,38	0,98	0,39	1,00
Alerta	0,73	0,13	0,59	0,30	0,73	0,17
Emergência	0,43	0,15	0,00	0,19	0,00	0,15
Índice Sintético (mediana)	SRI12		SRI24		SRI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
Normal	0,43	0,92	0,37	0,98	0,36	0,98
Alerta	0,85	0,09	0,75	0,22	0,76	0,22
Emergência	0,50	0,11	0,00	0,11	0,00	0,11

Fonte: Elaboração própria.

Através da Tabela 17, para a RMF, obtém-se que das vezes que o IS apontou estado de Alerta, o SPI entrou nesse estado em apenas 5%, para o SPI-12, 16% para o SPI-24 e 21% para o SPI-36, conforme a métrica de verificação POD. Para o estado de Emergência, o POD foi um pouco maior, cerca de 26%, para o SPI-12 e SPI-24. Em relação ao estado Normal, tem-se que o POD é sempre superior a 90%, para todos os horizontes temporais, podendo-se destacar ainda o SPI-36 e o SRI-24 por atingirem o valor ideal, indicando que o estado Normal desses índices está bem correlacionado com o IS.

Para o SRI, ainda com relação a Tabela 17, percebe-se no SRI-12 um baixíssimo POD do nível de Alerta, somente 0,05 ou 5%, e um alto valor de FAR, indicando uma correlação de apenas 6% com o índice de seca IS em análise. Em relação ao nível de Emergência, também foi possível notar um baixo POD, indicando uma capacidade de detecção de eventos de somente 22%. Para as escalas de tempo de 24 e 36 meses, o SRI, apresenta os mesmos valores ideais de FAR e mesma capacidade de detecção para o estado Emergência, para o estado de Alerta o FAR é maior na escala de tempo de maior magnitude.

Pode-se destacar ainda, de uma maneira mais geral, que no estado de Emergência, na maioria dos índices analisados o FAR foi de 0% e no estado Normal ficou em torno de 30% a 45%, mostrando que em estados de seca mais amenos há uma leve tendência de superestimação dos níveis de alerta de seca.

Tabela 17 – Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, na RMF.

Índice Sintético (mediana)	SPI12		SPI24		SPI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
	Normal	0,33	0,91	0,28	0,98	0,26
Alerta	0,93	0,05	0,80	0,16	0,78	0,21
Emergência	0,14	0,26	0,00	0,26	0,00	0,17
Índice Sintético (mediana)	SRI12		SRI24		SRI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
	Normal	0,28	0,95	0,26	1,00	0,30
Alerta	0,94	0,05	0,76	0,21	0,79	0,21
Emergência	0,17	0,22	0,00	0,22	0,00	0,22

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 18 mostra uma inter-comparação entre o IS mediano com o NM tanto para a RHJ como para RMF. Para o Jaguaribe, nota-se uma excelente FAR tanto para o estado de seca Normal como para o de Emergência, atingindo valores bem próximos aos ideais, em relação ao POD no Jaguaribe é possível verificar valores bastante elevados, principalmente nos estados de Alerta e Emergência, apresentando uma capacidade de detecção de 96% e 85% respectivamente. Para a Metropolitana os valores de FAR e POD foram opostos aos ideais ao se olhar para a categoria de Emergência, isso pode ter ocorrido devido ao aumento da resiliência hidrológica na RMF dadas as configurações adotadas no modelo de operação aqui utilizado.

Tabela 18 – Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do NM nas RHJ e RMF.

Índice Sintético (mediana)	NM(Jaguaribe)	
	FAR	POD
Normal	0,00	0,62
Alerta	0,51	0,96
Emergência	0,04	0,85
Índice Sintético (mediana)	NM(Metropolitna)	
	FAR	POD
	Normal	0,41
Alerta	0,76	0,37
Emergência	1,00	0,00

Fonte: Elaboração própria.

Da avaliação quantitativa, observou-se que os índices de seca baseados em variáveis como precipitação e vazão apresentam alta taxa de falso alarme e baixo poder de detecção, principalmente nos estados associados a uma seca propriamente dita (Alerta e Emergência), indicando que o SPI e o SRI nas escalas utilizadas não representam bem o estado real do sistema hídrico quanto a sua acumulação de água nos reservatórios.

5.2 Resultados do Sistema de Gerenciamento de Seca

Previsões de vazões sazonais, para cada reservatório do SJM, se utilizando de modelagem dinâmica da precipitação acoplada a um modelo chuva-vazão, de uma técnica de reamostragem de dados, e de rede neurais de múltiplas entradas e única saída auxiliadas por técnicas de bootstrap foram geradas segundo suas respectivas metodologias, além desses métodos, vazões sazonais previstas ainda foram obtidas por uma técnica de *ensemble* a fim de formar um superconjunto de previsões. Em seguida, todas as técnicas de previsões citadas foram testadas, conforme índices de desempenho apresentados na Tabela 1, a fim de se averiguar a destreza dos modelos.

Desta forma, em virtude da grande quantidade de dados e gráficos gerados, aqui serão apresentados primeiramente os índices de desempenho, no intuito de verificar qual a melhor configuração e modelo para uma boa previsão, em seguida os resultados da melhor configuração obtida serão discutidos.

5.2.1 Avaliação do desempenho da previsão por modelagem dinâmica e estatística

As previsões das precipitações na modelagem dinâmica realizadas no modo *forecast* foram realizadas para o período de 2004 a 2015, inicializadas com as condições de TSM global de OND e simuladas de janeiro a maio. Essas precipitações passaram por um processo de correção de viés, já explanado na metodologia, antes de serem acoplados no modelo SMAP previamente calibrado pela FUNCEME tendo como resultados as vazões previstas para os principais reservatórios do SJM. O modelo semi-paramétrico k-vizinhos foi calibrado para o período de 1913 a 2002, tendo como variáveis predictoras as anomalias de TSM do ATN, ATS e NINO3 de OND para inicialização do modelo em janeiro e AMJ para inicialização do modelo em julho, as vazões previstas no final do processo foram para o período de 12 meses sequenciais inicialmente para o intervalo de 2004 a 2015.

Para o cálculo dos índices de desempenho, tanto as vazões previstas como as observadas foram agregadas anualmente pela mediana dos cinco primeiros meses do ano previsto para um intervalo de anos de validação que vai de 2004 a 2012, esse período serviu tanto para modelagem dinâmica como para o modelo estatístico.

Para uma representação mais concisa dos modelos se adotou a sigla SMAP para representar a modelagem dinâmica acoplada e as abreviações PER para as precipitações previstas no modo *forecast* baseadas em TSM persistidas e PRE para as baseadas em TSM previstas, conforme explanado na metodologia da previsão dinâmica. A sigla “kv” usada para a modelagem estatística se refere a metodologia dos k-vizinhos, os períodos de inicialização das condições atmosféricas dos modelos foram representados pelo número inteiro que representa o mês, por exemplo julho (7), colocados logo após as siglas. Assim tem-se os modelos com as seguintes inicializações SMAP(PER), SMAP(PRE), kv1 e kv7. As Figuras 13 a 17 se referem aos índices EQM, R^2 , Ic e NS podem ser observadas no Apêndice C desta tese.

A Figura 13 traz os índices de desempenho para o reservatório Banabuiú, mostrando que a modelagem estatística, em geral teve os melhores resultados, com os EQM em torno de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ tanto para os modelos inicializados em janeiro como em julho, com os maiores R^2 , destacando-se o kv1. Pode-se destacar ainda que a configuração SMAP(PER) e SMAP(PRE) tiveram um NS fortemente negativo indicando que a média dos dados observados é uma ótima previsão frente a essa configuração.

Para o Castanhão, a Figura 14 mostra EQM elevado para todas as configurações, mas dessas a que teve maior valor foi a SMAP(PRE), este também teve um NS destoante em relação as demais configurações, observando esse mesmo índices nota-se que a configuração SMAP(PER) foi a que teve menor EQM, em torno de $60 \text{ m}^3/\text{s}$, e maior NS, apesar do mesmo ainda ser considerado um valor baixo. Em relação ao Ic, novamente se tem a SMAP(PER) como a melhor entre todas as outras configurações, atingindo o valor de 0,8. Esse tipo de resultado mostra a forte influência das TSM na inicialização dos modelos dinâmicos afetando a precipitação dessa região.

No Orós, Figura 15, o kv7 é o que tem a maioria dos índices de desempenho apontando para melhores resultados, mas ainda assim não é possível fazer muita distinção da previsão em relação à média observada. A pior configuração é SMAP(PRE), dada a combinação dos índices de desempenho, com destaque para o EQM com valores próximos a $60 \text{ m}^3/\text{s}$ e para o NS com valor menor que -10.

A Figura 16 corresponde aos índices de desempenho para o reservatório Pacajus, aqui nota-se que os modelos estatísticos estão apontando para resultados mais promissores, sendo destes o que inicializa em janeiro ligeiramente superior aos demais. A configuração SMAP(PRE) é a que se mostra com maiores deficiências de desempenho, com EQM por volta de 20 m³/s, R² próximo a 0, e NS entre -2 e -2,5.

Para o conglomerado de pequenos reservatórios, Pacoti, Riachão e Gavião, verifica-se na Figura 17 que a configuração SMAP(PER) tem o pior desempenho, com maior EQM, por volta de 13 m³/s, um R² próximo a 0,1, e NS negativo próximo a -1,5, demonstrando a sua baixa destreza para previsão sazonal. A composição kv1 teria um comportamento mediano se observado apenas as métricas EQM, R² e Ic, porém o NS é negativo, assim como todas as outras configurações adotadas. Essa baixa destreza generalizada de todos modelos em estudo para esse conglomerado provavelmente ocorre por conta de modelos atmosféricos regionais dinâmicos e estocásticos não conseguirem representar bem a variabilidade de precipitação e vazão de regiões muito pequenas.

Além desses índices, conforme explanado na metodologia também foi calculado a razão de verossimilhança, que pode inclusive ser um índice de desempenho mais representativo que os demais, visto que a sua maneira de calcular leva em consideração a probabilidade dos valores dentro de uma distribuição.

Dessa maneira, a Tabela 19 e a Tabela 20 mostram esse índice calculado para duas funções de densidade, biweight e gamma, tanto para a modelagem dinâmica como para modelagem estatística, respectivamente.

Pela Tabela 19, nota-se que apenas para o castanhão a razão de verossimilhança indica melhora em relação a climatologia dos dados observados, destaca-se ainda que para o conglomerado de reservatórios Pacoti-Riachão-Gavião, a modelagem dinâmica não consegue representar os dados observados, corroborando com os índices anteriormente explanados. Em uma visão mais geral, têm-se que a FDP *gamma* indicou melhores LR mostrando que os dados de vazão prevista pela modelagem dinâmica têm um melhor ajuste a esse tipo de FDP. Outro resultado interessante é que a previsão da precipitação acoplada ao modelo SMAP, teve uma “melhor” representatividade aquelas que a vazão teve por base a precipitação inicializada com TSM prevista.

Pela Tabela 20, verifica-se que a modelagem estatística teve um bom desempenho, principalmente os reservatórios Banabuiú, Castanhão e Pacajus. Entretanto, reservatórios como o Orós e o conjunto Pacoti-Riachão-Gavião apesar de não terem alcançado um desempenho satisfatório, os índices mostram-se melhores que na

modelagem dinâmica. Outra característica dos dados de vazão prevista pelo modelo k-vizinhos é que a função densidade *biweight* teve um melhor ajuste aos dados de vazão prevista para o Castanhão, Pacajus e Pacoti-Riachão-Gavião.

Tabela 19 – Razão de verossimilhança das vazões previstas pela modelagem dinâmica para os reservatórios do SJM.

Reservatório	TSM	FDP	
		<i>Biweight</i>	<i>Gamma</i>
Banabuiú	PER	0,01	0,88
	PRE	0,87	0,94
Castanhão	PER	1,30	1,30
	PRE	1,07	1,01
Orós	PER	0,02	0,56
	PRE	0,79	0,79
Pacajus	PER	0,00	0,00
	PRE	0,17	0,69
Pacoti-Riachão-Gavião	PER	0,00	0,00
	PRE	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 – Razão de verossimilhança das vazões previstas pelo método dos k-vizinhos para os reservatórios do SJM.

Reservatório	Condições	FDP	
		<i>Biweight</i>	<i>Gamma</i>
Banabuiú	Janeiro	1,25	1,26
	Julho	1,25	1,25
Castanhão	Janeiro	1,34	1,25
	Julho	1,23	1,22
Orós	Janeiro	0,89	0,94
	Julho	1,05	0,86
Pacajus	Janeiro	1,22	1,13
	Julho	1,10	1,07
Pacoti-Riachão-Gavião	Janeiro	1,04	0,69
	Julho	0,85	0,79

Fonte: Elaboração própria

Por essa análise, na RHJ composta pelos reservatórios Banabuiú, Castanhão e Orós para efeitos desse estudo, e na RMF constituída pelos reservatórios, Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião, nota-se que o modelo estatístico tende a se sobressair em relação a modelagem dinâmica acoplada, tendo indicadores ligeiramente melhores o método do k-vizinhos com inicialização em janeiro.

5.2.2 Avaliação do desempenho da previsão por redes neurais do tipo MISO

As previsões sazonais de vazões por redes neurais adotaram uma abordagem, até o momento, diferente das demais previsões anteriormente realizadas em diversos aspectos. Trabalhou-se três estruturas de rede (ELM-LMS, ELM-RLS e MLP) para previsão das agregações sazonais dos dados de vazão para cada reservatório que compõe a região. Utilizou-se para treinamento das redes cerca de 90% das vazões observadas (1914 a 2003), restando 10% para generalização e validação do modelo, o que corresponde a 9 anos (2004 a 2012).

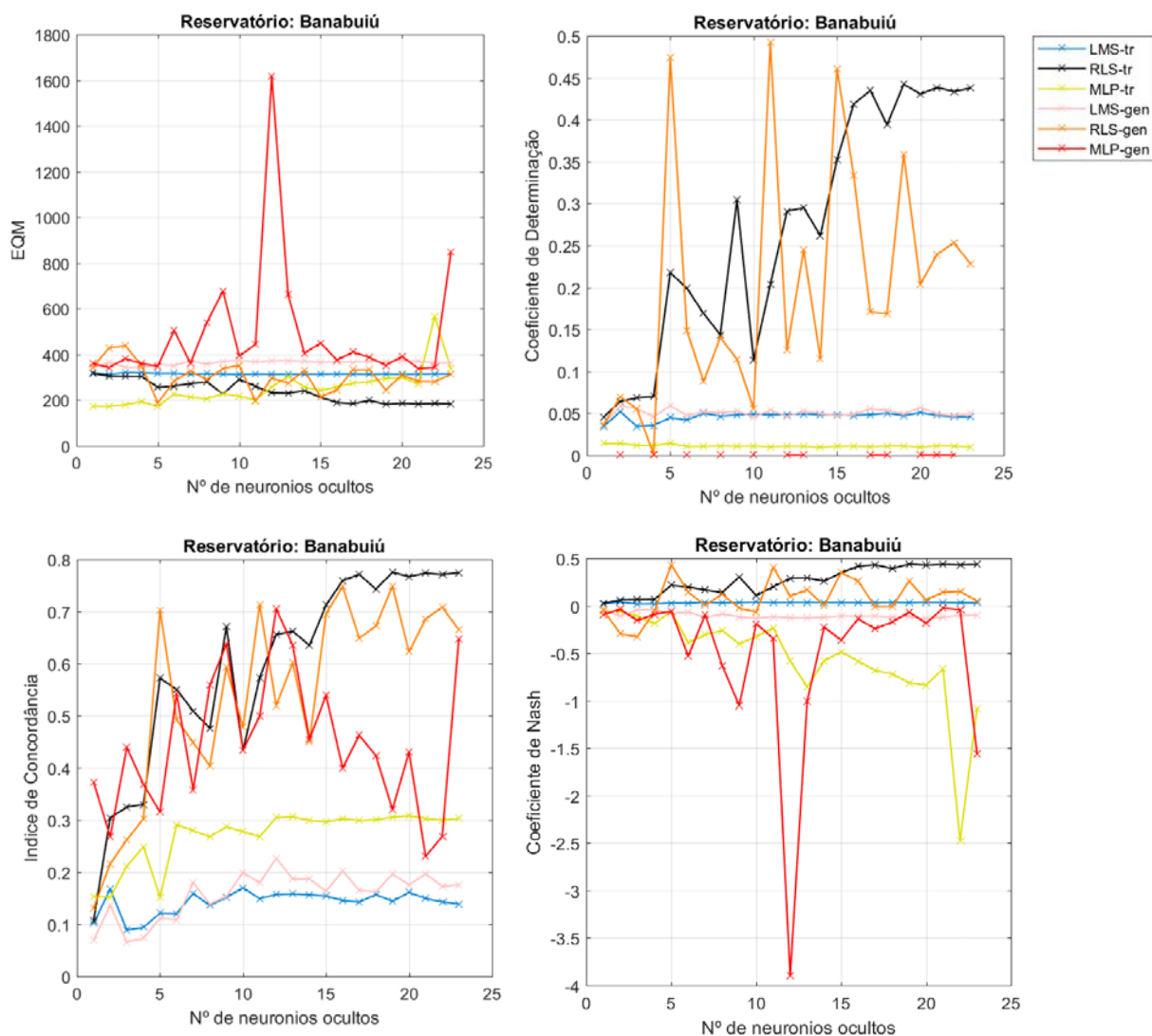
Para as RNA as múltiplas entradas foram as anomalias do ATN, ATS e NIÑO3 de OND para inicialização do modelo em janeiro e AMJ para inicialização do modelo em julho com defasagem de dois e um ano antes do ano que se deseja prever, além desses, a vazão média do primeiro semestre do ano anterior ao da vazão que se deseja prever agregada através da soma de todos os reservatórios que compõem o SJM também foi utilizada, totalizando sete entradas nas RNA. Essa configuração foi adotada após exaustivos testes das entradas que geravam melhores resultados. A saída desses modelos corresponde a previsão de um único ano de vazão semestral. Com essas configurações de entrada e saída foi rodada a previsão para cada reservatório do SJM.

Para avaliação de performance, computou-se os índices de desempenho conforme Tabela 1 para um máximo de neurônios ocultos na camada intermediária, a fim de identificar qual o número de neurônios que melhor se adequa ao problema, qual a estrutura com melhor desempenho e as diferenças entre o período de generalização (gen) e de treinamento (tr).

A Figura 18, mostra o reservatório Banabuiú com previsões inicializadas em janeiro, que o algoritmo que usa a regra de aprendizagem LMS se manteve com EQM praticamente constante independente do número de neurônios tanto no período de treinamento como no de generalização. Ainda em relação ao EQM, notou-se que a regra ELM-RLS no período de treinamento teve uma redução à medida que foram aumentando

os números de neurônios, no período de generalização a mesma oscilou sobre um valor médio de 300 m³/s, tem-se ainda que a rede ELM-RLS é a que em geral apresenta os melhores valores de índices de desempenho em ambos os períodos, dentro desta pode-se destacar ainda a rede com 11 neurônios na camada oculta para o período de validação, com R² de aproximadamente 0,5, Ic maior que 0,7 e NS de aproximadamente 0,4.

Figura 18 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Banabuiú com TSM inicializadas em janeiro.

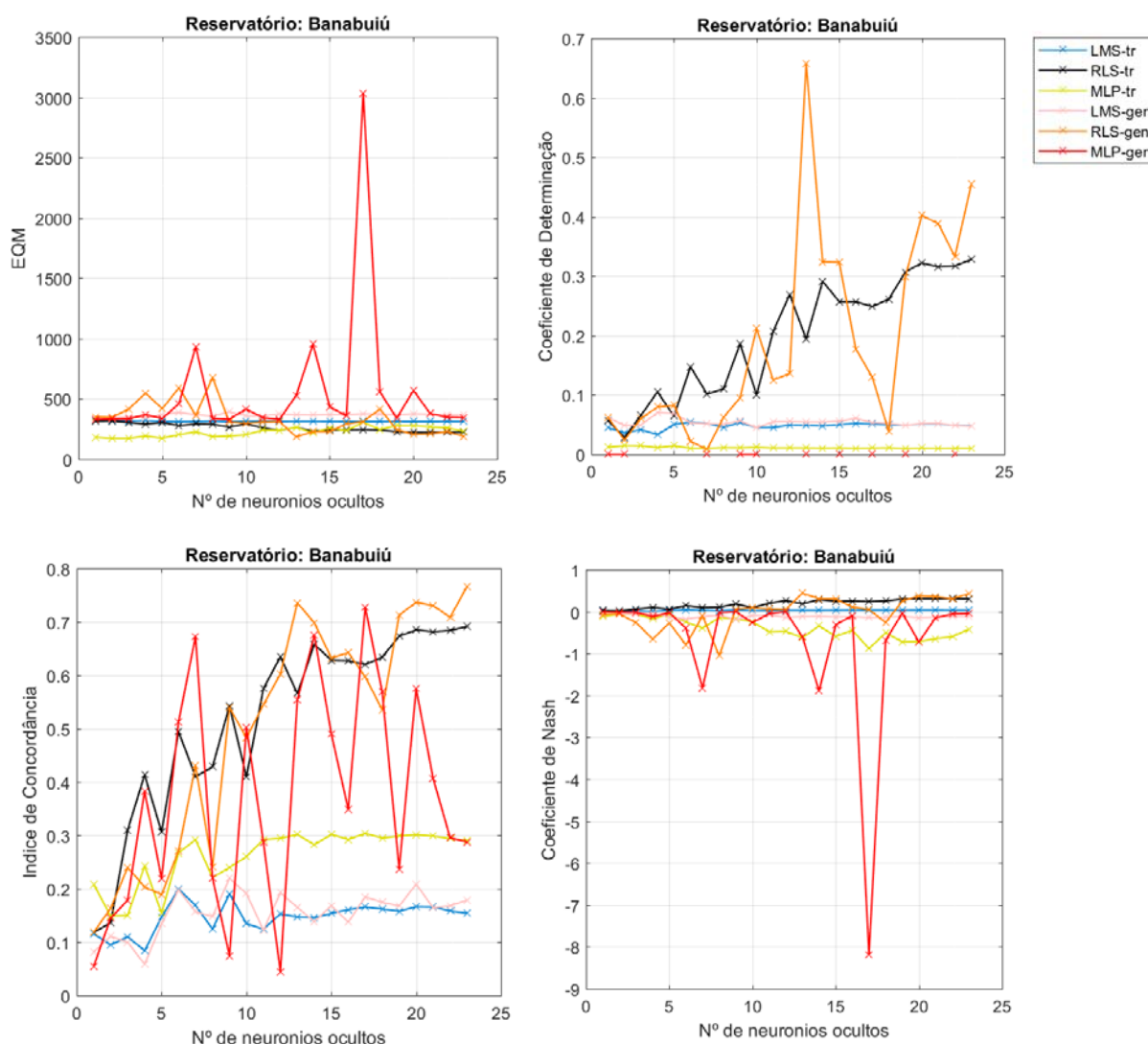


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 19, mostra para o reservatório Banabuiú com previsões inicializadas em julho, nitidamente um problema na rede MLP em ambos os períodos de análise, com destaque para os valores de Ic praticamente nulos para qualquer q seja a quantidade de

neurônios ocultos e NS se sobressaindo nos valores negativos. Contrário ao desempenho da rede MLP, tem-se a regra ELM-RLS que apresenta, EQM tendendo a diminuir a medida que se aumenta o número de neurônios ocultos, no período de generalização a rede com 13 neurônios é a que tem menor EQM, R^2 indicando que essa configuração de parâmetro explica mais de 60% dos dados observados, Ic mostrando que os dados concordam em mais de 70% do tempo previsto e NS se destacando em relação as demais configurações.

Figura 19 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Banabuiú com TSM inicializadas em julho.

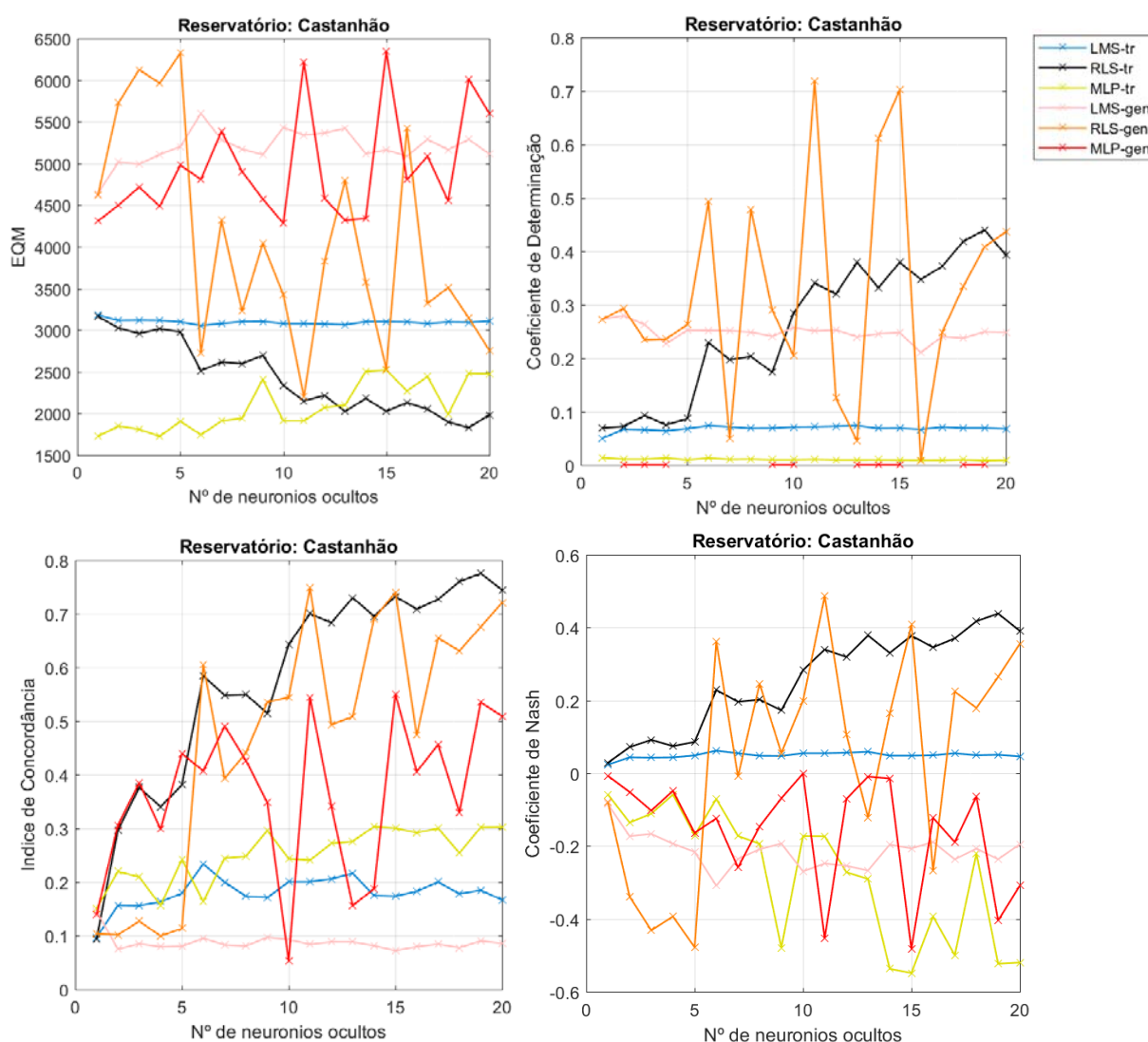


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 20, trata do desempenho para o reservatório Castanhão inicializado com as condições de janeiro, em que no período de treinamento verifica-se o algoritmo

de aprendizagem RLS como sendo as que possui os melhores índices de desempenho entre todas as outras RNA para o mesmo período. Focando no período de validação, tem-se q a regra ELM-RLS continua demonstrando ter o melhor desempenho, principalmente a partir a rede com 6 neurônios na camada oculta, entretanto a que tem maior potencial de ser utilizada nos próximos passos desse estudo é a rede com 11 neurônios na camada escondida, similar ao reservatório Banabuiú com mesma condição de inicialização.

Figura 20 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Castanhão com TSM inicializadas em janeiro.

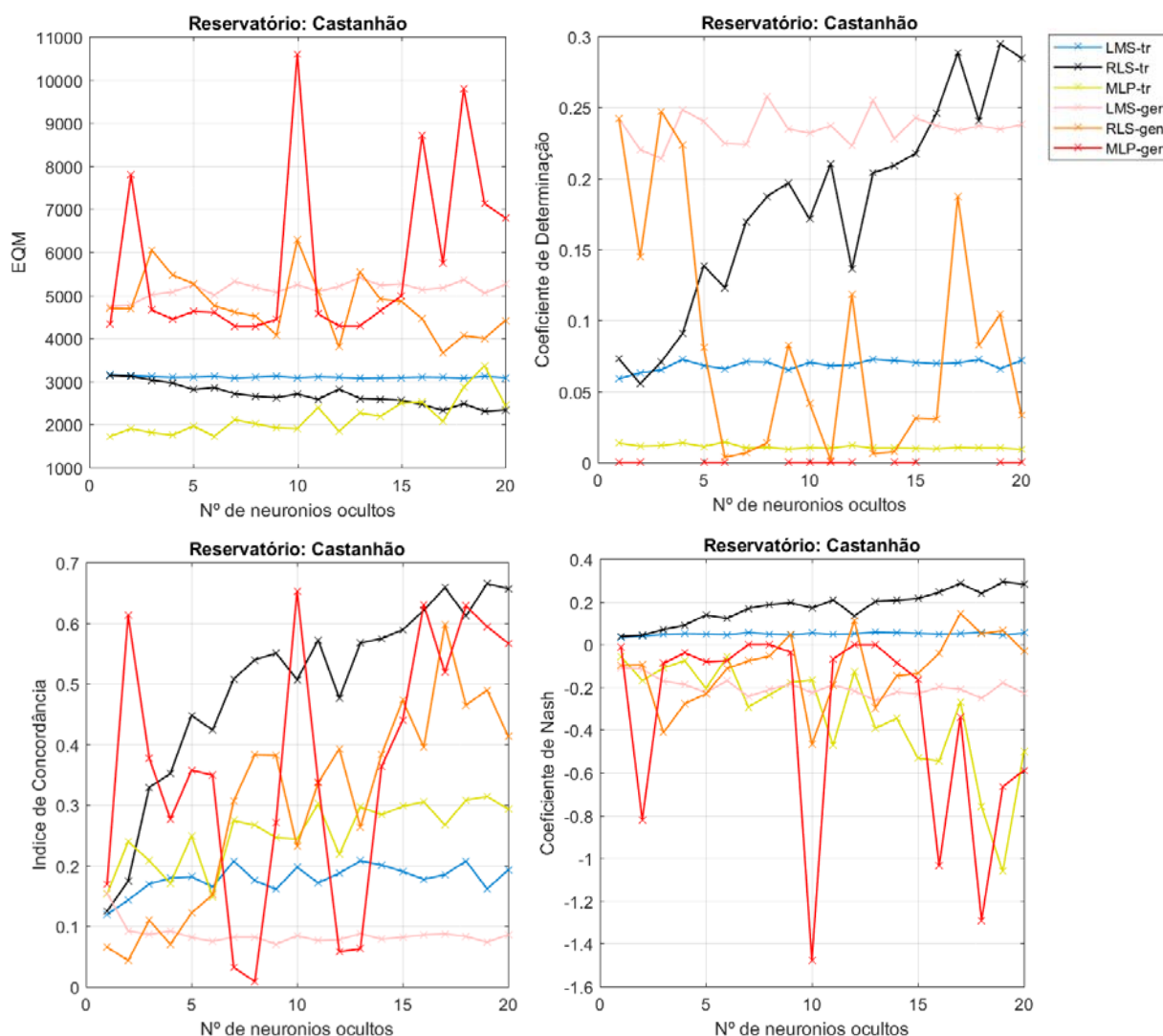


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 21, as simulações inicializadas com as condições de julho para o reservatório Castanhão, pode-se observar para o EQM que durante o período de treinamento

todas as RNA variam pouco, sendo que a regra ELM-RLS tende a diminuir esse índice de desempenho a medida que se aumenta o número de neurônios na camada oculta, essa melhora no índice de desempenho também ocorre para os outros demais índices analisados. No período de generalização, o pior desempenho foi o da rede MLP que apresentou grandes oscilações de EQM e NS negativo em todas as configurações de neurônios ocultos, o melhor desempenho foi o do algoritmo de aprendizagem LMS, podendo-se destacar a rede como 17 neurônios o menor EQM, um I_c de 0,6 com os dados observados e NS positivo.

Figura 21 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Castanhão com TSM inicializadas em julho.

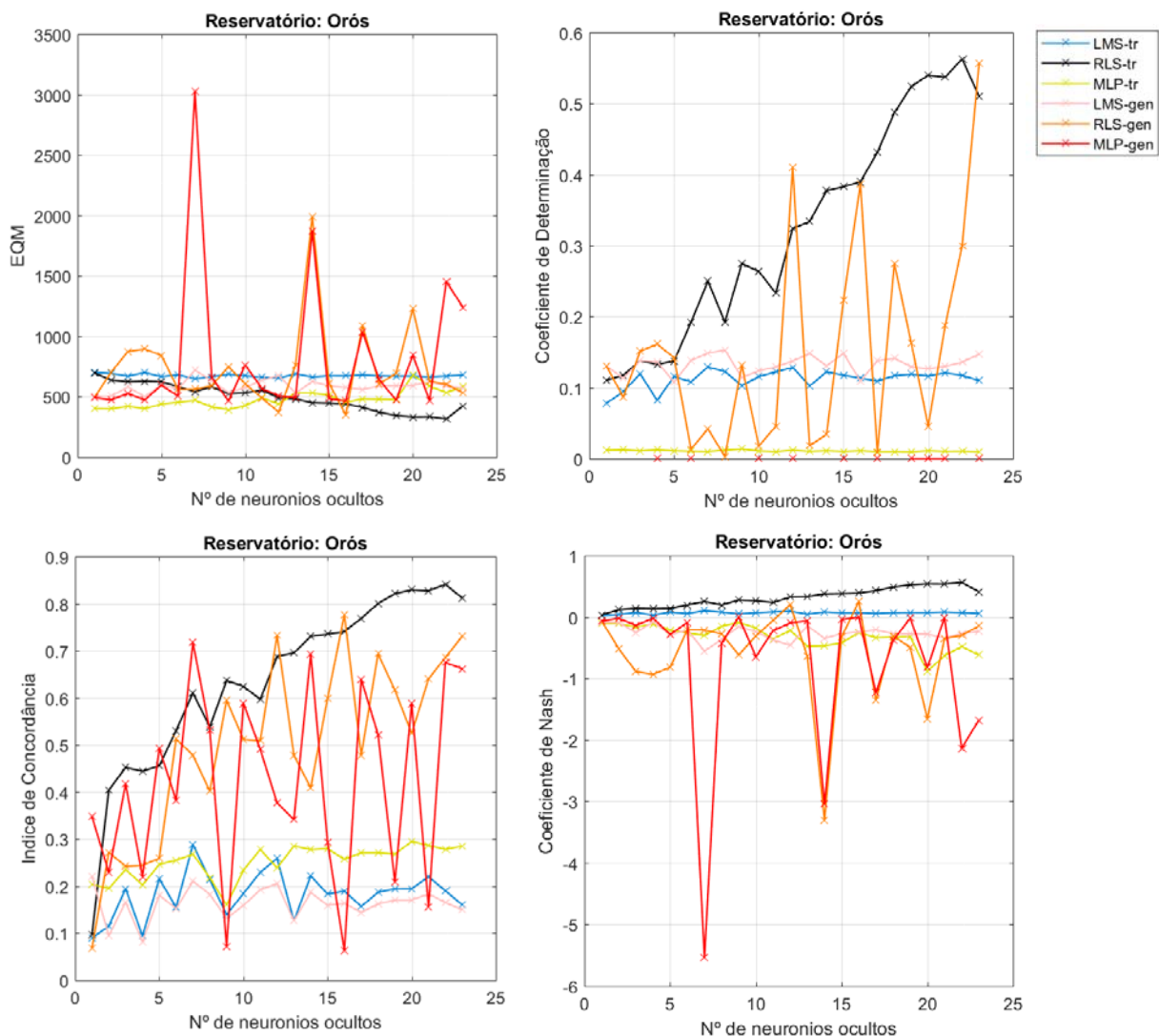


Fonte: Elaboração própria.

A simulação do reservatório Orós, inicializada como as condições de janeiro apresenta, conforme Figura 22, EQM bem estável e com baixos valores para o período

treinamento das RNA, na generalização o ELM-LMS sofre pequenas variações de EQM e as estruturas ELM-RLS e MLP encontram-se em fase. Em relação ao R^2 , pode-se destacar a regra ELM-RLS em ambos os períodos de análise que atinge valores superiores a 0,5 para algumas configurações de neurônios ocultos. No Ic as redes MPL e ELM-RLS no período de validação, se alternam no quesito melhor concordância com os dados observados. O NS por sua vez possibilita a escolha da melhor rede e configuração do parâmetro neurônio, sendo este a rede ELM-RLS com 16 neurônios ocultos.

Figura 22 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Orós com TSM inicializadas em janeiro.

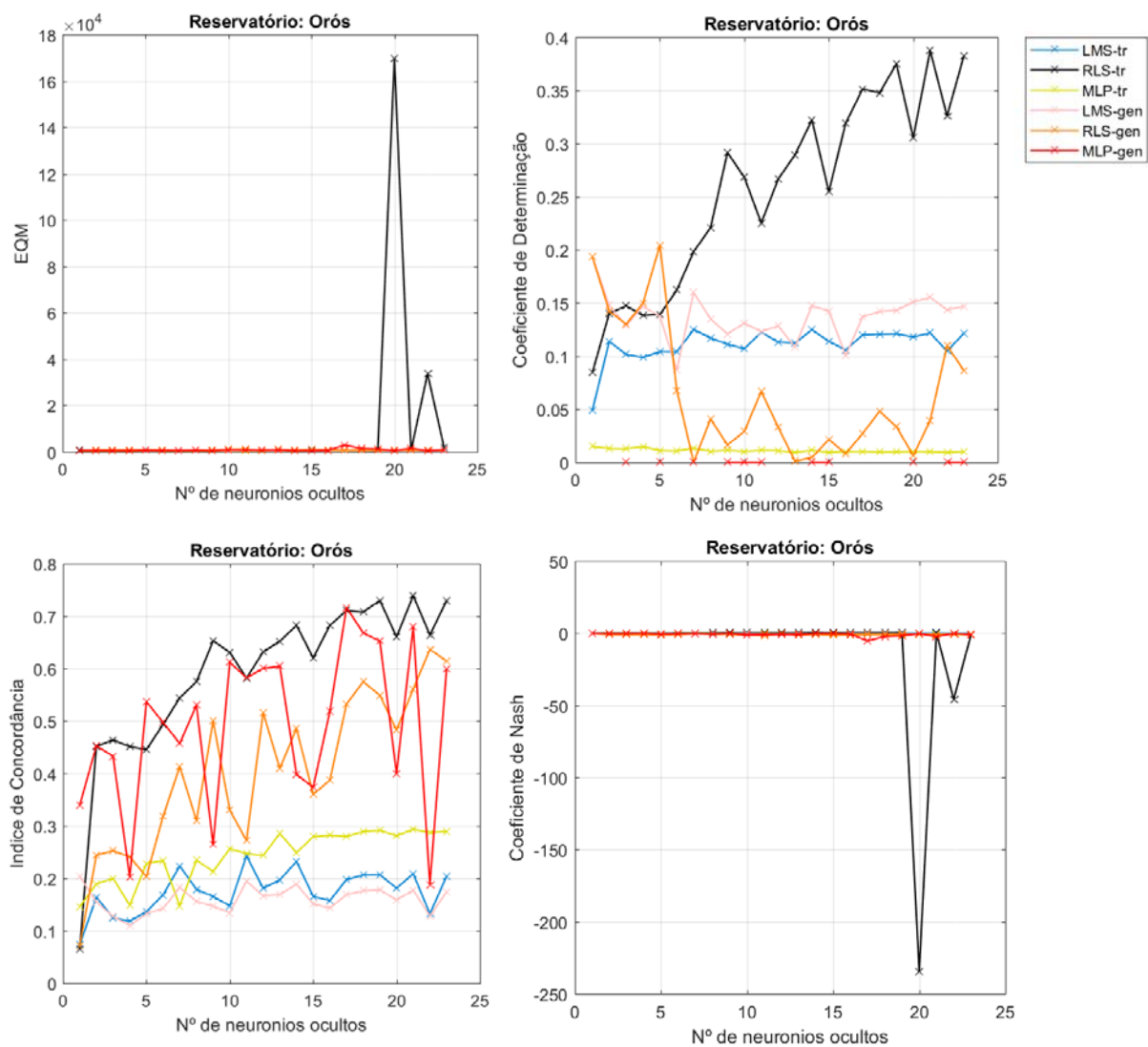


Fonte: Elaboração própria.

Inicializada como as condições de julho, a simulação do reservatório Orós, apresenta conforme Figura 23 problemas na visualização dos índices EQM e NS devido a um

“estouro” desses parâmetros na configuração com 20 e 22 neurônios da regra ELM-RLS durante período de treinamento, entretanto isso não afetou as demais redes e configurações, podendo os valores dos índices serem avaliados numericamente sem nenhum prejuízo. Dos índices de desempenho que não apresentaram esse problema gráfico, verifica-se melhores R^2 no período de validação na regra ELM-LMS e melhores valores de I_c a rede MLP. Na busca de seguir o padrão de adotar a ELM-RLS, que tem se destacado das demais estruturas de rede no período de validação dos outros reservatórios que compõem RHJ, adotou-se a configuração com 22 neurônios ocultos, que possui uma concordância com mais de 60% das vazões observadas, para os próximos passos desse estudo.

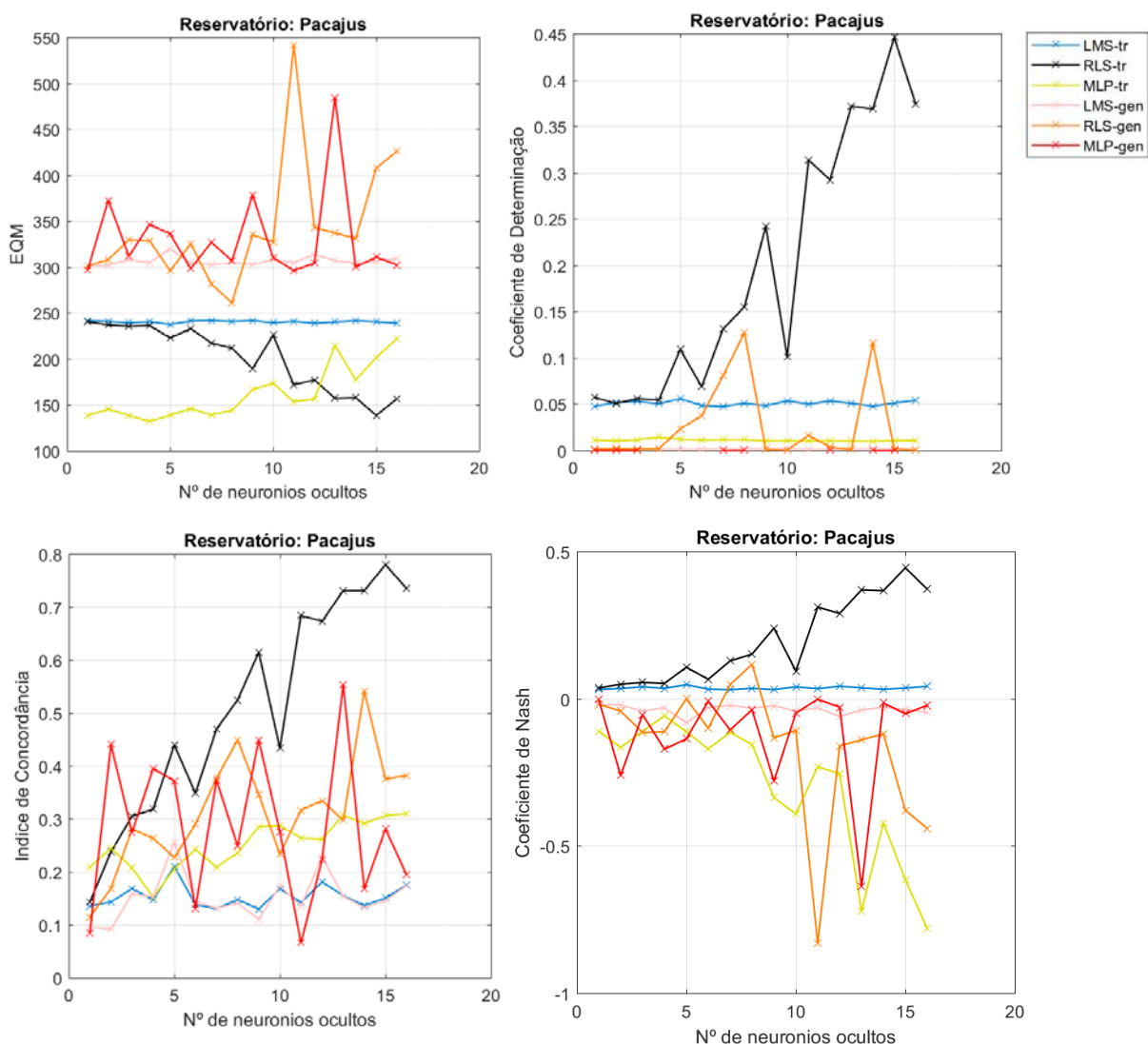
Figura 23 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Orós com TSM inicializadas em julho.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 24, mostra o desempenho para o reservatório de Pacajus com inicialização em janeiro, em que é possível verificar que a regra ELM-RLS durante treinamento é que tem melhor EQM, R^2 , Ic e NS para praticamente todas as configurações de neurônios ocultos. Na validação a regra ELM-RLS destaca-se para a configuração de 8 neurônios ocultos, única com nash positivo.

Figura 24 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacajus com TSM inicializadas em janeiro.

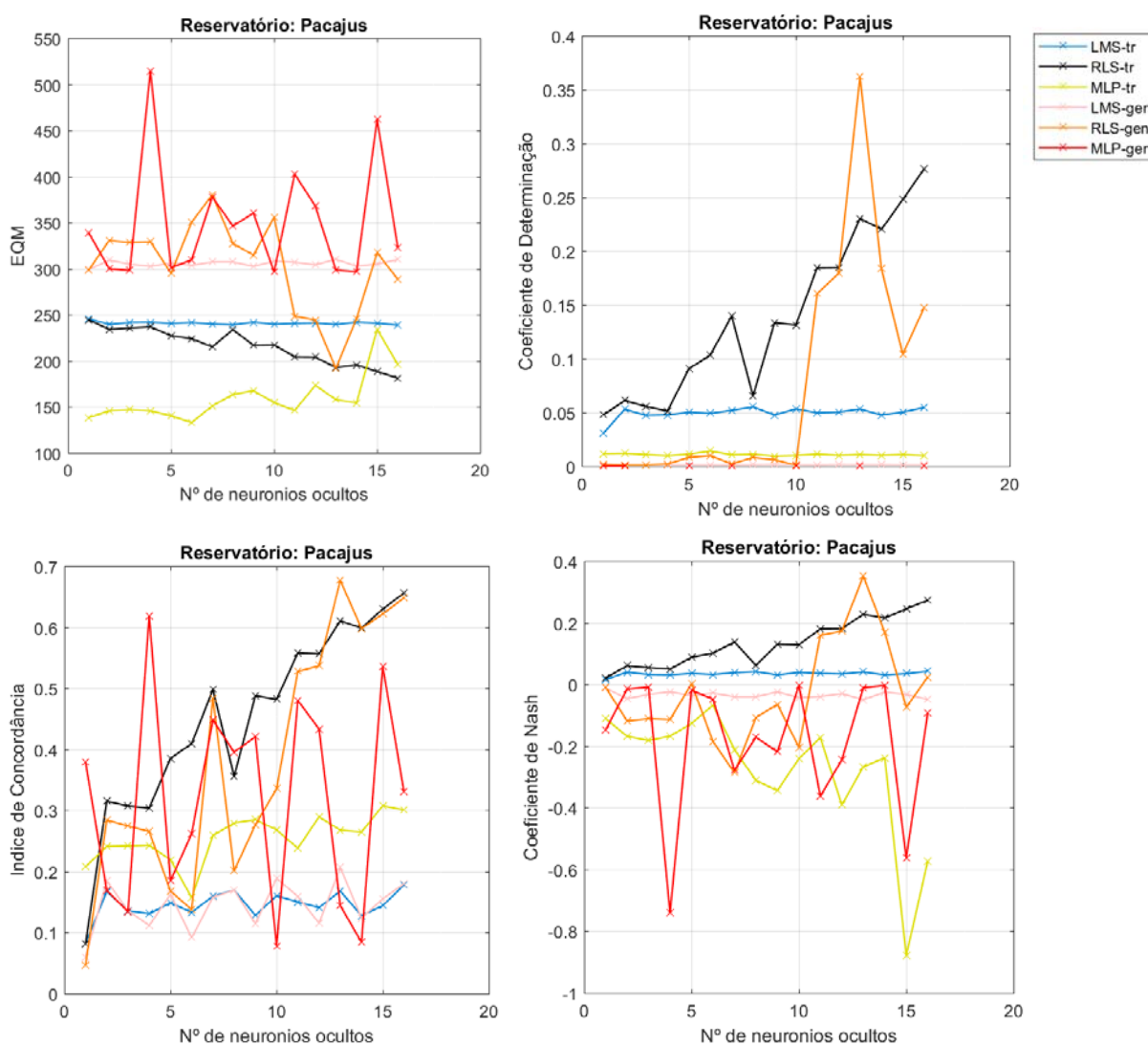


Fonte: Elaboração própria.

Para o reservatório Pacajus inicializado com condições de julho, Figura 25, no período de generalização as estruturas ELM-RLS e MLP mostram EQM de comportamento similar ate a parâmetros de 10 neurônios na cama oculta, a partir dai o

algoritmo RLS tende a ter valores menores, com destaque para a rede com 13 neurônios na camada oculta. Essa mesma configuração apresenta o maior de R^2 , o melhor valor de concordância com os dados observado (cerca de 68%) e o NS próximo a 0,4. O pior desempenho foi verificado na estrutura de rede MLP, que apesar de apresentar uma configuração onde o I_c pode chegar a valores maiores que 0,6, apresenta valores negativos para o NS para qualquer que seja o número de neurônios analisados.

Figura 25 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o reservatório Pacajus com TSM inicializadas em julho.

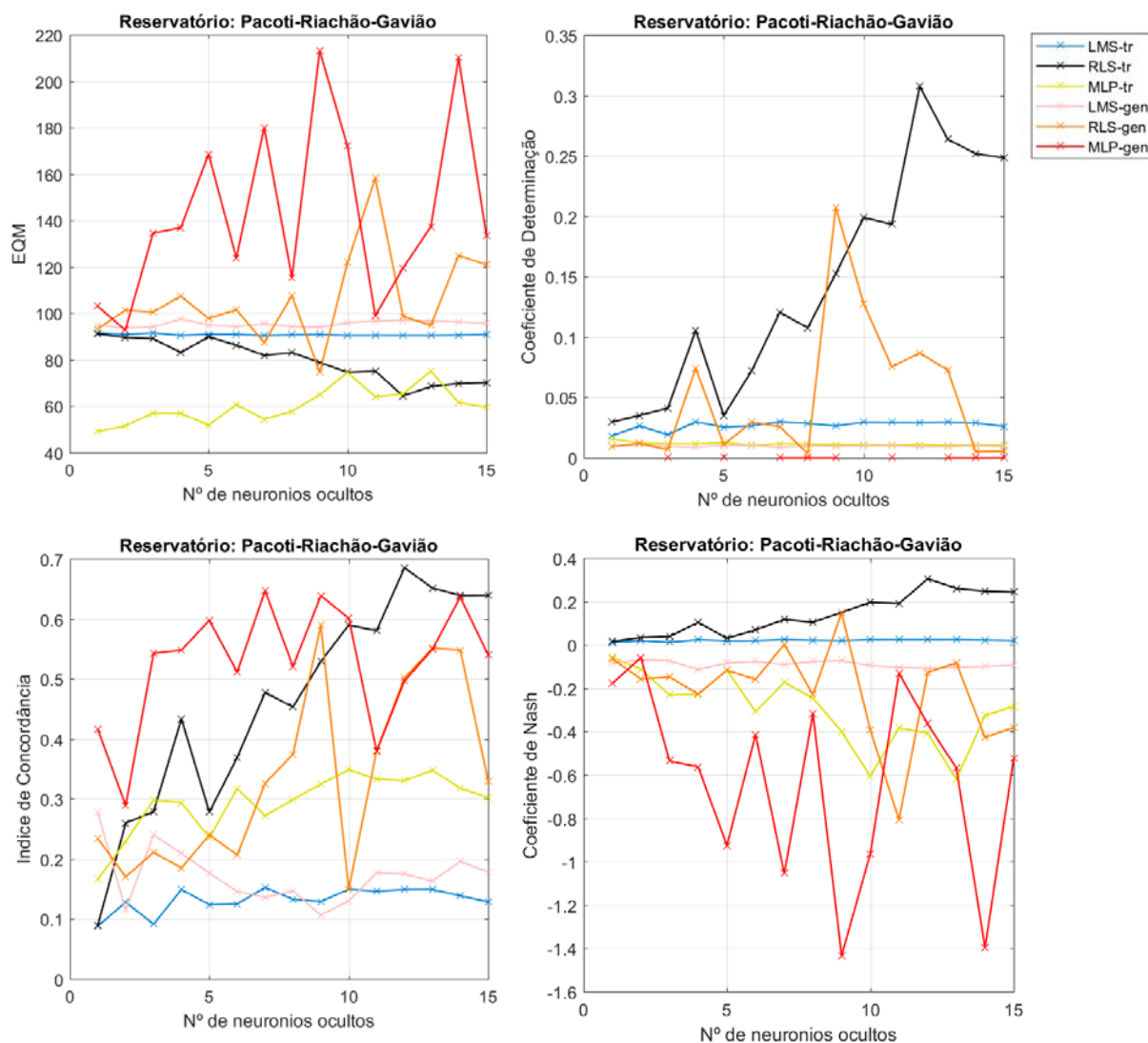


Fonte: Elaboração própria.

No conglomerado de reservatórios Pacoti-Riachão-Gavião inicializado com condições de janeiro, Figura 26, o pior desempenho durante período de generalização é o da

rede MLP apesar de apresentar I_c de classificados como moderados, o melhor desempenho durante esse mesmo período é do algoritmo de aprendizagem RLS, apesar de apresentar I_c menores que os da rede MLP, a configuração com 9 neurônios na camada oculta é que mais se destaca por EQM menor que $80 \text{ m}^3/\text{s}$, I_c com 0,6 e NS de aproximadamente 0,1.

Figura 26 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o conglomerado Pacoti-Riachão-Gavião com TSM inicializadas em janeiro.

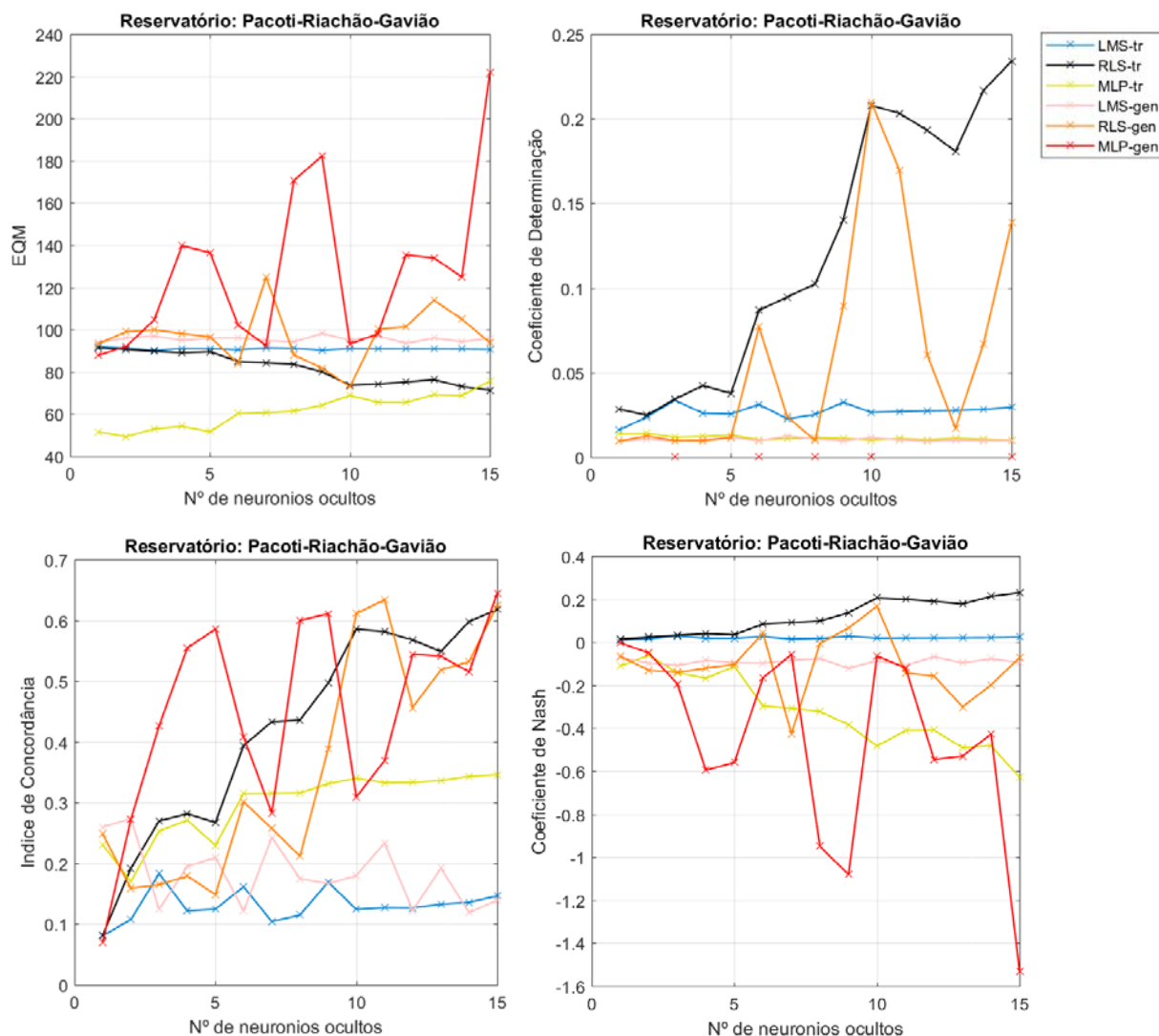


Fonte: Elaboração própria.

O conglomerado de reservatórios Pacoti-Riachão-Gavião inicializado com condições de julho, Figura 27, no período de validação o menor EQM foi o da regra ELM-RLS contendo 10 neurônio ocultos, o maior R^2 veio dessa mesma configuração, assim como o melhor NS Em relação ao I_c , a configuração que obteve o melhor índice foi com

11 neurônios ocultos, entretanto nos demais índices de desempenho a configuração contendo 10 neurônio na camada oculta foi melhor.

Figura 27 – Índices de desempenho das estruturas de redes neurais ELM-LMS, ELM-RLS e MLP com variações da camada oculta para o conglomerado Pacoti-Riachão-Gavião com TSM inicializadas em julho.



Fonte: Elaboração própria.

Com isso, pode-se afirmar que a rede ELM-RLS é a que tem a melhor performance tanto sobre a RHJ como sobre a RMF, sendo esta utilizada posteriormente para a realização de desagregação mensal das vazões do primeiro semestre de cada ano previsto, bem como o que será utilizado como posterior componente do ensemble dos modelos de previsão. A Tabela 21 mostra uma síntese das configurações da rede ELM-

RLS tidas como as mais promissoras ou de melhor desempenho para cada reservatório e período de inicialização.

Tabela 21 - Síntese do número de neurônios ocultos da rede ELM-RLS que tiveram melhores desempenhos estatísticos.

	Reservatórios				
	Banabuiú	Castanhão	Orós	Pacajus	Pacoti-Riachão-Gavião
Janeiro	11	11	16	8	9
Julho	13	17	22	13	10

Fonte: Elaboração própria.

5.2.3 Bootstrap da rede ELM-RLS e seu desempenho

Sabendo-se qual a RNA e as melhores configurações destas para cada reservatório do SJM, foram feitas previsões para o período de 1974 a 2013 da média do primeiro semestre de cada ano de maneira ininterrupta. Após a obtenção desses valores dividiu-se os dados de vazões obtidas em dois períodos semelhantes aos da previsão dinâmica no modo hindcast e forecast, ou seja, nos intervalos de anos de 1974 a 2000 e entre 2004 a 2013. Ambos os intervalos passaram por um processo de desagregação do valor médio, obtendo-se no final uma série decomposta com 162 meses e 60 meses para cada intervalo de anos, respectivamente.

De posse das séries desagregadas para cada reservatório, a técnica de bootstrap dos resíduos foi aplicada conforme explanada na seção referente a metodologia, sendo que o período de amostragem dos erros foi obtido no intervalo de maior quantidade de anos e depois reamostrados tanto para o período de maior intervalo de tempo a qual foi feito soma com a vazão mensal prevista de 1974 a 2000, como para o período de menor intervalo em que foi feito a soma da vazão mensal prevista de 2004 e a 2013. Trinta amostras bootstrap foram geradas para cada período de séries decompostas afim de se obter membros para realização do ensemble dos dados de vazões.

Com as amostras, para avaliar o desempenho do *bootstrap* da rede ELM-RLS calculou-se a razão de verossimilhança, a Tabela 22 mostra esse índice para duas funções de densidade, *biweight* e *gamma*, tanto para rede com condições de inicialização em janeiro como em julho.

Assim, tem-se que o bootstrap teve um desempenho classificado como satisfatório em quase todos os reservatórios, exceto para o Castanhão com condições de inicialização em julho, atingindo um índice de 0,01 para FDP *biweight* e 0,83 para a FDP *gamma*, ambas indicando que a informação advinda dessas amostras é equivalente a climatologia observada. Outro resultado interessante que pode ser extraído é que o bootstrap indicou um ganho da previsão em relação a média dos dados observados para os reservatórios de pequeno porte, principalmente para o conglomerado Pacoti-Riachão-Gavião, sendo mais satisfatório que as modelagens dinâmica e estatística antes utilizadas.

Da Tabela 22 ainda é possível extrair que a FDP *biweight* é a que melhor se ajusta ao bootstrap da vazão da maioria dos reservatórios, entretanto não muito distante da FDP *gamma*, indicando que ambas podem representar bem a distribuição dos dados de vazão.

Tabela 22 – Razão de verossimilhança das vazões previstas pela rede ELM-RLS associado a um bootstrap dos resíduos para os reservatórios do SJM.

Reservatório	Condições	FDP	
		<i>Biweight</i>	<i>Gamma</i>
Banabuiú	Janeiro	1,21	1,18
	Julho	1,05	1,09
Castanhão	Janeiro	1,11	1,15
	Julho	0,01	0,83
Orós	Janeiro	1,28	1,09
	Julho	1,19	1,20
Pacajus	Janeiro	1,05	1,03
	Julho	1,29	1,09
Pacoti-Riachão-Gavião	Janeiro	1,29	1,10
	Julho	1,06	1,04

Fonte: Elaboração própria

5.2.4 Avaliação do desempenho da previsão por *ensemble*

Há diversas configurações possíveis para se formar um superconjunto, pois como já visto os modelos aqui em análise possuem em geral dois modos de inicialização, sendo SMAP(PER) e SMAP(PRE) para o modelo dinâmico, kv1 e kv7 para o modelo estatístico, tais nomenclatura de sigla foram definidas anteriormente na seção 5.2.1. Em relação aos

dados de redes neurais, assim como a modelagem estatística têm inicialização em janeiro e em julho, e como o algoritmo de aprendizagem que se sobressaiu na análise de desempenho das redes neurais foi o RLS, definiu-se as siglas rls1 e rls7 para representação.

Para avaliação de desempenho do superconjunto foi feita uma agregação dos meses de janeiro a maio, para o intervalo de tempo de 2004 a 2012, através da mediana obtendo-se vazões medianas para cada ano, isso foi feito para os 30 membros das vazões “bootstrapadas” da previsão de estrutura de rede neural ELM-RLS, para os 30 membros da modelagem estatística e para os 10 membros da modelagem dinâmica acoplada que foram repetidos mais duas vezes cada membro no intuito de se totalizar 30 membros, fazendo com que a matriz de *ensemble* possua 90 membro equiprováveis.

As matrizes de *ensemble* equiprováveis (EQP) foram agrupadas conforme Tabela 23 que identifica quais configurações dos modelo foram adotadas, bem como a nomenclatura arbitrada para cada superconjunto formado. Em seguida, os índices de desempenhos foram calculados com base nessa matriz.

Tabela 23 – Configuração de agrupamento para realização de *pooled ensemble*.

Ensemble	Agrupamentos
Ens-EQP-1	SMAP(PER) + kv1 + rls1
Ens-EQP-2	SMAP(PRE) + kv1 + rls1
Ens-EQP-3	SMAP(PER) + kv7 + rls7
Ens-EQP-4	SMAP(PRE) + kv7 + rls7

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 28 a 32 mostram o desempenho dado por cada configuração de agrupamento do *pooled ensemble* de cada um os reservatórios que formam o SJM, e encontram-se no Apêndice D. A Figura 28 indica que para o reservatório Banabuiú, EQM em torno dos 17 m³/s na formação de todos ensemble equiprováveis, R² baixo por volta de 0,1, Ic estáveis atingindo aproximadamente 0,4 e NS baixos, mostrando que não houve uma grande melhora da previsão em relação aos modelos individualizados do agrupamento.

Para o Castanhão, Figura 29, o EQM não sofre grandes variações, com todas as configurações ficando com EQM entre 50 m³/s e 60 m³/s, o R² de melhor desempenho foi o do Ens-EQP-1, o Ic que mais se sobressaiu foi o do Ens-EQP-2 mostrando concordância dos dados previstos pelo superconjunto com mais de 60% dos dados observados, o Ens-EQP-2 foi também o que teve o maior NS, demonstrando uma melhora nas vazões prevista em relação aos modelos individuais desse agrupamento.

Na Figura 30, os índices de desempenho do reservatório Orós mostraram, EQM que praticamente não se diferencia em todas as configurações de agrupamento, o mesmo ocorre com o I_c com valores bem próximos a 0,65 indicando uma boa concordância com a mediana das vazões observadas. No R^2 destaca-se o Ens-EQP-1 explicando aproximadamente 50% dos dados de vazão observada. No NS não há grandes variações, porém o que mais se sobressaiu foi o Ens-EQP-4. O pooled ensemble para o Orós mostrou um ganho na qualidade de previsão para todas as configurações de agrupamento mostradas na Tabela 23.

As configurações de agrupamento para Pacajus, Figura 31, mostraram uma ligeira melhora do EQM, porém houve uma diminuição do R^2 em relação as configurações individuais de cada grupo. O NS mostrou que os grupos de pooled ensemble, em geral, foram melhores do que a modelagem dinâmica, porém a modelagem estatística e a RNA utilizada mostraram-se de melhor qualidade que a dos agrupamentos, isso provavelmente ocorre devido a modelagem dinâmica está puxando a destreza do agrupamento para baixo.

Para o conglomerado Pacoti-Riachão-Gavião, Figura 32, os agrupamentos apenas refletem o desempenho dos modelos individuais, ou seja, como a destreza de todos os modelos individuais foram baixas para essa região não haveria como o resultado do *ensemble* ser diferente.

Em relação, a razão de verossimilhança calculada para todos os ensembles a Tabela 24 mostra que em geral houve um aumento de ganho de previsão em relação das modelagens individuais, em que a LR atingiu valor máximo de 1,44 no reservatório Castanhão e o valor mínimo de 0,72 em reservatórios de pequeno porte.

Nota-se ainda que ensembles preferencialmente com condições de inicialização em janeiro, Ens-EQP-1 e Ens-EQP-2, tendem a ser melhores que os ensemble preferencialmente inicializados em julho, Ens-EQP-3 e Ens-EQP-4. Outra característica relacionada as FDP é que a biweight foi a que melhor se ajustou aos membros do ensemble em todos os reservatórios do SJM, entretanto a função gamma ainda indica bom ajuste aos membros, principalmente par região do Jaguaribe.

Tabela 24 – Razão de verossimilhança das vazões previstas pelo *pooled ensemble* para os reservatórios do SJM.

Reservatório	Ensemble	FDP	
		<i>Biweight</i>	<i>Gamma</i>
Banabuiú	Ens-EQP-1	1,22	1,05
	Ens-EQP-2	1,27	1,14
	Ens-EQP-3	1,22	1,13
	Ens-EQP-4	1,23	1,21
Castanhão	Ens-EQP-1	1,44	1,38
	Ens-EQP-2	1,40	1,35
	Ens-EQP-3	1,30	1,25
	Ens-EQP-4	1,26	1,13
Orós	Ens-EQP-1	1,38	1,21
	Ens-EQP-2	1,26	1,12
	Ens-EQP-3	1,36	1,20
	Ens-EQP-4	1,23	1,09
Pacajus	Ens-EQP-1	1,05	1,01
	Ens-EQP-2	1,08	0,92
	Ens-EQP-3	1,18	1,10
	Ens-EQP-4	1,16	1,02
Pacoti- Riachão- Gavião	Ens-EQP-1	1,05	0,72
	Ens-EQP-2	1,04	0,73
	Ens-EQP-3	0,99	0,73
	Ens-EQP-4	0,97	0,73

Fonte: Elaboração própria

5.2.5 Resultados da operação com vazões prevista pelo *pooled ensemble* e suas probabilidades de ocorrências futuras

Para realização da operação do reservatório utilizou-se as vazões previstas no *pooled ensemble* para a construção de 4 cenários de previsão, correspondentes aos *ensemble* apresentados na Tabela 25, sendo que os dois primeiros cenários associados aos Ens-EQP-1 e Ens-EQP-2 representam modelos com inicialização em janeiro e outros dois Ens-EQP-3 e Ens-EQP-4 representam os modelos com inicialização preferenciais em julho.

Apesar dos modelos inicializarem em janeiro e julho, optou-se por realizar uma operação com tomadas de decisão em janeiro e em junho devido as reuniões de acompanhamento da alocação e de alocação de água serem feitas nesses períodos,

respectivamente. Dessa forma os dados de previsão extraídos dos *ensembles* foram considerados de janeiro a maio de cada ano previsto, sendo atribuída vazões nulas para os demais meses do anos. Explana-se ainda que as vazões de entrada do modelo de operação são os membros das afluições previstas cada conjunto de *ensemble*. Com isso, realizou-se um operação tática do sistema com horizonte de tempo de 1 ano, sendo os resultados para alguns anos serem tratado a seguir e uma análise de operação continua com características idealizadas pode ser vista no Apêndice F.

Tabela 25 – Associação entre cenários de previsão e ensembles equiprováveis.

Cenário1	Ens-EQP-1
Cenário2	Ens-EQP-2
Cenário3	Ens-EQP-3
Cenário4	Ens-EQP-4

Fonte: Elaboração própria

Vale lembrar, que conforme a metodologia de operação descrita, os dados de vazão previstas para cada reservatório são agrupados por meio da soma como forma de representar a vazão *ensemble* prevista para os REJ e REM. Para inicialização da operação utilizou-se os valores de vazões observadas reais de 2004 a 2015 dos meses de janeiro e junho de todos os reservatórios em estudo. O valor observado agregado para o REJ e REM estão dispostos na Tabela 26 para os respectivos meses de tomada de decisão, este valores foram utilizados como ponto de partida dos cenários de previsão da operação do SJM.

A título de exemplificação da operação tática efetuada, a seguir será apresentada a sua evolução para o ano de 2004 para todos os cenários previamente estabelecidos.

A operação dos sistemas equivalentes para o Cenário 1 apresentaram evolução conforme a Figura 33 (REJ) e Figura 34 (REM). O reservatório Jaguaribe iniciou a operação com volume no estado de Emergência I ou NM 4 e tendeu a diminuir o grau de severidade da seca, com a maioria dos membros do ensemble passando para o estado de Alerta ou NM 3 a partir de abril 2004, entretanto sem alterar o nível de racionamento (Nrac) a qual o sistema estava sujeito, independe de se poder visualizar membros atingindo o estado de Pré-Alerta. Em junho, mês de tomada de decisão da operação, nota-se uma grande concentração de membros entre os NM 2 e 3, ficando a maioria dos membros no restante do ano agrupados no estado de Alerta, indicando um prognostico de possível melhora do estado de seca. A Tabela 27 mostra para tomada de

decisão em junho de 2004, a maior probabilidade de ocorrência é a do Nrac 3 com 34% de chance de acontecer, seguida do Nrac com 32%, caso os níveis de racionamento preestabelecidos sejam utilizados.

Tabela 26 – Volumes observados no intervalo 2004 a 2015 agregadas para os REJ e REM nos meses de tomada de decisão.

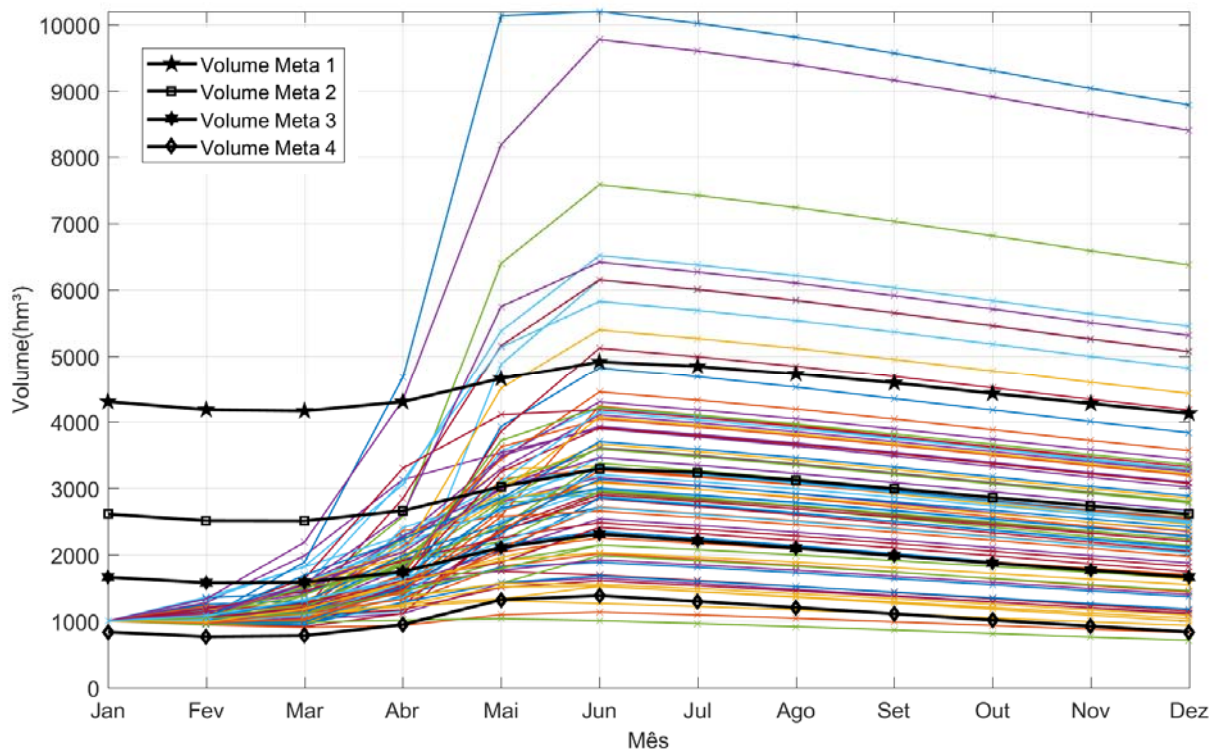
	Mês de decisão				
	Ano	Janeiro		Junho	
		REJ	REM	REJ	REM
2004	1003,03	486,91	8436,40	661,01	
2005	7123,08	302,90	7119,20	471,43	
2006	5809,63	295,54	6901,38	495,25	
2007	5827,37	329,76	6027,04	395,97	
2008	4955,08	213,21	9177,26	487,85	
2009	7764,58	308,83	9323,09	691,13	
2010	8053,80	527,48	7427,47	404,78	
2011	6306,97	248,02	8925,45	581,24	
2012	7704,96	395,15	7192,21	306,38	
2013	5696,05	241,58	5103,82	266,48	
2014	3864,47	221,46	3760,94	258,36	
2015	2521,20	200,87	1944,20	290,33	

Fonte: Elaboração própria

O reservatório Metropolitano iniciou a operação com um volume de 486,91 hm³ no NM 1, isto é, em estado de normalidade, e Nrac 1 indicando nenhum racionamento para RMF permanecendo assim até junho de 2004 quando o Nrac é alterado para 2 na grande maioria dos membros do ensemble, sendo que o NM de uma pequena parte dos membros já tinha passado para 2 em abril. Ressalta-se que a evolução da operação ao longo dos meses abril a junho mostra mudanças repentinas e abruptas no NM.

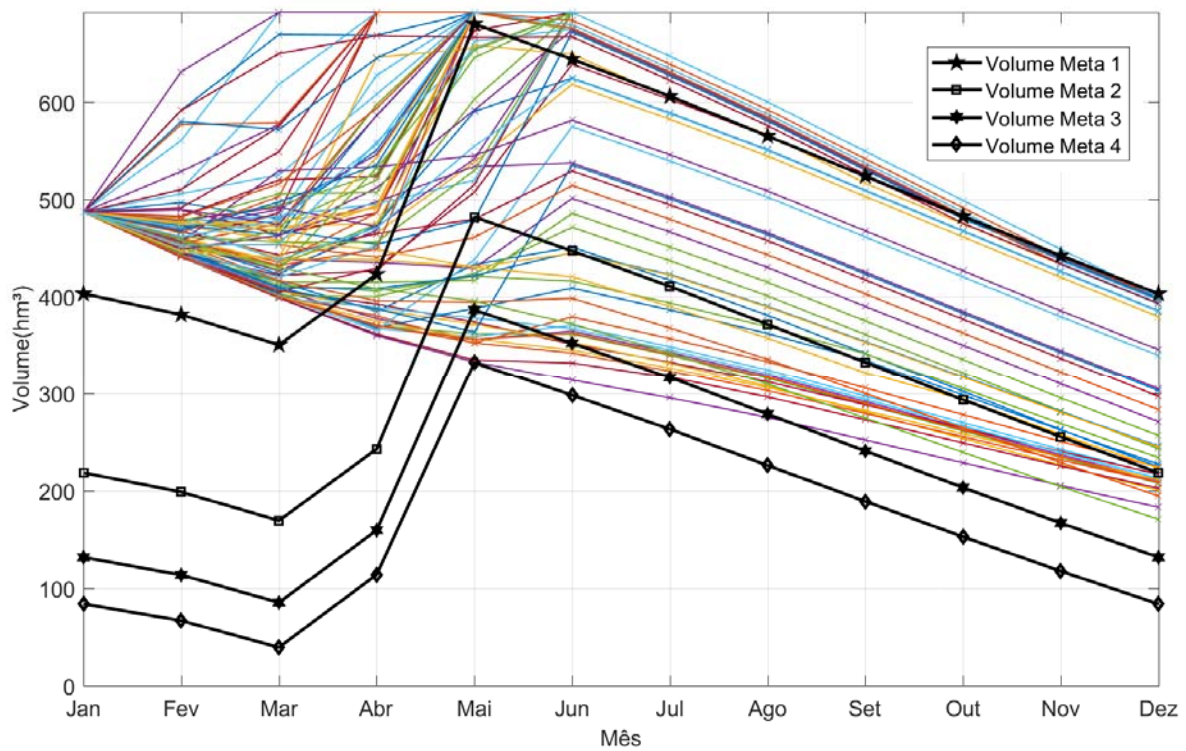
Ainda em relação a Figura 34, tem-se que o reservatório Metropolitano em 2004 tem uma maior probabilidade de permanecer no estado de normalidade, em que 52% dos membros do ensemble ocorreram nesse estado, permanecendo assim até final da operação visto que o Nrac só pode ser alterado nos meses de tomada de decisão.

Figura 33 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 1.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 1.

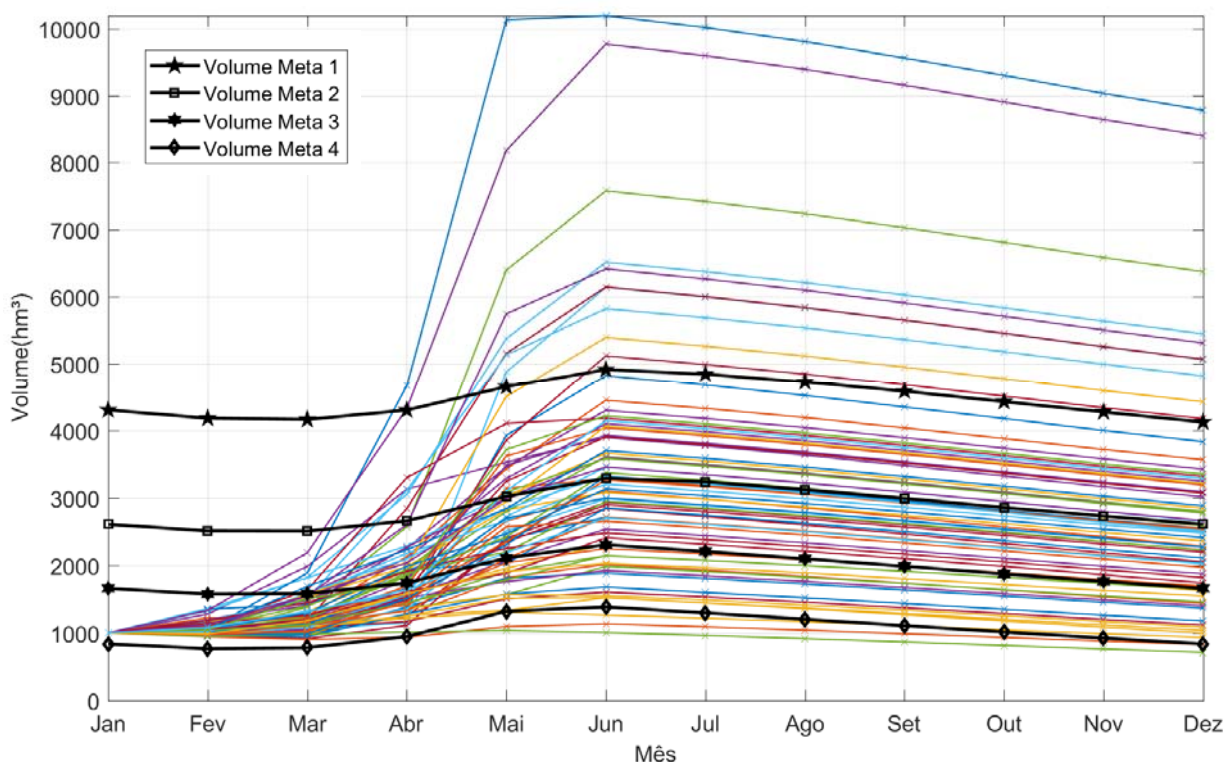


Fonte: Elaboração própria.

A operação para o Cenário 2 apresentou evolução conforme a Figura 35 (REJ) e Figura 36 (REM). O reservatório Jaguaribe, assim como no Cenário 1, iniciou a operação no NM 4 e com Nrac 4, o que indica uma redução de 40% da demanda para esse reservatório, a evolução da operação mostrou conforme Tabela 27 uma probabilidade ocorrência de 30% tanto para o estado de Alerta como para o estado de Pré-Alerta em relação ao Nrac, indicando que em junho houve uma distribuição dos membros aproximadamente iguais chegando a esse mês nesses estados de seca.

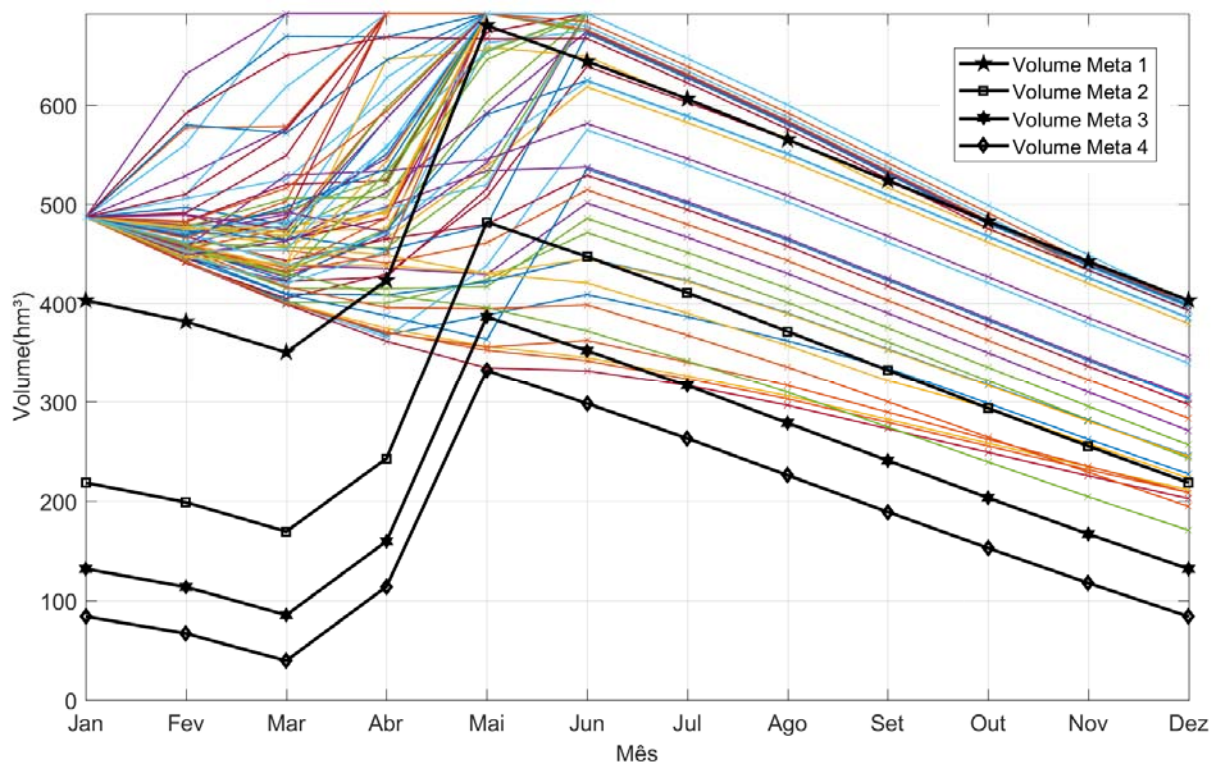
Para o reservatório Metropolitano, o Cenário 2 (Figura 36) apresentou membros até junho de 2004 variando entre aproximadamente 350 hm³ até cerca de 700 hm³, sendo que nesse período os membros do ensemble passaram maior parte em estado de normalidade, havendo alterações de estado de seca a partir de abril. De junho em diante, em virtude do período de estiagem, observa-se um decaimento de todos os membros até o final do ano, ocorrendo inclusive uma diminuição da dispersão dos membros em relação a junho.

Figura 35 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 2.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 2.

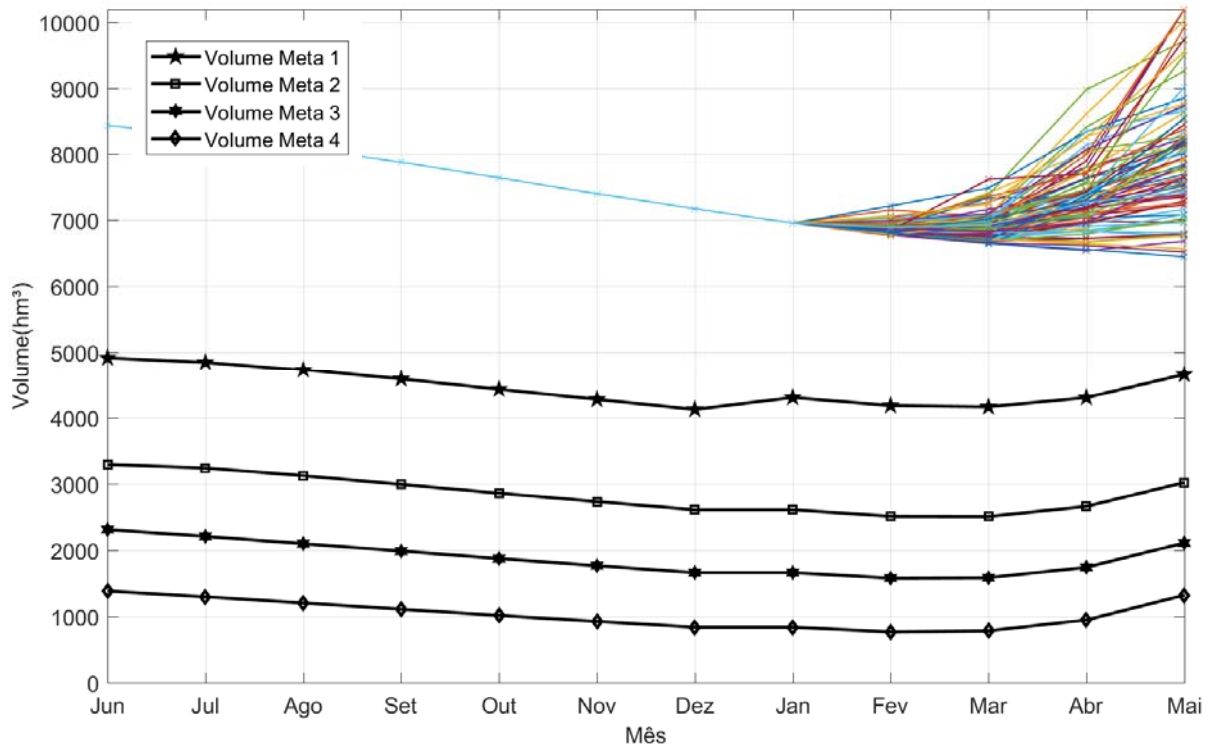


Fonte: Elaboração própria.

Para o Cenário 3, a operação apresentou evolução conforme a Figura 37 (REJ) e Figura 38 (REM), esse cenário tem intrínseco a ele uma condição mais otimista, pois ocorre logo após a quadra chuvosa (fevereiro a maio) em que o SJM se situa. O REJ iniciou a operação em junho de 2004 em estado de normalidade e conforme é possível observar permaneceu assim até o final da operação tática apesar da divergência dos membros em janeiro com a chegada da estação chuvosa.

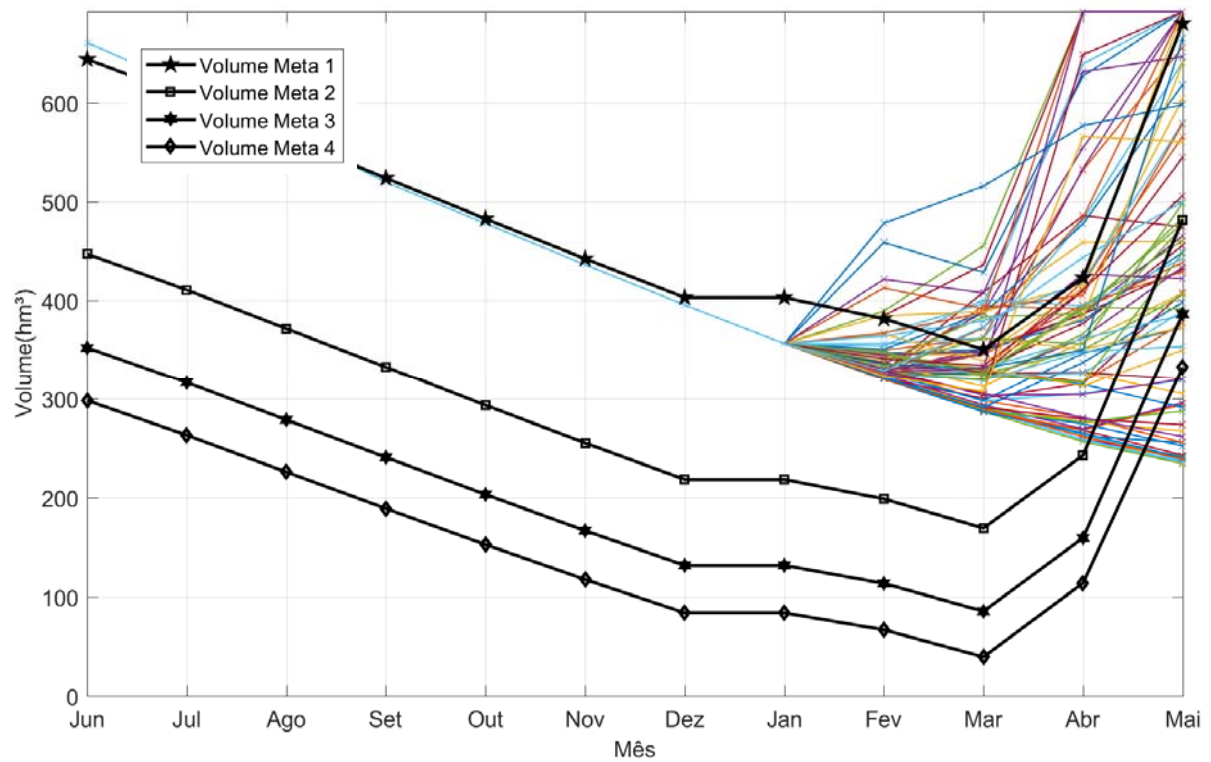
Para o reservatório Metropolitano, o Cenário 3 (Figura 38) iniciou em estado de normalidade, e devido a certeza da falta de chuva no segundo semestre do ano, em janeiro quando uma nova decisão foi tomada ocorreu o Nrac mudou de 1 para 2, continuando assim até o final da operação, apesar de alguns membros de viés mais seco chegarem a maio com NM 5 ou estado de Emergência 2. Ressaltasse que no Nrac 1 e 2 a porcentagem da demanda racionada é nula entretanto altera a transferência de água entre as bacias.

Figura 37 – Evolução da operação tática de 2004 do REJ para o Cenário 3.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 – Evolução da operação tática de 2004 do REM para o Cenário 3.



Fonte: Elaboração própria.

Para o Cenário 4, verificou-se para esse cenário que a evolução da operação tanto do REJ como do REM é praticamente igual ao do Cenário 3, havendo uma pequena alteração de estado de seca em apenas dois membros, a diferença é tão pequena dentro do espectro de membros que a mediana dos Cenários 3 e 4 são iguais. Com isso, as figuras representativas da evolução da operação tática não serão mostradas.

Os demais anos serão analisados através da Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29, para o Jaguaribe, que mostra as probabilidades de mudanças existentes entre os Nrac observado e o Nrac previsto, feitas a partir a contagem do número de membros que cai em cada categoria nos meses de tomada de decisão. As tabelas mostram as probabilidades tanto para os Cenários 1 e 2, que inicia em janeiro e vai até dezembro de um mesmo ano, como para os Cenários 3 e 4 que inicia em junho de um ano e vai até maio do ano seguinte. As tabelas citadas nesse parágrafo podem ser vistas no Apêndice E.

Na Tabela 27 e Tabela 28, verifica-se que de 2005 a 2012 o REJ não sofreu alteração de Nrac, provavelmente em virtude dos volumes reais observados nesse período indicarem uma boa capacidade de armazenamento. Em 2013, verificou-se um prognóstico de piora do Nrac pelo Cenário 3 e pelo Cenário 4. A Tabela 29 confirma o agravamento do estado de seca nos Cenários 3 e 4 ao iniciar o mês de junho de 2014 com Nrac igual a 2, tendendo esse estado permanecer até janeiro de 2015 conforme previsão.

A Tabela 29 ainda mostra que no REJ em 2014, para previsões iniciadas em janeiro, há uma maior probabilidade de permanecer no mesmo Nrac conforme Cenário 1 ou pode ter um a melhora passando do Nrac 2 para 1 com 58 % de chances de ocorrência. Em 2015 verifica-se, porém, que houve um agravamento da seca, passando para o Nrac 3, isso mostra a importância de se adotar medidas de aversão ao risco na operação e gerenciamento dos recursos hídricos.

Para o REM as análises serão feitas através da Tabela 30, da Tabela 31 e da Tabela 32, estas também poderão ser encontradas no Apêndice E. Pelas tabelas, averigua-se que de 2004 a 2008 houve um agravamento das seca indicado pelo Nrac que saiu de 1 para 3 conforme volumes monitorados em janeiro e em junho. Para os cenários de viés mais seco (Cenário 1 e Cenário 2), o prognóstico indica uma tendência de permanência ou de melhora da seca em praticamente todos os anos da operação prevista, exceto 2014 em que o ano monitorado inicia no Nrac 2 e a previsão aponta para uma maior chance de ocorrência para o Nrac 5, com 55% (Cenário 1) e 45% (Cenário 2) de probabilidade de

ocorrer, e em 2015 que inicia no Nrac 3 a previsão indica 57% e 50% para o Cenários 1 e Cenário 2 ,respectivamente, de ocorrer Nrac 5.

Em uma avaliação mais geral, é possível observar que diferentemente do REJ, o REM está mais propício a oscilações do grau de severidade de seca, sendo o Jaguaribe mais resiliente com uma boa capacidade de absorver os impactos da seca, auxiliando inclusive na recuperação do REM.

Os resultados obtidos nessa seção também serviram de base para o disparo de ações de mitigação de seca, que será visto na seção 5.5. Adicionalmente, uma análise das matrizes de transição para uma operação contínua idealizada pode ser vista no Apêndice G.

5.3 Análise de vulnerabilidades do sistema

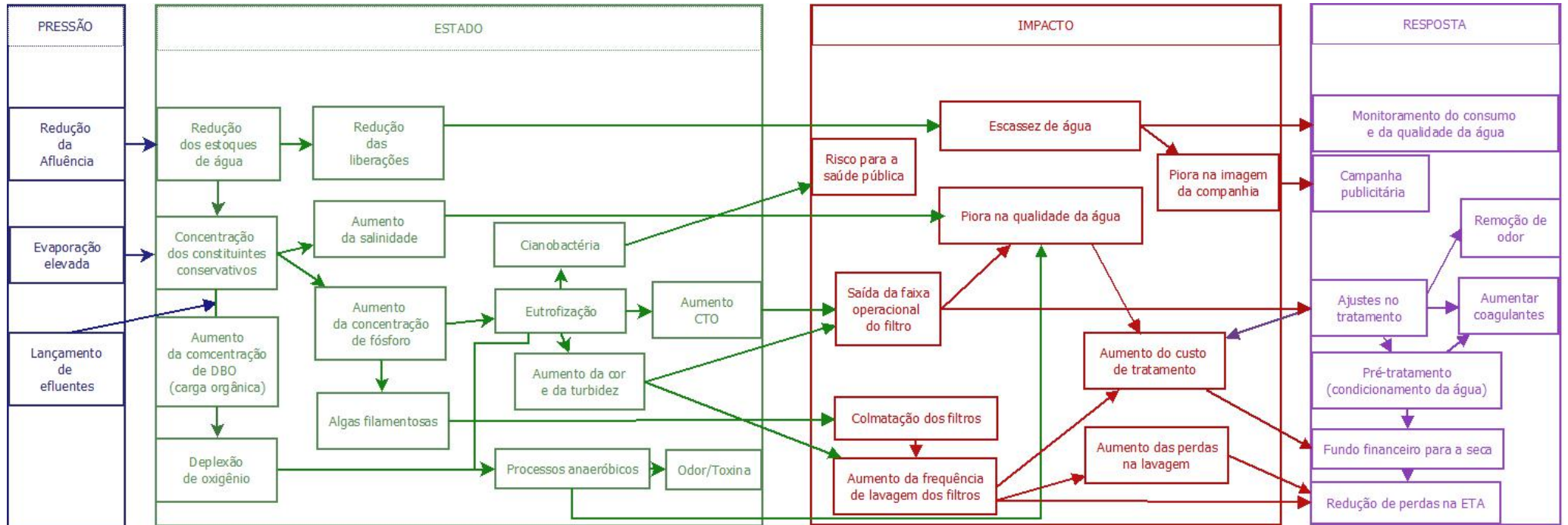
Aqui serão mostrados e discutidos os indicadores de cada uma das dimensões da metodologia PEIR para os elementos do sistema de abastecimento urbano de água da RMF, conforme supracitado. Para um melhor entendimento, os resultados foram sistematizados em diagramas que sintetizam os indicadores e a relação entre eles e as dimensões do método de análise de vulnerabilidade. Em seguida, é apresentada de forma mais detalhada um conjunto de ações de mitigação dos impactos da seca sobre o sistema de abastecimento urbano. Isso foi feito para poder se elencar inicialmente os conjuntos de medidas de mitigação que podem ser adotadas na ocorrência de uma seca.

5.3.1 Estudo de caso para o sistema de abastecimento Jaguaribe-Metroplolitana

5.3.1.1 Estação de Tratamento de Água (ETA)

O diagrama apresentado na Figura 47 mostra que em caso de escassez hídrica a redução da afluência, a evaporação elevada, característica da região semi-árida a qual está inserido o sistema, bem como o lançamento de efluentes, cada vez mais crescente em virtude da instalação de novos empreendimentos industriais na RMF (ADECE,2015), são considerados como indicadores de pressão, pois os mesmos podem ocasionar mudanças significativas no sistema de tratamento, podendo ocasionar prejuízos econômicos e sociais.

Figura 47 – Diagrama da metodologia PEIR aplicada a ETA.



Fonte: Elaboração própria

Essas pressões impostas sobre o sistema de abastecimento, podem conseqüentemente impor uma redução das liberações de água para alguns usuários, além disso há uma maior concentração de constituintes conservativos (cloro, fósforo), o que leva a um aumento de salinidade da água e ao surgimento de algas filamentosas. Há também aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), ocasionado por uma maior quantidade de matéria orgânica presente na água que em níveis extremos pode provocar a eutrofização de reservatórios, tendo ligação direta com o aumento de cianobactérias e o aumento de turbidez da água, levando a depleção do oxigênio dissolvido e conseqüentemente ao aumento de processos anaeróbicos e aparecimento de odor e toxinas.

Com isso, os possíveis impactos acometidos ao sistema de abastecimento seriam a escassez hídrica, que por sua vez pode levar a piora da imagem da companhia de abastecimento em relação a população abastecida, a piora da qualidade da água, a saída da faixa operacional dos filtros devido à diminuição da carreira de infiltração, o entupimento dos filtros ou colmatação, aumentando a frequência de lavagem dos mesmos e, conseqüentemente, aumentando os custos de tratamento, além do risco para a saúde pública, ocasionado devido a presença de cianobactérias e disseminação de toxinas na água.

A dimensão Resposta corresponde às ações propostas para atenuar os efeitos da seca. Em síntese, as respostas apontadas pelos gestores, planejadores e responsáveis pelo abastecimento de água da RMF foram o aumento do monitoramento do consumo e da qualidade da água como medida preventiva, a fim de inter-relacionar a disponibilidade hídrica com as peculiaridades socioeconômicas e geoambientais da região em estudo e avaliar o seu uso para consumo humano evitando a disseminação de doenças de veiculação hídrica, campanhas publicitárias com vistas a redução de consumo como medida de impacto social, no intuito de informar população sobre a situação dos recursos hídricos e sobre as medidas que a companhia de abastecimento estão tomando afim de eliminar a escassez hídrica, bem como incentivar a população a ter novos hábitos e condutas quanto ao consumo da água.

Outras ações apontadas foram ajustes no processo de tratamento e purificação de água, que são as principais formas de reduzir as contaminações na água, torna-la potável e aumentar a eficiência desses processos possibilitando a otimização da gestão da água e a redução de custos do sistema de abastecimento, criação de um fundo financeiro para a seca, pois em período de ocorrência de seca aumenta-se os gastos com gestão,

monitoramento e tratamento de água, e ainda redução de perdas aparentes e reais, que seriam as relacionadas com o consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) ou imprecisão dos hidrômetros e a vazamentos nas adutoras e redes de distribuição, respectivamente.

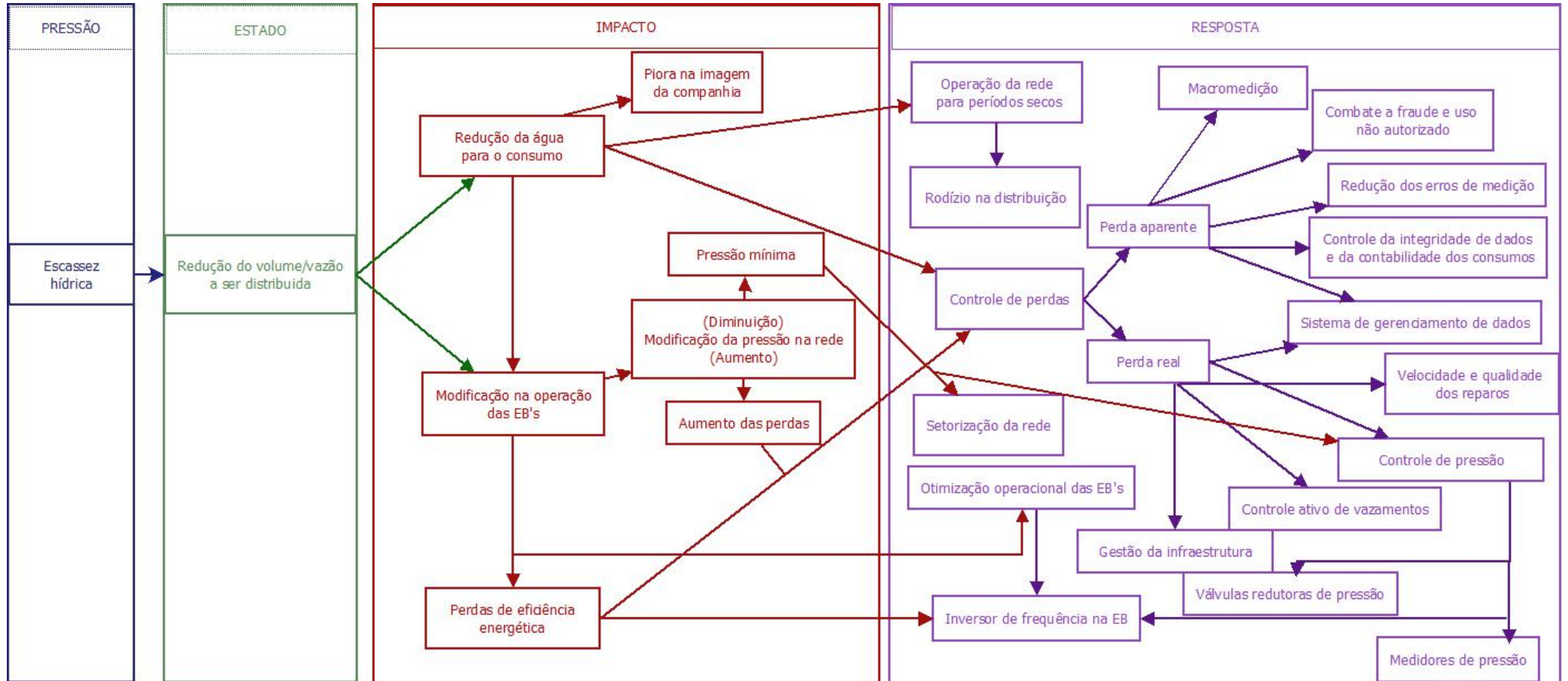
5.3.1.2 Reservação, adução e rede de distribuição

A Figura 48 mostra um diagrama dos indicadores de PEIR aplicado ao sistema de reservatórios, adutoras e distribuição de água da RMF. A primeira dimensão do PEIR, a Pressão, está associada a condições climáticas e/ou a externalidades geradas por atividades humanas, é a escassez hídrica, caracterizada como um indicador de pressão devido a possibilidade de causar alterações sociais, econômicas e até estruturais no sistema.

A segunda dimensão, o Estado, está relacionado com a situação do sistema de adução, reservação e distribuição, sendo que a escassez hídrica pode levar a um estado de redução da vazão e/ou do volume a ser distribuído, e isso pode acarretar em Impactos como a redução da água para consumo, que pode trazer prejuízos a imagem da companhia, a modificação na operação de estações de bombeamento (EB's), que por sua vez pode estar relacionada com a diminuição da pressão na rede de distribuição e com a perda de eficiência energética do sistema.

As ações apontadas pelos planejadores e gestores da área de recursos hídricos, no intuito de reduzir a vulnerabilidade desse conjunto, reservação, adução e rede de distribuição, estão sistematizadas na dimensão Resposta, diagramada na Figura 48. Em que, uma definição de operação específica dos reservatórios em períodos secos e a definição de rodízio de abastecimento de água em ocorrência de evento extremo de seca, podem ajuda na minimização da redução drástica de água em períodos muito prolongados de seca, um controle de perdas (aparentes e reais), buscando combater fraudes e uso não autorizado de água, procurando uma maior integridade dos dados e da contabilidade do consumo, combatendo rapidamente os vazamentos da rede de distribuição, também podem auxiliar a evitar a diminuição severa da oferta de água para os seus diferentes usos, bem como reduzir as perdas de eficiência energética.

Figura 48 – Diagrama da metodologia PEIR aplicada ao sistema de reservação, adução e rede de distribuição.



Fonte: Elaboração própria

Outras ações mitigadoras dos impactos causados pela escassez hídrica apontadas, foram a setorização da rede de distribuição, o controle de pressão da rede de distribuição e a otimização operacional das EB's, todas no intuito de minimizar as perdas energéticas do sistema em análise, podendo essa perda está associada a carga hidráulica ou mesmo a potência elétrica. Em adição, identificou-se a melhoria da gestão da infraestrutura como uma forma de diminuir também a perda real do sistema.

5.3.1.3 Consumo

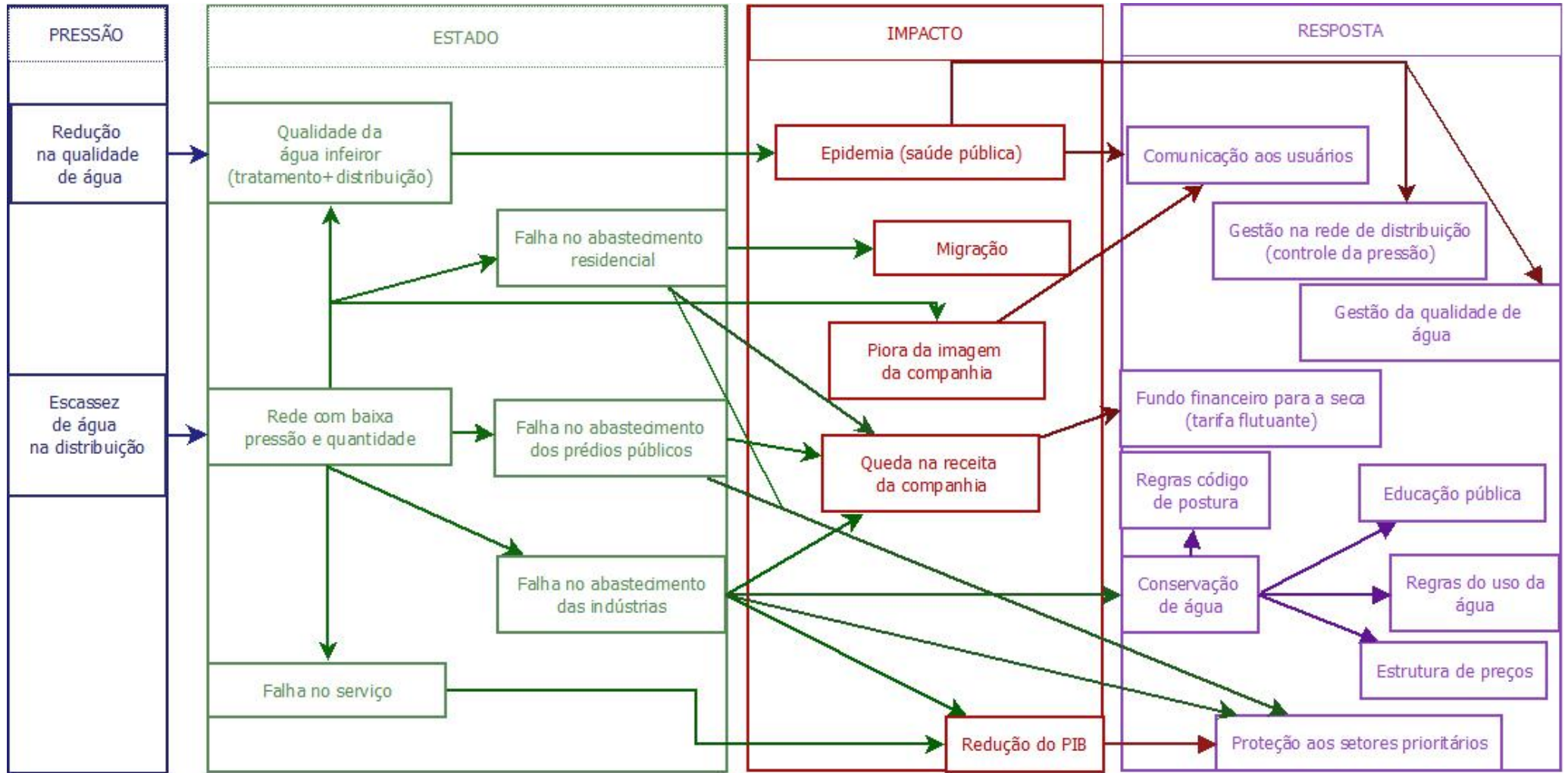
Aplicando a metodologia PEIR ao último elemento do sistema de abastecimento urbano, o consumo, tem-se como indicadores da primeira dimensão metodológica, a escassez de água na distribuição e a redução da qualidade de água, conforme Figura 49, que faz com que o consumidor muitas vezes pague mais caro para ter água em casa e receba uma água de pior qualidade, ou seja, essas variáveis podem ocasionar problemas econômicos e sociais.

Os indicadores da segunda dimensão metodológica apontados, foram a qualidade inferior da água tratada e distribuída, a rede de distribuição com baixa pressão e quantidade, a falha no abastecimento industrial, nos prédios públicos e residencial, mostrando a situação crítica a que o consumo urbano de água pode chegar.

Os possíveis impactos ocasionados pelas pressões a esse elemento do sistema, são a piora da qualidade da imagem da companhia perante a sociedade, a queda de receita da companhia de abastecimento, pois apesar de em período de escassez hídrica o preço da água se elevar o aumento com os gastos no tratamento e as falhas de abastecimento podem acarretar prejuízos financeiros, a redução do Produto Interno Bruto (PIB), visto que a falha de abastecimento de água em indústrias também leva a enorme perdas monetárias, a migração da população para regiões de maior disponibilidade hídrica, podendo causar uma alteração brusca do uso e ocupação do solo dessa região e da economia de toda uma população, e uma epidemia causada por doenças de veiculação hídrica, como amebíase, giardíase, febre tifoide, cólera, entre outras.

Na quarta dimensão metodológica, a Resposta, possíveis ações de mitigação das vulnerabilidades ou impactos em relação ao consumo hídrico, são a melhoria da comunicação ou informação aos usuários de água, o que auxilia na melhora da imagem da companhia de abastecimento e na difusão de informações relacionada a doenças associadas a baixa qualidade da água, a criação de um fundo de compensação financeira

Figura 49 – Diagrama da metodologia PEIR aplicada ao consumo hídrico.



Fonte: Elaboração própria

para a seca, que deve ser estabelecido em período de normalidade hídrica a fim de obter uma reserva monetária para em períodos de ocorrência de seca e o impacto financeiro não seja tão grande para o consumidor. Além disso, a proteção de setores públicos prioritários (energia, saneamento básico, saúde, agricultura), tentando prover um qualidade e quantidade minimamente razoável para o desenvolvimento socioeconômico da população, e a criação de uma política de conservação de água, focada na educação ou conscientização pública, enfatizando regras de uso eficiente da água, impelindo punições baseadas em uma estrutura de preços para quem desperdiça água ou em benefícios para quem consegue economizar, além de uma mudança no código de postura da RMF principalmente nos artigos e parágrafos associados ao uso de água, no intuito de induzir a um uso mais eficiente.

5.4 Estágios, gatilhos, metas de respostas e ações de preparação às secas

Conforme comentado na metodologia, para esse estudo foram delineados quatro estágios de severidade de seca, estes por sua vez estão associados aos volumes metas dos reservatórios equivalente do Jaguaribe e da Metropolitana, definidos como gatilhos por representar o resultado de todos os fatores que afetam a oferta hídrica como, precipitação, escoamento superficial e umidade do solo, bem como pelo abastecimento das cidades ser proveniente da água acumulada nos mananciais.

Nesse contexto, os reservatórios do sistema hídrico Jaguaribe-Metropolitana estavam em um determinado estado de seca quando o volume dele estiver acima ou abaixo de volumes metas calculados segundo regra de operação apresentada em Cid (2017). A Figura 10 mostrou os gatilhos de seca, associados aos volume metas dos reservatórios equivalentes, para cada estado de severidade e as metas de redução de consumo dos mesmos encontram-se na Tabela 6 .

As ações de resposta e mitigação à seca apontadas pelos grupos de trabalho são apresentadas para cada nível de seca, caracterizadas nas seções 5.4.1.1 até 5.4.1.5, estando associadas à sua descrição e ao responsável pela ação, conforme é possível observar nos Quadros 5 e 17, apresentados no Apêndice B.

5.4.1.1 Normal

Esse estado caracteriza-se pela realização de atividades rotineiras e ações de preparação para a fase de alerta do ponto de vista administrativo e operacional, uma vez que no estado normal podem ser identificados indícios da ocorrência de seca. As ações dessa fase podem ser observadas no Quadro 5.

5.4.1.2 Pré-Alerta

O pré-alerta de seca constitui-se da preparação administrativa e operacional do início de uma seca. Este nível não atinge nenhum agente social e se restringe as instituições de gestão e de abastecimento público.

As ações citadas pelos grupos de trabalho que devem ser tomadas nesta fase estão apresentadas nos Quadros 6 a 8. O monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos e a integração e funcionamento equilibrado das várias fontes de abastecimento foram as únicas ações apontadas conjuntamente pelos 03 grupos que responderam este item.

5.4.1.3 Alerta

O estado de Alerta é a fase de menor impacto econômico e social de uma seca propriamente dita. Nela são utilizadas principalmente as ações de comunicação, como a Informação ao consumidor e para a mídia e as ações de acompanhamento da situação do risco (Monitoramento intensivo de consumo e da qualidade de água e Avaliação periódica da situação e do desenvolvimento esperado). Nesta fase, os gestores tentam reduzir o consumo hídrico através de campanhas educacionais e buscam aumentar a disponibilidade hídrica de alguns usos em detrimento a outros. Todas as ações elencadas para este nível de seca estão expostas nos Quadros 9 a 11.

5.4.1.4 Emergência I

A seca severa ou estado de Emergência I pode acarretar situações críticas de escassez de água nas cidades. Ela impactará a sociedade, o ambiente e a economia por isso, deve ser implementadas limitações para o uso da água com o intuito de reduzir o

consumo de todos os setores econômicos e sociais e deve ser realizado o monitoramento do consumo e da qualidade de água. Em sistemas bem concebidos, esta fase só ocorre quando existe episódios de aumento da severidade do clima. As ações consideradas relevantes para a preparação e mitigação desta fase de seca estão apresentadas nos Quadros 12 a 14.

5.4.1.5 Emergência II

A estado de Emergência II é a situação mais grave de seca, denominado por vezes de seca extrema, e que pode gerar escassez hídrica generalizada. Ela gera impactos sociais e econômicos de longo alcance e os gestores devem realizar racionamentos com a vistas a garantir volumes de água que atendem as necessidades básicas da população. Assim, esta fase tem como ênfase a limitação e o monitoramento do consumo de água e o monitoramento da qualidade de água. As ações de preparação para esta fase apontadas pelos grupos estão expostas no Quadros 15.a 17.

5.5 Aplicação do Sistema de Gerenciamento de Seca como uma ferramenta proativa para o planejamento da seca da Região Metropolitana de Fortaleza

Aqui será apresentada uma demonstração de como as ferramentas desenvolvidas nesta tese pode auxiliar no planejamento da seca, se utilizando de uma de uma visão de gerenciamento de risco.

Conhecendo-se o volume atual do SJM, os cenários de operação do sistema e suas probabilidades de alteração de estados de seca (apresentadas na seção 5.2). Sabendo-se previamente as pressões que atuam sobre o sistema de abastecimento e os impactos por elas causados, ou seja, as vulnerabilidades a que o sistema esta susceptível (apresentadas na seção 5.3) e de posse das ações de mitigação e resposta das seca elaboradas em conjunto com um grupo de atores do sistema hídrico (apresentadas na seção 5.4 e no Apêndice B) e seguindo a matriz de planejamento de aversão ao risco (apresentada na Tabela 7), a seguir será mostrado, a título ilustrativo, o funcionamento integrado de todos os componentes do Sistema de Gerenciamento.

A título ilustrativo, o Cenário 1 foi adotado para RMF, tendo este um viés mais seco, e o ano escolhido foi o de 2015. Este cenário que inicializa em janeiro, mostrou que o ano iniciou em estado de Alerta, segundo os dados de monitoramento (ver Tabela

25 e Tabela 32), com Nrac 3 em que 10% da demanda da RMF deve sofrer racionamento a partir desse mês. Além do racionamento, os Quadros 9 a 11 (Apêndice B) mostram que medidas proativas devem ser adotadas para o estado de Alerta pelas instituições que gerenciam os recursos hídricos.

Baseado no monitoramento, as instituições devem realizar as ações de prioridade 1, consideradas “necessárias” para esse estado de seca. Por exemplo, segundo a classe de medidas de monitoramento e preventivas (Quadro 9) a CAGECE e a COGERH devem avaliar a disponibilidade hídrica quantitativamente e qualitativamente para o consumo com base nas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais de cada localidade, segundo a classe de medidas de gestão e operação do Sistema, as mesmas instituições citadas devem trabalhar para melhorar a eficiência da operação com redução de perdas aparentes e reais no sistema de água bruta e tratada, segundo a classe de medidas de impacto social, deve-se realizar campanhas educacionais no intuito de reduzir o consumo de água, segundo a classe de medidas de impacto ambiental, a SRH deve flexibilizar as exigências ambientais e reguladora a fim de agilizar obras de infraestrutura básica e de operação do sistema hídrico. Apesar das medidas citadas, outras estão na lista de medidas consideradas necessárias conforme Quadros 9 a 11.

Utilizando-se do SIAPS extrai-se, segundo Tabela 32, que para o Cenário 1 a uma probabilidade do Nrac ser alterado para 5 em junho, indicando um prognóstico do estado de Emergência II, isso faz com que a matriz de planejamento de aversão ao risco (Tabela 7) seja percorrida em linhas até o “vermelho escuro” indicando uma tendência de agravamento da seca atual e que medidas classificadas como “importantes” (prioridade 2) e “complementares” (prioridade 3) devem ser adotadas até junho quando haverá uma nova tomada de decisão.

Nesse contexto, segundo a classe de medidas de monitoramento e preventivas a SRH e a COGERH, devem fazer um levantamento de possíveis fontes alternativas de suprimento hídrico da população, segundo a classe de medidas de expansão e melhoria da infraestrutura e da disponibilidade hídrica a SRH e a COGERH, devem fazer uma avaliação da situação e do desenvolvimento das ações estão gerando as respostas desejadas, segundo a classe de medidas de impacto ambiental, a CAGECE deve reutilizar a água de lavagem dos filtros como forma de reduzir o desperdício de água. Estas são apenas alguns exemplos das medidas que devem ser tomadas com base no cenário prognosticado, tais medidas devem continuarem a serem realizadas até que o monitoramento, nos meses de tomada de decisão, indique uma diminuição do grau de

severidade da seca. O caso desse prognóstico indica um grau de severidade de seca muito elevado, indicando que além das medidas apontadas no plano, os planejadores e gestores do sistema de abastecimento da RMF devem começar a se preparar para o próximo estado de seca.

6 CONCLUSÕES

Essa tese foi trabalhada sob um sistema de gerenciamento de seca fundamentado em três pilares de preparação para secas, o primeiro pilar está associado a um Sistema de Informação e Alerta Precoce de Seca (SIAPS) principal foco desse estudo, que contempla o monitoramento e a previsão sazonal de variáveis meteorológicas, hidrológicas e índices de seca, sendo este capaz de fornecer suporte para, o segundo pilar que trata da identificação de impactos e vulnerabilidades e para o terceiro pilar associado ao planejamento adaptativo de ações de mitigação, preparação e resposta para o SJM.

O SIAPS foi construído em três blocos, no primeiro bloco foi feita uma análise de séries históricas de dados de precipitação, vazão e volume. A análise feita tanto por métodos quantitativos como qualitativo, concluiu que o volume é o tipo de indicador mais apropriado para o estudo de seca à qual impacta na acumulação de água armazenada para múltiplos usos de um hidrossistema. Através dessa variável e de índices como NM (Nível Meta) e Nrac (Nível de racionamento) foi possível identificar o estado de seca histórico, atual e futuro de SJM podendo-se classificar o grau de severidade da mesma. Ainda no bloco de monitoramento do sistema definiu-se volumes metas que acompanham a variabilidade climática sazonal como gatilhos tanto para operação do SJM como para o disparo de ações proativas de seca.

No segundo bloco do SIAPS foram realizadas previsões de afluências por 3 métodos diferentes: o da modelagem dinâmica acoplada ao modelo hidrológico, definido pelo par RSM97-SMAP, o método semi-paramétrico de reamostragem de vazões (k-vizinhos e pela técnica de RNA usando três estruturas de rede ELM-LMS, ELM-RLS e MLP. Uma análise de desempenho desses métodos em cada reservatório que constitui o REJ e o REM foi realizada, chegando-se primeiramente a conclusão que o método estatístico representado pelo modelo k-vizinhos tende a ter um melhor desempenho que a modelagem dinâmica acoplada principalmente os com inicialização em janeiro, em seguida feita a análise de performance das redes neurais sendo a rede ELM-RLS, que se utiliza de um algoritmo de mínimo quadrados recursivos para a minimização do erro quadrático médio, caracterizada como a melhor entre as estruturas de rede RNA não-recorrentes.

Apesar da baixa destreza de alguns modelos, nenhum método de previsão foi descartado e no intuito de se aumentar a qualidade da previsão para os reservatórios do

SJM, os resultados das aflúências foram combinados formando uma única previsão. A combinação conjunta dos múltiplos modelos foi realizada formando-se 4 agrupamentos, sendo dois com componentes preferencialmente inicializados com condições de TSM de janeiro e dois com condições de TSM de julho.

Com o ensembles definidos, para o terceiro bloco do SIAPS, adaptou-se um modelo de operação de reservatórios capaz de receber as vazões previstas do ensemble e dado o volume atual do SJM prognosticar os NM e o Nrac que serviram como indicadores do estado de seca atual e futura. A operação com salva-guarda foi realizada no intervalo de anos de 2004 a 2015 para o REJ e REM com inicialização em janeiro e em junho, sendo os períodos de tomada de decisão esses mesmos meses. A simulação realizada para 4 cenários associados aos 4 agrupamentos de ensemble equiprováveis levaram primeiramente a conclusão que, embora o NM seja um bom indicador de estado do reservatório o Nrac mostrou-se mais indicado a operação do reservatório pois foi imposto a esse índice uma característica de aversão ao risco, em que ele só poderia sofrer alteração no meses de tomada de decisão após olhar o estado de seca “atual” em que os reservatórios se encontram. Baseado no Nrac, foram calculados matrizes de probabilidade de transição entre os estados de seca que permitiram chegar a conclusão de que se adotadas a regra de operação do definidas para o SJM (fração de racionamento da demanda e transferência de água entre as duas bacias) com os cenários de vazões previstas, o Jaguaribe tem uma maior tendência de recuperação dos estados de seca mais críticos, e a bacia Metropolitana tem um maior risco de ocorrência futura de estados de seca mais severos.

Com a avaliação integrada entre os estados de seca atual e futuros finalizada, seguiu-se para o segundo pilar do sistema de gerenciamento de seca, que busca fazer uma avaliação das vulnerabilidades e dos impactos sofridos pelo sistema hídrico no intuito de identificar grau de suscetibilidade que a região abastecida pelo SJM tem em relação a uma seca e gerar informações para elaboração de respostas e/ou estratégias de ação contra a seca. As metodologias do *brainstorm* e da técnica Pressão-Estado-Impacto-Resposta foram aplicadas sobre elementos da matriz de abastecimento hídrico do SJM. O elementos analisados foram a ETA, o sistema de reservação-adição-distribuição e o consumo.

Para ETA concluiu-se que as maiores pressões sobre o sistema é a baixa aflúência, a evaporação elevada e o lançamento de efluentes que podem levar ao aumento dos custos de tratamento da água e risco à saúde pública, como estratégia de resposta, gestores e planejadores apontaram monitoramento do consumo e da qualidade da água

como medida preventiva, incentivo à redução do consumo e ajustes no processos de tratamento e purificação da água.

Para o sistema de reservação-adição-distribuição, chegou-se a conclusão de que a escassez hídrica é a variável que pode causar pressões sociais, econômicas e estruturais, podendo levar a um estado de redução de vazão e volumes distribuídos que pode acarretar na redução da água para consumo, da metodologia extraiu-se como principais estratégia de resposta a idéia de definição de uma regra de operação específica para períodos secos e um controle de perdas aparentes e reais do sistema.

Para o consumo hídrico, concluiu-se que a escassez de água e a sua redução de qualidade são as pressões que mais impactam esse elemento do sistema de abastecimento, tendendo a ocasionar queda de receita e piora da qualidade da imagem da companhia de abastecimento perante a sociedade, outro impacto relevante foi a migração da população para regiões de maior disponibilidade hídrica, como estratégia de mitigação desses impactos e vulnerabilidades apontou-se a melhoria da comunicação com os usuários de água, a criação de um fundo de compensação financeira e a criação de uma política de conservação da água.

O terceiro pilar do sistema de gerenciamento de seca está associado a tomada de decisão sobre estratégias e ações que deveram ser operacionalizadas sobre o SJM a fim de reduzir as vulnerabilidades do sistema. Essa tomada de decisão se caracteriza como um planejamento evolutivo e adaptativo, que devem se basear em uma visão de gerenciamento de risco. Para auxiliar nesse planejamento foram estabelecidos quatros estágios de severidade de seca (Pré Alerta, Alerta, Emergência I e Emergência II) e um estado de normalidade associados aos volumes do REJ e REM que servem como gatilhos para o disparo de ações de mitigação e resposta às secas.

Tais ações foram amplamente discutidas com gestores, planejadores e responsáveis pelo SJM e em seguida caracterizadas em 10 classes que vão desde de medidas de gestão e operação do sistema a medidas de caráter institucional, legal e normativa. Essas ações pensadas para cada estado de severidade da seca e priorizadas por uma classificação de medidas “Necessárias”, “Importantes” e “Complementares”. Conclui-se que para um melhor aproveitamento das ações definidas estas devem seguir uma matriz de planejamento com critérios de aversão ao risco que integra o estado atual e o prognóstico de afluências, de modo que se a previsão apontar uma melhoria na severidade da seca e o monitoramento não mostrar tal melhora, as ações de mitigação devem permanecer baseadas no estado de seca identificado pelo monitoramento, se o

prognóstico mostrar uma piora as ações devem ser intensificadas e dependendo do grau de severidade previsto ações do estado de seca seguinte podem começar a ser preparadas.

Como conclusão do último objetivo proposto nessa tese, tem-se que a metodologia de elaboração de um plano de seca deve se basear em uma visão de gerenciamento de risco e seus processos de planejamento devem ser contínuos, ou seja, o planejamento não termina com a elaboração de um documento, devendo este planejamento ser evolutivo estando em constante revisão e atualização. Em relação a estratégia de desenvolvimento do plano tem-se que este pode se dividir em três fases (Diagnóstico, Planejamento e Execução) e ser construído em 8 etapas metodológicas definidas por: Descrição do Hidrossistema; Sistema de Informação e Alerta Precoce; Avaliação de Impactos e Vulnerabilidades; Estratégias de Preparação, Mitigação e Resposta; Estados e Gatilhos de Seca; Plano de Ações de Preparação, Mitigação e Resposta; Implementação e Acompanhamento; Revisão e atualização do Plano. Ressalta-se que o processo de construção do plano deve sempre ser feito de forma participativa, reconhecendo a relevância dos atores do sistema hídrico e dos significados das suas ações e decisões, o que proporciona um ganho de credibilidade e confiabilidade desses atores com o modelo institucional de operacionalização do plano.

Salienta-se que esta tese teve como principal contribuição científica e tecnológica o desenvolvimento de uma ferramenta que permite a avaliação integrada do estado de seca atual e futuro de modo a se antecipar adversidades no sistema Jaguaribemropolitana e contribui para o desenvolvimento e implementação de políticas proativas de secas possibilitando, o aumento da resiliência hidroclimática, a melhoria na gestão de secas e um melhor gerenciamento do recursos hídricos.

Algumas limitações identificadas no uso do SIAPS foram, a falta de dados observados de vazão afluente de qualidade e comprimentos adequados para uma boa robustez, o que levou a se usar dados de regionalização como se fossem dados observados, as áreas de bacias de pequeno porte acarretaram em uma diminuição da destreza da previsão, principalmente no método de modelagem dinâmica acoplada, mostrando a necessidade de melhorias nessa técnica de previsão. Em relação ao SGS, em uma visão mais ampla, tem-se que as principais restrições para uma futura operacionalização são a falta de um arcabouço institucional que propicie o fortalecimento e a confiabilidade de um plano proativo de seca, fazendo com que o maior desafio para implementação desse sistema seja garantir que a informação extraídas tenham credibilidade com os tomadores de decisões, possibilitando que hajam antecipadamente,

uma maneira de superar esse desafio é incluir os mesmos no processo de elaboração, avaliação e atualização do plano proativo de seca.

Recomenda-se como complemento que outros estudos que sigam essa linha de pesquisa, desenvolvam ferramentas capaz de quantificar o impacto econômico e social da antecipação de adversidades climáticas de curto prazo, bem como a contribuição da realização das ações de preparação, mitigação e resposta sobre a diminuição da severidade de seca sobre uma região.

REFERÊNCIAS

ABARES. **Drought in Australia: Context, policy and management**, CC BY 3.0. Report to Client, March 2012.

ABHISHEK, K.; SINGH, M. P.; GHOSH, S.; ANAND, A. Weather forecasting model using Artificial Neural Network. **Procedia Technology**, v. 4, p. 311-318, 2012.

AKEH, L.E.; NNOLI, N.; GBUYIRO, S.; IKEHUA, F.; OGUNBO, S. Meteorological Early Warning Systems (EWS) for Drought Preparedness and Drought Management in Nigeria. In: Donald A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar and Deborah A. Wood (1st ed.). **Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management**. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal, 5-7 September 2000. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

ALBUQUERQUE, T. M. A. **Estudo dos processos de gestão de seca: Aplicação no Estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 425f., 2010.

ALEXANDRE, A. M. B. **Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2012.

ALVES, J. M. B.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; SILVA, E. M.; SANTOS, A. C. S.; BARBOSA, H. A.; MELCIADES, W. L. B.; MONCUNNIL, D. F. Um estudo inter-comparativo de previsão sazonal estatística-dinâmica de precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.3, p. 354-372, 2007.

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B. Movimento vertical e índices atmosféricos associados às células de Hadley e Walker em anos de contrastes climáticos: Relação com chuvas do Setor Norte do Nordeste do Brasil – SNNEB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, 15-36, 2005.

ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B. O potencial do acoplamento dinâmico intrasazonal de precipitação-vazão-operação de reservatórios no Nordeste do Brasil. In: Servain J.; Campos, J. N. B.; Martins, E. S.P. R.; Reis Junior, D. S. (1. ed.). **Clima do Atlântico Tropical e impactos sobre o Nordeste (CATIN)**, p. 278-301, 2010.

AMANAJÁS, J. C. **Uso do método de contingência para análise da eficácia de previsão da precipitação pluviométrica do modelo ETA para o município de Macapá-AP em 2007**. Monografia (Licenciatura Plena em Matemática) – Universidade Federal do Amapá, Amapá, 2008.

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M. T. Enso-Related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes, *International Journal of Climatology*. **Internacional Journal Climatology**, 25, p. 2017–2030, 2005.

ANDREU, J.; FERRER-POLO, J.; PÉREZ, M. A.; SOLERA, A. Decision Support System for Drought Planning and Management in the Jucar River Basin, Spain. In: **18th World IMACS / MODSIM Congress**, Cairns, Australia 13-17, July, 2009.

ARAÚJO, C. B. C. **Previsão de vazão para o açude Orós a partir de dados hidrometeorológicos utilizando perceptrons**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2013.

ARAÚJO, C. B. C.; DANTAS NETO, S. A.; SOUZA FILHO, F. A. Previsão de vazões para o açude Orós/Ce a partir de dados hidrometeorológicos utilizando perceptrons. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, 37 - 46, 2015. Doi:10.1590/0102-778620140048.

BARRA, T. S.; COSTA, J. N. M.; RAO, T. V. R.; SEYDIAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; DANTAS NETO, F.S. Caracterização climatológica da severidade das secas do estado do Ceará – Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.266-272, 2002.

BBC Research & Consulting. **Drought Management in the Texas Regional and State Water Planning Process**. Final Report, May 31, 2009.

BEZERRA, A. C. N.; PEZZI, L. P.; KAYANO, M. T. Esquema Estatístico de Combinação e Correção de Previsões Climáticas – ECCOCLIM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 347-359, 2008.

BLOCK, P. J.; SOUZA FILHO, F. A.; SUN, L.; KWON, H. A. Streamflow Forecasting Framework Using Multiple Climate and Hidrological Models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n.4, p. 828-843, 2009.

BORDI, K.; FRAEDRICH, K.; GERSTENGARBE, F. W.; WERNER, P. C.; SUTERA, A. Potential predictability of dry and wet periods: Sicily and Elbe-Basin (Germany). **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 77, pp. 125– 138, 2004. DOI: 10.1007/s00704-003-0029-0.

BORDIEU, Pierre, Razões práticas: sobre a teoria da ação. Campinas: Papirus, 1989.

BRASIL. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável: Território do Vale do Jaguaribe**. MDA/SDT/Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceará, 366p, 2011.

BUCHANAN-SMITH, M. Role of Early Warning Systems in Decision Making Processes. In: Donald A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar and Deborah A. Wood (1st ed.). **Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management**. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal, 5-7 September 2000. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Estudos Avançados**, v. 28, p. 65-88, 2014.

CARDOSO, G. B. B.; MARTINS, E. S. P. R.; SOUZA FILHO, F. A. Uso de Otimização/Simulação e Previsão de Afluências na Operação Tática dos Reservatórios

do Sistema Jaguaribe-Metropolitano – CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 11, n.4, Out/Dez, p. 175-186, 2006.

CASTRO, T. N. **Modelo De Previsão Sazonal De Chuva Para O Estado Do Ceará Baseado Em Redes Neurais Artificiais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHEN, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 25, p. 289-321, 1983.

CID, D. A. C.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; SILVA, S. M. O. Uso de simulação para definição de níveis metas de operação para o reservatório Jucazinho/PE. In: **Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2014.

CID, D. A. C. **Alocação intertemporal e múltiplos usuários: Estudo de caso do Sistema Jaguaribe-Metropolitano**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, 2017.

COGERH. Análises hidrológicas e operação de hidrossistema: Regularização de vazões. UFC/COGERH/FCPC: **Estudos Técnicos e Projetos para Requalificação das Ações de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará**, 2013.

COLORADO WATER CONSERVATION BOARD. **Municipal Drought Management Plan Guidance Document**. State of Colorado, 2010. 123p.

_____. **The Colorado Drought Mitigation and Response Plan August**. State of the Colorado, 2013. 736p.

CONFEDERACION HIDROGRAFICA DEL EBRO. **Plan especial de actuación em situaciones de sequía**. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2007.

CONFEDERACION HIDROGRAFICA DEL JUCAR. **Plan especial de alerta y eventual sequía**. Ministerio de Medio Ambiente, 2007.

COULIBALY, P.; ANCTIL, F.; BOBÉE, B. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. **Journal of Hydrology**, v. 230, p. 244-257, 2000.

CUBILLO, F.; IBÁÑEZ, J. C. Drought management in the urban water supply system of Canal de Isabel II. **Options Méditerranéennes**, Series B, No. 58, Chapter 21, pp. 407-415, 2007

CUNHA, R. L. A. **Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas**. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

DENVER WATER. **Drought Response Plan**. State of the Colorado: Denver, 2014. 22p.

DOMINGOS, S. I. S. **Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI)**. Tese (Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna) - Faculdade de Ciências, Lisboa, 53f., 2006.

DROB, D. P.; PICONE, J. M. Statistical performance measures of the HWM-93 and MSISE-90 empirical atmospheric models and the relation to infrasonic CTBT monitoring. In: **ANNUAL SEISMIC RESEARCH SYMPOSIUM**, New Orleans, Louisiana, USA. Anais... New Orleans, Louisiana, 2000.

ESTRELA, T.; FIDALGO, A.; PÉREZ, M. A. Droughts and the European water framework directive: Implications on Spanish river basin districts. In: Andreu J. et al. (1st ed.). **Drought Management and Planning for Water Resources**, CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, Chapter six, 169-191, 2006. ISBN 1-56670-672-6.

FACHINI, F. **Crise no setor elétrico brasileiro após a medida provisória nº 579**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Sócio Econômico, Curso de Graduação em Ciências Econômicas e Relações Internacionais, Florianópolis, 2015.

FARAJZADEH, J.; FARD, A. F.; LOFTI, S. Modeling of monthly rainfall and runoff of Urmia lake basin using "feed-forward neural network" and "time series analysis" model. **Water Resources and Industry**, n. 7-8, p. 38-48, 2014.

FERREIRA, N. J.; CHAN, C. S.; SATYAMURTI, P. Análise dos distúrbios ondulatório de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 6, Rio de Janeiro, p. 462-466, 1990.

FIGUEIREDO, K.; VELLASCO, M.; BARBOSA, C. R. H.; PACHECO, M. A. C.; CRUZ, A. V.; CONTRERAS, R. J.; SOUZA, R. C.; BARROS, M.; MARQUES, V. S. Modelo de Previsão de Vazão com Informação de Precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 69-82, 2007.

FOX, D.G. Judging air quality model performance – review of the Woods Hole workshop. In: **SYMPOSIUM ON TURBULENCE, DIFFUSION AND AIR POLLUTION**, 5., 1981. Atlanta, US. Annals... Atlanta: **American Meteorological Society**, p. 14-16, 1981.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, v. 29, p. 43-68, 2015.

GALVÃO, C. O.; NOBRE, P.; BRAGA, A. C. F. M.; OLIVEIRA, K. F.; MARQUES, R.; SILVA, S. R.; GOMES FILHO, M. F.; SANTOS, C. A. G.; LACERDA, F.; MONCUNILL, D. Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil. In: **Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Impact Assessment and Decision Making** (Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 295, 2005

GASPAR, L. **Seca no Nordeste brasileiro**. Pesquisa Escolar Online, Fundação Joaquim Nabuco, Recife. Disponível em: <<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/>>. Acesso em: 07 de julho de 2016.

GIDDENS, A. **O mundo na era da globalização**. Lisboa: Presença, 4. ed., 2000.

GOLEMBESKY, K.; SANKARASUBRAMANIAN, A.; DEVINENI, N. Improved drought management of falls Lake Reservoir: Role of multimodel streamflow forecasts in setting up restrictions. **Journal of Water Resources Planning and Management**, vol. 135, n. 3, pp. 188-197, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:3(188).

GOMES, L. F. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VALENCIA, M. J. S. Modelo baseado na técnica de redes neurais para previsão de vazões na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 5-15, 2010.

GONZÁLEZ, F. C.; MORCILLO, J. C. **Guía para la elaboración de planes de emergencia por sequía em sistemas de abastecimiento urbano**. Ministerio de Medio Ambiente: Asociación Española de abastecimientos de agua y saneamiento. 83p. 2007.

GTDN. Uma política de desenvolvimento econômico para o Nordeste. Recife: Assessoria Técnica, 2. ed., 1967.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. P. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HAGEDORN, R.; Doblas-Reyes, F.J.; Palmer, T.N. The Rationale Behind the Success of Multi-Model Ensembles in Seasonal Forecasting. Part I: Basic Concept. **Tellus 57A**, p. 219-233, 2005.

HALLEGATE, S. A cost effective solution to reduce disaster losses in developing countries: Hydro-meteorological Services, Early Warning and Evaluation. **Policy Research Working Paper 6058**. World Bank, Washington DC, USA, 2012.

HARRINGTON, J. Y. **The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus**. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Colorado, 1997.

HASHIMOTO, T.; LOUCKS, D. P. and STEDINGER, J. Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. **Water Resources Research** 18(1), 14–20, 1982.

HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, v. 3, 893-904, 1990.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. J.; WILHITE, D.A.; VANYARKHO, O. V. **Drought Monitoring The 1996 Drought Using The Standardized-Precipitation Index**. Bulletin American Meteorological Society, v. 80, n. 3, pp. 429-438, 1999.

HAYKIN, S. **Redes Neurais Artificiais: Princípios e práticas**. 2. ed., EDITORA BOOKMAN, PORTO ALEGRE, 2001.

HEIM JR., R. R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 8, pp. 1149-1165, 2002.

HORTA, E. G. **Aplicação de máquinas de aprendizado extremo ao problema de aprendizado ativo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2015.

IBGE. Censo Demográfico 2010. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Disponível em: <http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/1_Documentacao_Agregado_dos_Setores_2010_20150527.zip> Acesso em: 11.07.2016.

IBGE. PIB municipal 2005-2009. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Disponível em: <http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=ftp.ibge.gov.br/Pib_Municipios/2005_2009/banco_dados.zip> Acesso em: 11.07.2016.

IBGE. PIB municipal 2010-2013. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Disponível em: <http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=ftp.ibge.gov.br/Pib_Municipios/2010_2013/base/base_xls.zip> Acesso em: 11.07.2016.

IBGE. Produção da Pecuária Municipal. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Producao_da_Pecuaria_Municipal/2013/ppm2013.pdf> Acesso em: 13.12.2016.

JUANG, H.-M. H.; KANAMITSU, M. The NMC nested regional spectral model. **Monthly Weather Review**, v.122, p.3-26, 1994.

KANAMITSU, M.; ALPERT, J. C.; CAMPANA, K. A.; CAPLAN, P. M.; DEAVEN, D. G.; IREDELL, M.; KATZ, B.; PAN, H.-L.; SELA, J.; WHITE, G. H. Recent Changes Implemented into the Global Forecast System at NMC. **Weather and Forecasting**, 6(3), p.425-435, August 1991. DOI: 10.1175/1520-0434(1991)006<0425:RCIITG>2.0.CO;2

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 83(8), p. 1167–1180, 2002. DOI: 10.1175/1520-0477.

KIRANG LI. Drought Early Warning and Impact Assessment in China. In: Donald A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar and Deborah A. Wood (1st ed.). **Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management**. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal, 5-7 September 2000. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

KRISHNAMURTI, T.N.; KISHTAWAL, C.M.; ZHANG, Z.; LAROW, T.E.; BACHIOCHI, D.R.; WILLIFORD, C.E.; GADGIL, S.; SURENDRAN, S. Multimodel Ensemble Forecasts for Weather and Seasonal Climate. **Journal of Climate**, v. 13, p. 4196-4216, 2000.

LIMA, J. P. R.; ALVES, J. M. B. Downscaling dinâmico de precipitação com modelo hidrológico chuva-vazão. In: Servain J.; Campos, J. N. B.; Martins, E. S.P. R.; Reis Junior, D. S. (1. ed.). **Clima do Atlântico Tropical e impactos sobre o Nordeste (CATIN)**, p. 319-330, 2010.

LIMA, R. O. **Redes neurais artificiais para reconhecimento de faces: Uma análise comparativa do compromisso entre desempenho e custo computacional**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2010.

LIU, T.; TUNG, C.; CHEN, C.; CHEN, S. Establishing a Drought Warning System Based on Long-Lead Climate Forecasting. **Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management**, pp. 1-9, 2004. DOI: 10.1061/40737(2004)215.

LOHANI, V. K.; LOGANATHAN, G. V. An early warning system for drought management using the Palmer drought index. **Journal of the American Water resources Association**, vol. 33, n. 6, pp. 1375 -1386, 1997.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. A. Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado. In: **Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Fortaleza: [s.n.], p. 42-62, 1981.

LORENZO-LACRUZ, J.; VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; CUADRAT, J. M. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). **Journal of Hydrology**, 386, pp. 13–26, 2010.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.735-741, 2003.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R. The Pacific Decadal Oscillation. **Journal of Oceanography**, v. 58, p. 35–444, 2002.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. INPE/CRS, Santa Maria, 38 p., 2008.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XX**. Ministerio do Meio Ambiente, Brasília, 2006.

MARENGO, J. A.; CAVALCANTI, I. F. A.; SATYAMURTY, P.; TROSNIKOV, I.; NOBRE, C. A.; BONATTI, J. P.; CAMARGO, H.; SAMPAIO, G.; SANCHES, M. B.;

MANZI, A. O.; CASTRO, C. A. C.; D'ALMEIDA, C.; PEZZI, L. P.; CANDIDO, L. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 459–475, 2003. DOI 10.1007/s00382-003-0346-0.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. In: **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. Academia Brasileira de Ciência, pp. 1-13, 2017.

MARIA, P. H. S. Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicada) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza-CE, 2007.

MARTINS, E. S. P. R.; COELHO, C. A. S.; HAARSMA, R.; OTTO, F. E. L.; KING, A. D.; VAN OLDENBORGH, G. J.; KEW, S.; PHILIP, S.; VASCONCELOS JUNIOR, F. C.; CULLEN, H. A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast brasil hydrometeorological drought (2012-16). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, Issue 1, pp. 565-569, 2018. DOI 10.1175/BAMS-D-17-0102.1.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **8th Conference on Applied Climatology**. American Meteorological Society, Boston, pp. 179-184, 1993.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. In: **9th Conference on Applied Climatology**. American Meteorological Society, Boston, pp. 233-236, 1995.

MEDEIROS, C. N. Índice Municipal de Alerta (IMA): Um instrumento para orientações preventivas sobre as adversidades climáticas. **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE)**, Fortaleza, Ceará, 2015.

MEDICINO, G.; SENATORE, A.; VERSANCE, P. Water resources management in agriculture under drought and water shortage conditions: A case study in Southern Italy. **European Water**, v. 23/24, pp. 41-56, 2008.

MENEZES JUNIOR, J. M. P. **Redes neurais dinâmicas para predição e modelagem não linear de séries temporais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2006.

MENEZES JUNIOR, J. M. P. **Contribuições ao problema de predição recursiva de séries temporais univariadas usando redes neurais recorrentes**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2012.

MENEZES JUNIOR, J. M. P.; BARRETO, G. A. Long-term time series prediction with the NARX network: An empirical evaluation. **Neurocomputing**, v. 71, p. 3335 – 3343, 2008.

MMA. **Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía de la Cuenca Hidrográfica del Tajo**. Memoria do Programa Actuaciones para la Geston y Utilización del Água, 2007.

MOREIRA, E. E.; PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S.; MEXIA, J. T. Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models. **Journal of Hydrology**, vol. 331, pp. 349–359, 2006.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOLION, L.C.B. Aquecimento Global, El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanálise**, 2005.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 38, 2653-2675, 1981.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)**, v. 50 (3), p. 885–900, 2007.

National Drought Policy Commission. **Final Report: Preparing for Drought in the 21st Century**. United States Department of Agriculture, Washington, D.C, 2000.

NEVES, F. C. A ideologia de uma natureza perversa: seca, trabalho e conflito. In: SOUZA FILHO, F. A.; MOURA, A. D. (Orgs.). **Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos**, p. 135-146, 2006.

NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Region Spectral Models at IRI. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 82, p 2787-2796, 2001.

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.

NYS, E.; ENGLE, N. L. Convivência com o Semiárido e Gestão proativa da seca no Nordeste do Brasil: Uma nova Perspectiva. **Agua Brasil series**. Washington, DC : World Bank Group, 2014. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2014/05/20193748/living-semi-arid-proactive-drought-management-northeast-brazil-new-perspective> Acesso em: 11.07.2016.

OLIVEIRA, F. L. C. Nova abordagem para geração de cenários de afluências no planejamento da operação energética de médio prazo. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2010.

PASSADOR, C. S.; PASSADOR, J. L.; ARRAES, A. M. D.; ARRAES, H. F. L. Políticas Públicas de Combate a Seca no Brasil e a Utilização das Cisternas nas Condições de Vida de Famílias na Região do Baixo Salitre (Juazeiro-BA): Uma Dádiva de Deus? In: **Anais do XXXI Encontro da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Administração (ANPAD)**, Rio de Janeiro, 22 a 26 de setembro de 2007.

Paulo, A. A. Metodologias de Caracterização e Previsão das Secas – Modelação Espacial e Temporal, Doutoramento em Engenharia Agronómica, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2004.

_____. Avaliação da homogeneidade regional do clima para caracterização da seca no Alentejo. In: Pereira, L.S., Mexia, J.T., Pires, C.A.L. (1. ed.). **Gestão do Risco em Secas**. Colibri, Lisboa, pp 73-89, 2010.

PAULO, A. A.; FERREIRA, E.; COELHO, C.; PEREIRA, L. S. Drought class transition analysis through Markov and Log-linear models, an approach to early warning. **Agricultural Water Research Management**, vol. 77, pp. 59– 81, 2005. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.09.039.

PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. **Water Research Management**, vol. 21, pp. 1813– 1827, 2007. DOI: 10.1007/s11269-006-9129-9.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NIEHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLAY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A. Comprehensive meteorological modeling system – RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, n. 1, p. 69-91, 1992.

PIRES, C. A. L.; SOUSA, J. M. B. B. Previsão de classes de seca por cadeias de Markov condicionadas por regimes da oscilação de Atlântico Norte e da oscilação Ártica. In: Pereira, L. S.; Mexia, J. T.; Pires, C. A. L. (1. ed.). **Gestão do Risco em Secas**., Colibri, Lisboa, pp. 209-224, 2010.

POMPEU SOBRINHO, T. História das Secas (Século XX). Coleção Mossoroense, v. 226, 2. ed., p. 539, 1982.

POZZI, W.; SHEFFIELD, J.; STEFANSKI, R.; CRIPE, D.; PULWARTY, R.; VOGT, J. V.; HEIM, R. R. J.; BREWER, M. J.; SVOBODA, M.; WESTERHOFF, R.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LLOYD-HUGHES, B.; PAPPENBERGER, F.; WERNER, M.; DUTRA, E.; WETTERHALL, F.; WAGNER, W.; SCHUBERT, S.; MO, K.; NICHOLSON, M.; BETTIO, L.; NUNEZ, L.; VAN BEEK, R.; BIERKENS, M.; GONÇALVES DE GONÇALVES, L. G.; GERD ZELL DE MATTOS, J.; LAWFORDE, R. Toward Global Drought Early Warning Capability: Expanding International Cooperation for the Development of a Framework for Monitoring and Forecasting" (2013). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, Issue 6, pp. 776-785, 2013

PULWARTY, R. S.; SIVAKUMAR, M. V. K. Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. **Weather and Climate Extremes**, v.3, pp. 14-21, 2014. DOI: 10.1016/j.wace.2014.03.005

RAJAGOPALAN, B.; LALL U.; ZEBIAK S. E. Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles. **Monthly Weather Review**, v.130(7), p. 1792 - 1811, 2002.

REPELLI, C. A.; ALVES, J. M. B. Uso de Análise de Correlações Canônicas para Prognosticar a Variabilidade Espacial da Precipitação Sazonal Sobre o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 11, 1/2, 67-75, 1996.

REIS JUNIOR, D. S.; MARTINS, E. S. P. R.; NASCIMENTO, L. S. V.; COSTA, A. A.; ALEXANDRE, A. M. B.; FIRMINO, M. B. M. Seasonal streamflow forecasts for reservoirs in the State of Ceará, Brazil. In: Servain J.; Campos, J. N. B.; Martins, E. S.P. R.; Reis Junior, D. S. (1st ed.). **Clima do Atlântico Tropical e impactos sobre o Nordeste** (CATIN), p. 302-318, 2010.

RIBEIRO, M. B. A potencialidade do semi-árido Brasileiro: O Rio São Francisco e revitalização uma análise. Brasília, 2007. ISBN 978-85-900232-2-8.

ROBERTSON, A. W.; BAETHGEN, W.; BLOCK, P.; LALL, U.; SANKARASUBRAMANIAN, A.; SOUZA FILHO, F. A.; VERBIST, K. M. J. Climate risk management for water in semi-arid regions. **Earth Perspectives**, 1:12, 2014. DOI:10.1186/2194-6434-1-12

ROBERTSON, A.W.; LALL, U.; ZEBIAK, S.E.; GODDARD, L. Improved Combination of Multiple Atmospheric GCM Ensembles for Seasonal Prediction. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 2732-2744, 2004.

RODRIGUES, N.M. Todas as 129 secas registradas no polígono das secas no semiárido do Nordeste do Brasil. Disponível em: < <http://natalgeo.blogspot.com.br/2016/02/todas-as-128-secas-registradas-no.html> > Acesso em: 13.12.2016.

ROECKNER, E.; ARPE, K.; BENGTTSSON, L.; CHRISTOPH, M.; CLAUSSEN, M.; DÜMENIL, L.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. **Report 218**, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, September 1996.

SANTOS, J. F.; PULIDO-CALVO, I.; PORTELA, M. M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. **Water Resources Research**, v. 46, 13pp., 2010.

SCHAEFER, J. T. The Critical Success Index as an indicator of warning skill. **Weather and Forecasting**, nº 5, pp.570-575, 1990.

SHUKLA, S.; WOOD, A. W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L02405, 2008. DOI:10.1029/2007GL032487.

SILVA, S. M. O. ; SOUZA FILHO, F. A ; AQUINO, S. H. S. . Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 749-760, 2017.

SILVA, D. F.; GALVÍNIO, J. D. Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, p. 665-676, 2011.

SOUSA, W. S.; SOUSA, F. A. S. Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 173-180, 2010.

SOUZA FILHO, F. A. Natureza e desenvolvimento nos semi-áridos. In: SOUZA FILHO, F. A.; MOURA, A. D. (Orgs.). **Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos**, p. 41-58, 2006.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: Application of multivariate, semiparametric algorithm. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, p. 1307, 2003.

SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Modelo de Previsão de Vazões Sazonais e Interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 9, n. 2, p.61-74, ABRH, Porto Alegre, 2004.

SRH. **Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará**. Governo do Estado do Ceará: Secretária de Recursos Hídricos, 2013.

STEINEMANN, A. **Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation**. Journal of the American Water Resources Association, vol. 39, pp. 1217-1233, 2003.

STOLL,S.; HENDRICKS FRANSSSEN, H. J.; BUTTS M.; KINZELBACH, W. Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. **Hydrology and Earth System Sciences**, 15, 21–38, 2011. DOI:10.5194/hess-15-21-2011.

SUN, L.; MONCUNILL, D. F.; LI, H.; ZEBIAK, S. An operational dynamical downscaling prediction system for Nordeste Brasil and the 2002 04 real-time forecast evaluation. **Journal of Climate**, v. 19, n 10, abril de 2006. DOI:10.1175/JCLI3715.1

SVANIDZE, G.G. **Mathematical Modeling of Hydrologic Series for Hydroelectric and Water Resources Computations**. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1980.

TDEC. **Drought Management Plan**. Revised February, 2010.

TRAVASSOS, I. S.; SOUZA, B. I.; SILVA, A. B. Secas, desertificação e políticas públicas no semiárido Nordestino Brasileiro. **Revista OKARA: Geografia em debate**, v.7, n.1, p. 147-164, 2013. ISSN: 1982-3878.

TREMBACK, C. J.; WALKO, R. L. **RAMS Version 6.0: User's guide - Introduction**. 1st ed. Fort Collins (CO), EUA, EUA, 2005. 10 p. Disponível em: <<http://atmet.com/html/docs/rams/ug60-introduction-1.1.pdf>>. Acesso em: 11 de Julho de 2016.

TURNER II, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; McCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.; MARTELLO, M. L.; POLSKY, C.; PULSIPHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003. DOI: 10.1073/pnas.1231335100

UNISDR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Global Survey of Early Warning Systems**, Geneva, Switzerland, 46 pp, 2006.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. *Journal of Climate*, v.11, n. 10, p. 551-562, 1998.

VENTON, P. **Drought Risk Management: Practitioner's Perspectives from Africa and Asia**. Report of the United Nations Development Programme Drylands Development Centre, 2012.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. **A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI**. *Journal of Climate*, v. 23, pp.1696–1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; CAMARERO, J. J.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; AZORIN-MOLINA, C.; REVUELTO, J.; MORÁN-TEJEDA, E.; SÁNCHEZ-LORENZO, A. **Performance of drought indices for ecological, agricultural and hydrological applications**. *Earth Interactions*, v. 16, pp. 1–27, 2012.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian Northeast. **Solid Earth**, v. 6, pp. 347-360, 2015. DOI:10.5194/se-6-347-2015.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; SANTANA, M. O.; CAMPELLO, F. C. B. Early Warning System for Drought and Desertification. In: **2nd Scientific Conference UNCCD**, 2013, Bonn. 2nd Scientific Conference UNCCD, 2013.

VILLA, M. A. **Vida e Morte no Sertão: Histórias das Secas no Nordeste nos Séculos XIX e XX**. São Paulo: Editora Ática. 1. ed., 269p, 2000. ISBN 850807626-6.

VOLTOLINI, Ricardo (organizador). **Terceiro setor: planejamento e gestão**. 2. ed., São Paulo, Editora Senac São Paulo, 2004.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single-moment scheme. **Atmospheric Research**, Elsevier Science, v. 38, n. 1, p. 29-62, 1995.

WANG, W.; VAN GELDER, H. A. J. M.; VRIJLING, J. K.; MA, J. Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 383-399, 2006.

WILHITE, D. A.; BOTTERILL, L.; MONNIK, K.; National Drought Policy: Lessons Learned from Australia, South Africa, and the United States. In: Wilhite D.A. (1st ed.) **Drought and water crises: science, technology, and management issues**. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 93–135, 2005.

WILHITE, D. A.; BUCHANAN-SMITH, M. Drought as a natural hazard: understanding the natural and social context. In: Wilhite D.A. (1st ed.) **Drought and water crises: science, technology, and management issues**. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 3–29, 2005.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International**, 10 (3), p. 111–120, 1985.

WILHITE, D. A.; HAYES, M. J.; KNUTSON, C. L.; SMITH, K. H. Planning for Drought: Moving from Crisis to Risk Management. **Journal of The American Water Resources Association**, v. 36, n. 4, pp. 697-710, 2000.

WILHITE, D. A.; HAYES, M. J.; KNUTSON, C. L.; Drought Preparedness Planning: Building Institutional Capacity. In: Wilhite D.A. (1st ed.) **Drought and water crises: science, technology, and management issues**. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 93–135, 2005.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation. In: Donald A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar and Deborah A. Wood (1st ed.). **Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management**. Proceedings of an Expert Group Meeting held in Lisbon, Portugal, 5-7 September 2000. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.

WILLMOTT, C. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309–1313, 1982.

ZEALAND, C. M.; BURN, D. H.; SIMONOVIC, S. P. Short term streamflow forecasting using artificial neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 214, p. 32-48, 1999.

APÊNDICE A

Levantamento de estratégias de mitigação e resposta

Quadro 2 – Questionário de levantamento das ações a serem tomadas em cada nível de severidade de seca.

	MEDIDAS	Longo Prazo	Curto Prazo	Severidade da Seca				
				Normal	Alerta	Seca Severa	Seca Grave	Seca Extrema
1.0	1. Medidas Preventivas							
1.1	Determinação dos limiares de início das ações							
1.2	Desenvolvimento de sistemas de alerta precoce							
1.3	Parâmetros de monitoramento hidrometeorológicas							
1.4	A avaliação periódica do estado das unidades populacionais							
1.5	Monitorização do consumo							
1.6	Monitoramento da qualidade da água							
1.7	Inventário das fontes alternativas de abastecimento							
2.0	2. Medidas de gestão e operação do sistema							
2.1	Desenvolvimento de procedimentos operacionais							
2.2	Integrado e funcionamento equilibrado das várias fontes de abastecimento							
2.3	Medidas para melhorar a eficiência do sistema .							
2.4	Instalações manutenção alternativa de abastecimento							
3.0	3. Medidas institucionais							
3.1	Estabelece um quadro de informação e diálogo com as autoridades e instituições responsáveis cada área .							
3.2	Estabelecimento de acordos de transferência de direitos de opções de concessão.							
4.0	4. Medidas de Caráter Normativo							
4.1	Atuar sobre as taxas							
4.2	Decretos ou lados de limitações ou restrições ao uso da água							
4.3	Medidas de vigilância							
4.4	Medidas para a resolução de conflitos							
5.0	5. Medidas de impacto social							
5.1	Informação ao consumidor							
5.2	Informações para a mídia							
5.3	Campanhas de persuasão para reduzir o consumo							
5.4	Promover a canalização eficiente							
5.5	Envolvimento do usuário no planejamento da seca							
5.6	Limitações no uso da água							
5.7	Interrupções Noturnas							
5.8	Racionamento							
6.0	6. Medidas de impacto ambiental							
6.1	Reduções no fornecimento de exigências ambientais							
6.2	Acompanhamento da exploração dos aquíferos							
6.3	Controlo das descargas para os rios							
6.4	Reutilização de água recuperada							

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 3 – Continuação do Quadro 2.

7.0	7. Medidas para o cumprimento dos objectivos							
7.1	Nomeação de um comité ou grupo de trabalho para controlar a situação em diferentes estágios							
7.2	Provisão de recursos financeiros e humanos para lidar com a seca							
7.3	Monitoramento intenso de reservas e consumo							
8.0	8. Medidas de expansão ou melhoria de infra-estrutura e disponibilidade							
8.1	Implementação de obras de emergência							
8.2	Interconectar subsistemas							
8.3	Expansão da capacidade de produção de água subterrânea							
8.4	A perfuração de novos poços							
8.5	Usando volumes morto dos reservatórios							
8.6	Renovação de instalações ineficientes							
8.7	Melhorias nos processos de tratamento e purificação							
8.8	Disponibilidade carros pipa							
9.0	9. Medidas de acompanhamento da situação e os riscos							
9.1	Aumento da monitorização de parâmetros hidrometeorológicos							
9.2	Monitoramento intenso de consumo							
9.3	A avaliação periódica da situação e do desenvolvimento esperado							
9.4	Monitoramento da qualidade da água tratada na origem							
10.0	10. Medidas preparatórias							
10.1	Planejamento das ações em cada uma das fases							
10.2	Planejamento e projeto de campanhas de informação							
10.3	Elaboração de normas e decretos							
10.4	Avaliação do impacto económico e social							
10.5	Avaliação de impactos ambientais							
10.6	Estudos fontes alternativas							
10.7	Comente e desenvolvimento de instalações de abastecimento alternativas							

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE B

Estratégias de mitigação e resposta para cada nível de severidade de seca definidas pelo Grupo de Trabalho.

Quadro 5 - Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para fase Normal.

Estado	Classe	Tipo de ação	Descrição	Responsável	Prioridade
NORMAL	Medidas de Monitoramento e preventivas	Avaliação periódica do consumo das localidades: disponibilidade quantitativa e qualitativa	Avaliar o problema do consumo em cada localidade inter-relacionando a disponibilidade hídrica com suas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais.	CAGECE	2
		Monitoramento da qualidade de água bruta	A ação de monitoramento é uma intensa atividade para acompanhar, vigiar e simultaneamente avaliar o ambiente com vistas a estabelecer diagnóstico de situação.	COGERH	1
		Monitoramento da qualidade de água tratada	Esta ação visa monitorar constantemente a qualidade da água e avaliar o seu uso para consumo humano em vista a evitar a disseminação de doenças de veiculação hídrica.	CAGECE	1
		Monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos	Esta ação é necessária para avaliar a recarga dos reservatórios	COGERH e FUNCEME	2
		Inventário das fontes alternativas de abastecimento	O levantamento dessas fontes é significativo para o suprimento hídrico da população bem como, para maximizar a eficiência do sistema hídrico.	COGERH/SRH	3
	Planejamento e Gestão de Secas	Planejamento e projeto de campanhas de informação	Uma grande restrição que existe no planejamento de resposta a seca é a falta de compreensão desse fenômeno por parte da população e muitas vezes, dos decisores políticos por isso, a sensibilização da opinião pública de um modo geral é importante para a eficácia dos esforços de preparação a seca.	SRH/COGERH/CAGECE	1
		Planejamento das ações do próximo estágio de secas (SECA)	O planejamento permite definir regras de atuação e avaliar ações oportunas para mitigar a seca.	SRH/COGERH/CAGECE	2

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 6 - Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Pré-Alerta.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
PRÉ-ALERTA	Medidas de Monitoramento e preventivas	Avaliação periódica do consumo das localidades: disponibilidade quantitativa e qualitativa	Avaliar o problema do consumo em cada localidade inter-relacionando a disponibilidade hídrica com suas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais.	CAGECE	2
		Monitoramento da qualidade de água bruta	A ação de monitoramento é uma intensa atividade para acompanhar, vigiar e simultaneamente avaliar o ambiente com vistas a estabelecer diagnóstico de situação.	COGERH	1
		Monitoramento da qualidade de água tratada	Esta ação visa monitorar constantemente a qualidade da água e avaliar o seu uso para consumo humano evitando a disseminação de doenças de veiculação hídrica.	CAGECE	1
		Monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos	Esta ação é necessária para avaliar a recarga dos reservatórios	COGERH e FUNCEME	2
		Inventário das fontes alternativas de abastecimento	O levantamento dessas fontes é significativo para o suprimento hídrico da população bem como, para maximizar a eficiência do sistema hídrico.	COGERH/SRH	3
	Medidas de gestão e operação do sistema	Medidas para tornar os processos de tratamento e purificação da água mais eficientes	Estes processos são a principal forma de reduzir as contaminações na água e torna-la potável, assim, aumentar a eficiência desses processos ajuda a otimizar a gestão da água e reduzir os custos do sistema de abastecimento.	CAGECE	1
		Medidas para melhorar a eficiência da operação do sistema com redução de perdas aparentes e reais no sistema de água bruta e tratada	Essas medidas podem estar relacionadas com a redução de perdas no transporte e distribuição e com a implementação de hidrômetros. As perdas aparentes estão relacionadas com o consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) e imprecisão dos hidrômetros. Enquanto que, as perdas reais estão associadas a vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição, vazamentos nos ramais prediais até o hidrômetros bem como, vazamentos e extravazamentos nos aquedutos e reservatórios de distribuição.	CAGECE/COGERH	1
		Gestão intensa dos mananciais superficiais e subterrâneos	Para garantir a sustentabilidade hídrica faz-se necessário intensificar a gestão de todos os mananciais no período de seca uma vez que neste período há um aumento dos free-rider.	COGERH	1
		Funcionamento integrado e equilibrado das várias fontes de abastecimento	A integração deve cobrir todos os corpos de água doce, incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas considerando os aspectos quantitativos e qualitativos. Nesta ação inclui a manutenção de fontes alternativas de abastecimento.	COGERH/SRH	2
	Medidas de caráter institucional	Estabelecer um quadro de informação e diálogo com as autoridades, usuários e instituições responsáveis por cada área	As autoridades, usuários e instituições gestoras devem ser informadas sobre alertas de seca, mas precisam ter vontade política para implementar uma resposta oportuna (Campanhas Institucionais).	Governo do Estado (CAGECE/COGERH/SRH)	1

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 7 – Continuação Quadro 6.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
PRÉ-ALERTA	Medidas de impacto social	Informação ao consumidor	A comunicação com a sociedade é um passo de grande importância para conscientizar a população quanto ao papel das instituições e dela mesma na conservação da água.	CAGECE/COGERH	1
		Informações para a mídia	A mídia será o meio de informar a população sobre a situação dos recursos hídricos e sobre as medidas que os órgãos gestores estão tomando para minimizar a escassez hídrica. Ela é um meio estratégico para uma comunicação eficiente.	CAGECE/COGERH	1
		Campanhas educacionais com vista a redução do consumo	Estas campanhas ajudam a população a ter novos hábitos e condutas quanto ao consumo da água. Elas podem melhorar e aprofundar a sustentabilidade da oferta e demanda e a segurança da sociedade em relação à disponibilidade e vulnerabilidade. Assim, elas têm o caráter de sensibilização e conscientização e devem ser realizadas no dia-a-dia (redução/aumento de tarifa).	CAGECE/COGERH	1
	Medidas de caráter legal e normativo	Medidas de fiscalização (Normativo e operacional)	Elas devem incluir a fiscalização/inspeção, regras que definem penalidades para cada infração e arbitragem administrativas ou judiciais da punição (aplicação da pena) pois, sem ações de controle do uso da água a efetividade de sistema não será alcançada.	SRH/COGERH	1
	Medidas de impacto ambiental	Buscar a expansão da capacidade de produção de água subterrânea	Esta ação é um passo para integração de todas as fontes de abastecimento. Esta expansão requer a elaboração de mapas hidrogeológicos, de estudos de vulnerabilidade bem como do conhecimento da disponibilidade e da qualidade do recurso.	SRH/COGERH	2
		Acompanhamento da exploração dos aquíferos	Em virtude da incerteza que existe sobre os mecanismos de recarga de aquíferos na região em estudo deve ser realizado um acompanhamento das explorações a fim de não colocar essas fontes em risco.	SRH	2

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 8 – Continuação Quadro 7.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
PRÉ-ALERTA	Cumprimento dos objetivos de gestão de seca	Aumento de recursos financeiros e humanos para lidar com a seca	No período de seca aumentam os gastos com a gestão, com o monitoramento e com o tratamento de água e os valores arrecadados são menores por isso, é necessário mobilizar recursos para a aplicação de medidas de prevenção e mitigação e negociar com as agencias reguladoras.	SRH	1
		Nomeação de um grupo de trabalho para controlar a situação em diferentes estágios	Este grupo será formado para coordenar as ações referentes a seca cuja frequência das reuniões serão intensificadas conforme haja mudança no estado de seca (Comitê estadual e comitê cagece).	SRH/COGERH/CAGECE/CBRH	1
	Planejamento e Gestão de Secas	Planejamento e projeto de campanhas de informação	Uma grande restrição que existe no planejamento de resposta a seca é a falta de compreensão desse fenômeno por parte da população e muitas vezes, dos decisores políticos por isso, a sensibilização da opinião pública de um modo geral é importante para a eficácia dos esforços de preparação a seca.	SRH/COGERH/CAGECE	1
		Planejamento das ações do próximo estágio de secas (SECA)	O planejamento permite definir regras de atuação e avaliar ações oportunas para mitigar a seca.	SRH/COGERH/CAGECE	2
		Elaboração de normas e decretos relativas ao grau de severidade seguinte (Seca)	A elaboração de normas e decretos referentes é importante para regulamentar as ações que serão implementadas para solucionar os problemas de escassez hídrica e também para que as pessoas tomem consciência da gravidade desse problema e da necessidade de mudar a forma de utilizar esse recurso.	SRH/COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 9 - Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para fase de Alerta.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
ALERTA	Medidas de Monitoramento e preventivas	Avaliação periódica do consumo das localidades: disponibilidade quantitativa e qualitativa	Avaliar o problema do consumo em cada localidade inter-relacionando a disponibilidade hídrica com suas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais (aumento/redução tarifária e racionamento).	CAGECE/COGERH	1
		Monitoramento da qualidade de água bruta	A ação de monitoramento é uma intensa atividade para acompanhar, vigiar e simultaneamente avaliar o ambiente com vistas a estabelecer diagnóstico de situação.	COGERH	1
		Monitoramento da qualidade de água tratada	Esta ação visa monitorar constantemente a qualidade da água e avaliar o seu uso para consumo humano evitando a disseminação de doenças de veiculação hídrica.	CAGECE	1
		Monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos	Esta ação é necessária para avaliar a recarga dos reservatórios	COGERH/FUNCEME	1
		Inventário das fontes alternativas de abastecimento	O levantamento dessas fontes é significativo para o suprimento hídrico da população bem como, para maximizar a eficiência do sistema hídrico.	SRH/COGERH	2
	Medidas de gestão e operação do sistema	Medidas para melhorar a eficiência da operação do sistema com redução de perdas aparentes e reais no sistema de água bruta e tratada	Essas medidas podem estar relacionadas com a redução de perdas no transporte e distribuição e com a implementação de hidrômetros. As perdas aparentes estão relacionadas com o consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) e imprecisão dos hidrômetros. Enquanto que, as perdas reais estão associadas a vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição, vazamentos nos ramais prediais até o hidrômetros bem como, vazamentos e extravazamentos nos aquedutos e reservatórios de distribuição.	CAGECE /COGERH	1
		Funcionamento integrado e equilibrado das várias fontes de abastecimento	A integração deve cobrir todos os corpos de água doce, incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas considerando os aspectos quantitativos e qualitativos. Nesta ação inclui a manutenção de fontes alternativas de abastecimento.	SRH/COGERH	2
		Interrupções Noturnas	Essa é uma das formas de reduzir o consumo de água e evitar a utilização de novas fontes de abastecimento que, muitas vezes, pode gerar prejuízos ambientais de grande alcance.	CAGECE	1
		Racionamento/Reajuste de tarifa/Transposição de bacias (Depende do sistema).	Tendo em vista o possível colapso no sistema abastecimento de água das cidades, o racionamento/reajuste de tarifa/transposição de bacias é uma medida essencial para a manter a disponibilidade hídrica.	CAGECE	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 10 – Continuação Quadro 9.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
ALERTA	Medidas de expansão e melhoria da infraestrutura e da disponibilidade hídrica	Avaliação periódica da situação e do desenvolvimento esperado das ações de resposta à seca	Esta ação deve ser realizada em todas as fases de seca para analisar se as ações estão gerando as respostas desejadas. Ela vai subsidiar o planejamento e a formulação de novas ações.	SRH/COGERH/CAGECE	2
		Expansão da capacidade de produção de água subterrânea (Complexo Dunas/Barreiras)	Esta ação é um passo para integração de todas as fontes de abastecimento. Esta expansão requer a elaboração de mapas hidrogeológicos, de estudos de vulnerabilidade bem como do conhecimento da disponibilidade e da qualidade do recurso.	SRH/COGERH	1
		Implementação de obras de emergência	Uma seca exige a implementação de obras de emergência com a construção e instalação de adutoras de montagem rápida, perfuração de novos poços, transposição de bacias hidrográficas e descarga de fundo de barragens para sustentar o abastecimento das cidades.	SRH/SOHIDRA	1
		Medidas para tornar os processos de tratamento e purificação da água mais eficientes	Estes processos são a principal forma de reduzir as contaminações na água e torna-la potável, assim, aumentar a eficiência desses processos ajuda a otimizar a gestão da água e reduzir os custos do sistema de abastecimento.	CAGECE	1
	Medidas de caráter institucional	Estabelecer um quadro de informação e diálogo com as autoridades, usuários e instituições responsáveis por cada área	As autoridades, usuários e instituições gestoras devem ser informadas sobre alertas de seca mas, precisam ter vontade política para implementar uma resposta oportuna.	COGERH	1
	Medidas de caráter legal e normativo	Intensificar as medidas de fiscalização (Normativo e operacional)	Elas devem incluir a fiscalização/inspeção, irrigação controlada, proteção de mananciais e regras que definem penalidades para cada infração e arbitragem administrativas ou judiciais da punição (aplicação da pena) pois, sem ações de controle do uso da água a efetividade de sistema não será alcançada.	COGERH	1
		Decretos ou laudos de limitações ou restrições ao uso da água	A conservação da água também depende de uma série de leis e regulamentos que as autoridades podem implementar com vistas a punir ou restringir o usuário em relação ao uso não autorizado (Outorga).	COGERH	1
		Intensificar as medidas para resolução de conflitos	Para minimizar os conflitos faz-se necessário uma gestão integrada e descentralizada que utilize como instrumento uma base de informações consolidada e que tenha a participação de todos os setores.	COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 11 – Continuação Quadro 10.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
ALERTA	Medidas de impacto social	Informação ao consumidor	A comunicação com a sociedade é um passo de grande importância para conscientizar a população quanto ao papel das instituições e dela mesma na conservação da água.	CAGECE/COGERH	1
		Informações para a mídia	A mídia será o meio de informar a população sobre a situação dos recursos hídricos e sobre as medidas que os órgãos gestores estão tomando para minimizar a escassez hídrica. Ela é um meio estratégico para uma comunicação eficiente.	CAGECE/COGERH	1
		Campanhas educacionais com vista a redução do consumo	Estas campanhas ajudam a população a ter novos hábitos e condutas quanto ao consumo da água. Elas podem melhorar e aprofundar a sustentabilidade da oferta e demanda e a segurança da sociedade em relação à disponibilidade e vulnerabilidade. Assim, elas têm o caráter de sensibilização e conscientização e devem ser realizadas no dia-a-dia.	CAGECE/COGERH	1
	Medidas de impacto ambiental	Controle das descargas residuais para os rios	As águas residuais poluentes são responsáveis pela degradação da qualidade de água e, conseqüentemente pela redução de água para consumo humano ou pelo aumento dos custos de tratamento da água.	SRH/COGERH	1
		Reutilização de água na ETA	A reutilização da água de lavagem dos filtros é uma forma de reduzir o desperdício de água.	CAGECE	2
		Flexibilizar as exigências ambientais e reguladoras, principalmente em relação ao reuso de esgoto	Esta ação é necessária para agilizar as obras de infraestrutura básica e de operação do sistema hídrico.	SRH	1
	Cumprimento dos objetivos de gestão de seca	Aumento de recursos financeiros e humanos para lidar com a seca	No período de seca aumentam os gastos com a gestão, com o monitoramento e com o tratamento de água e os valores arrecadados são menores por isso, é necessário mobilizar recursos para a aplicação de medidas de prevenção e mitigação.	SRH/COGERH	1
		Intensificar as atividades do grupo de trabalho para controlar a situação em estado de seca severa	Aumentar a frequência das reuniões para monitorar as condições da seca severa.	SRH/COGERH/CAGECE/CBH	1
	Planejamento e Gestão de Secas	Planejamento das ações para o estado de seca severa	O planejamento permite definir regras de atuação e avaliar ações oportunas para mitigar a seca.	SRH/COGERH/CAGECE/CBH	1
		Elaboração de normas e decretos relativas ao grau de severidade seguinte(Seca Severa)	A elaboração de normas e decretos é importante para regulamentar as ações que serão implementadas para solucionar os problemas de escassez hídrica e também para que as pessoas tomem consciência da gravidade desse problema e da necessidade de mudar a forma de utilizar esse recurso.	SRH/COGERH	1
		Avaliação do impacto econômico no sistema de abastecimento de água e dar soluções	Esta ação visa avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de abastecimento e avaliar as perdas econômicas.	CAGECE	1
		Avaliação do impacto econômico no sistema de gestão de recursos hídricos e dar soluções	Esta ação é necessária para avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de gestão e avaliar suas perdas econômicas.	SRH/COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 12 – Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Emergência I.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGÊNCIA I	Medidas preventivas	Avaliação periódica do consumo das localidades: disponibilidade quantitativa e qualitativa	Avaliar o problema do consumo em cada localidade inter-relacionando a disponibilidade hídrica com suas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais.	CAGECE/COGERH	1
		Intensificar monitoramento da qualidade de água bruta	A ação de monitoramento é uma intensa atividade para acompanhar, vigiar e simultaneamente avaliar o ambiente com vistas a estabelecer diagnóstico de situação.	COGERH	1
		Intensificar monitoramento da qualidade de água tratada	Esta ação visa monitorar constantemente a qualidade da água e avaliar o seu uso para consumo humano evitando a disseminação de doenças de veiculação hídrica.	CAGECE	1
		Monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos	Esta ação é necessária para avaliar a recarga dos reservatórios.	FUNCEME/COGERH	1
		Inventário das fontes alternativas de abastecimento e verificação de adequação das ETAS para tratamento de água de baixa qualidade	O levantamento dessas fontes é significativo para o suprimento hídrico da população bem como, para maximizar a eficiência do sistema hídrico.	SRH/COGERH	1
	Medidas de gestão e operação do sistema	Medidas para melhorar a eficiência da operação do sistema com redução de perdas aparentes e reais no sistema de água bruta e tratada	Redução de 10% de perdas no transporte e distribuição e com a implementação de hidrômetros. As perdas aparentes estão relacionadas com o consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) e imprecisão dos hidrômetros. Enquanto que, as perdas reais estão associadas a vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição, vazamentos nos ramais prediais até o hidrômetros bem como, vazamentos e extravazamentos nos aquedutos e reservatórios de distribuição.	CAGECE /COGERH	1
		Funcionamento integrado e equilibrado das várias fontes de abastecimento	A integração deve cobrir todos os corpos de água doce, incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas considerando os aspectos quantitativos e qualitativos. Nesta ação inclui a manutenção de fontes alternativas de abastecimento.	SRH/COGERH	1
		Intensificação das interrupções Noturnas	Essa é uma das formas de reduzir o consumo de água e evitar a utilização de novas fontes de abastecimento que, muitas vezes, pode gerar prejuízos ambientais de grande alcance.	CAGECE	1
		Racionamento/Reajuste de tarifa/Transposição de bacias/AMR/Reuso de esgoto/suspensão de irrigação/multas (Depende do sistema).	Tendo em vista o possível colapso no sistema abastecimento de água das cidades, o (a) racionamento/Reajuste de tarifa/Transposição de bacias/AMR/Reuso de esgoto/suspensão de irrigação/multas é uma medida essencial para a manter a disponibilidade hídrica.	CAGECE	1
	Medidas de caráter institucional	Estabelece um quadro de informação e diálogo com as autoridades, usuários e instituições responsáveis por cada área	As autoridades, usuários e instituições gestoras devem ser informadas sobre alertas de seca mas, precisam ter vontade política para implementar uma resposta oportuna.	COGERH	1
	Medidas de caráter legal e normativo	Intensificação das medidas de fiscalização (Normativo e operacional)	Elas devem incluir a fiscalização/inspeção, regras que definem penalidades para cada infração e arbitragem administrativas ou judiciais da punição (aplicação da pena) pois, sem ações de controle do uso da água a efetividade de sistema não será alcançada.	COGERH	1
		Decretos ou laudos de limitações ou restrições ao uso da água	A conservação da água também depende de uma série de leis e regulamentos que as autoridades podem implementar com vistas a punir ou restringir o usuário em relação ao uso não autorizado.	COGERH	1
		Intensificação das medidas para resolução de conflitos	Para minimizar os conflitos faz-se necessário uma gestão integrada e descentralizada que utilize como instrumento uma base de informações consolidada e que tenha a participação de todos os setores.	COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 13 – Continuação do Quadro 12.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGÊNCIA I	Medidas de impacto social	Informação ao consumidor	A comunicação com a sociedade é um passo de grande importância para conscientizar a população quanto ao papel das instituições e dela mesma na conservação da água.	CAGECE	1
		Informações para a mídia (Mudanças no setor de Construção Civil)	A mídia será o meio de informar a população sobre a situação dos recursos hídricos e sobre as medidas que os órgãos gestores estão tomando para minimizar a escassez hídrica. Ela é um meio estratégico para uma comunicação eficiente.	CAGECE/COGERH	1
		Intensificação de campanhas educacionais com vista a redução do consumo	Estas campanhas ajudam a população a ter novos hábitos e condutas quanto ao consumo da água. Elas podem melhorar e aprofundar a sustentabilidade da oferta e demanda e a segurança da sociedade em relação à disponibilidade e vulnerabilidade. Assim, elas têm o caráter de sensibilização e conscientização e devem ser realizadas no dia-a-dia.	CAGECE	1
	Medidas de impacto ambiental	Acompanhamento da exploração dos aquíferos	Em virtude da incerteza que existe sobre os mecanismos de recarga de aquíferos na região em estudo deve ser realizado um acompanhamento das explorações a fim de não colocar essas fontes em risco.	SRH	1
		Intensificar o controle das descargas residuais para os rios	As águas residuais poluentes são responsáveis pela degradação da qualidade de água e, conseqüentemente pela redução de água para consumo humano ou pelo aumento dos custos de tratamento da água.	COGERH/SRH	1
		Intensificar a reutilização de água na ETA	A reutilização da água de lavagem dos filtros é uma forma de reduzir o desperdício de água.	CAGECE	2
	Cumprimento dos objetivos de gestão de seca	Flexibilizar as exigências ambientais e reguladoras	Esta ação é necessária para agilizar as obras de infraestrutura hídrica.	CAGECE/SEMACE	1
		Aumento de recursos financeiros e humanos para lidar com a seca	No período de seca aumentam os gastos com a gestão, com o monitoramento e com o tratamento de água e os valores arrecadados são menores por isso, é necessário mobilizar recursos para a aplicação de medidas de prevenção e mitigação (reajuste de tarifa).	SRH/COGERH/CAGECE	1
		Intensificar as atividades do grupo de trabalho para controlar a situação no estado de seca severa	Aumentar a frequência das reuniões para monitorar as condições da seca severa.	SRH/COGERH/CAGECE/CBH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 14 – Continuação do Quadro 13.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGENCIA I	Medidas de expansão e melhoria da infraestrutura e da disponibilidade hídrica	Expansão da capacidade de produção de água subterrânea (Complexo Dunas/Barreiras)	Esta ação é um passo para integração de todas as fontes de abastecimento. Esta expansão requer a elaboração de mapas hidrogeológicos, de estudos de vulnerabilidade bem como do conhecimento da disponibilidade e da qualidade do recurso.	SRH	2
		Implementação de obras de emergência	Uma seca de grande severidade exige a implementação de obras de emergência com a construção de ensecadeiras, instalação de adutoras de montagem rápida e a perfuração de novos poços para sustentar o abastecimento das cidades.	SRH	2
		Possibilidade do uso de reservas estratégicas	As reservas estratégicas da RMF correspondem: (i) volume "morto" do Pacoti-Riachão (cota 31); (ii) volume "morto" do açude Gavião (cota 35,5); (iii) reservas do reservatório Aracoiaiba; e (iv) volume do açude Castanhão a partir do nível de racionamento para o setor de irrigação.	COGERH	3
		Medidas para tornar os processos de tratamento e purificação da água mais eficientes	Estes processos são a principal forma de reduzir as contaminações na água e torna-la potável, assim, aumentar a eficiência desses processos ajuda a otimizar a gestão da água e reduzir os custos do sistema de abastecimento.	CAGECE	1
	Planejamento e Gestão de Secas	Avaliação periódica da situação e do desenvolvimento esperado das ações de resposta à seca	Esta ação deve ser realizada em todas as fases de seca para analisar se as ações estão gerando as respostas desejadas. Ela vai subsidiar o planejamento e a formulação de novas ações.	COGERH/CAGECE	1
		Planejamento de campanhas de informação	Uma grande restrição que existe no planejamento de resposta a seca é a falta de compreensão desse fenômeno por parte da população e muitas vezes, dos decisores políticos por isso, a sensibilização da opinião pública de um modo geral é importante para a eficácia dos esforços de preparação a seca.	CAGECE/SRH/COGERH	1
		Planejamento das ações da seca extrema	O planejamento permite definir regras de atuação e avaliar ações oportunas para mitigar a seca.	CAGECE/SRH/COGERH/CBH	1
		Elaboração de normas e decretos relativas ao grau de severidade seguinte(Seca Extrema)	A elaboração de normas e decretos é importante para regulamentar as ações que serão implementadas para solucionar os problemas de escassez hídrica e também para que as pessoas tomem consciência da gravidade desse problema e da necessidade de mudar a forma de utilizar esse recurso.	SRH/COGERH	1
		Avaliação do impacto econômico no sistema de abastecimento de água e esgoto e dar soluções	Esta ação visa avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de abastecimento e avaliar as perdas econômicas.	CAGECE	1
		Avaliação do impacto econômico no sistema de gestão de recursos hídricos e dar soluções	Esta ação é necessária para avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de gestão e avaliar suas perdas econômicas.	SRH/COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 15 - Estratégias de mitigação e resposta à severidade seca para o estado de Emergência II.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGÊNCIA II	Medidas preventivas	Avaliação periódica do consumo das localidades: disponibilidade quantitativa e qualitativa	Avaliar o problema do consumo em cada localidade inter-relacionando a disponibilidade hídrica com suas peculiaridades socioeconômicas e geoambientais.	CAGECE	1
		Monitoramento intenso da qualidade de água bruta	A ação de monitoramento é uma intensa atividade para acompanhar, vigiar e simultaneamente avaliar o ambiente com vistas a estabelecer diagnóstico de situação.	COGERH	1
		Monitoramento intenso da qualidade de água tratada	Esta ação visa monitorar constantemente a qualidade da água e avaliar o seu uso para consumo humano evitando a disseminação de doenças de veiculação hídrica.	CAGECE	1
		Monitoramento dos parâmetros hidrometeorológicos	Esta ação é necessária para avaliar a recarga dos reservatórios.	COGERH/FUNCEME	1
		Inventário das fontes alternativas de abastecimento	O levantamento dessas fontes é significativo para o suprimento hídrico da população bem como, para maximizar a eficiência do sistema hídrico.	SRH/COGERH	1
	Medidas de gestão e operação do sistema	Medidas para melhorar a eficiência da operação do sistema com redução de perdas aparentes e reais no sistema de água bruta e tratada	Essas medidas podem estar relacionadas com a redução de perdas no transporte e distribuição e com a implementação de hidrômetros. As perdas aparentes estão relacionadas com o consumo não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) e imprecisão dos hidrômetros. Enquanto que, as perdas reais estão associadas a vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição, vazamentos nos ramais prediais até o hidrômetros bem como, vazamentos e extravazamentos nos aquedutos e reservatórios de distribuição.	CAGECE /COGERH	1
		Funcionamento integrado e equilibrado das várias fontes de abastecimento	A integração deve cobrir todos os corpos de água doce, incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas considerando os aspectos quantitativos e qualitativos. Nesta ação inclui a manutenção de fontes alternativas de abastecimento.	SRH/COGERH	1
		Estabelece um quadro de informação e diálogo com as autoridades, usuários e instituições responsáveis por cada área	As autoridades, usuários e instituições gestoras devem ser informadas sobre alertas de seca mas, precisam ter vontade política para implementar uma resposta oportuna.	COGERH	1
	Medidas de caráter institucional	Intensificação das medidas de fiscalização (Normativo e operacional)	Elas devem incluir a fiscalização/inspeção, regras que definem penalidades para cada infração e arbitragem administrativas ou judiciais da punição (aplicação da pena) pois, sem ações de controle do uso da água a efetividade de sistema não será alcançada.	COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 16 – Continuação Quadro 15.

Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGÊNCIA II	Medidas de caráter legal e normativo	Decretos ou laudos de limitações ou restrições ao uso da água	A conservação da água também depende de uma série de leis e regulamentos que as autoridades podem implementar com vistas a punir ou restringir o usuário em relação ao uso não autorizado.	COGERH	1
		Intensificação das medidas para resolução de conflitos	Para minimizar os conflitos faz-se necessário uma gestão integrada e descentralizada que utilize como instrumento uma base de informações consolidada e que tenha a participação de todos os setores.	COGERH	1
		Atuar sobre a tarifa de água e esgoto (Multas)	O planejador pode atuar sobre a tarifa de água e esgoto como forma de induzir a população a reduzir o consumo. Assim, quanto menos o usuário utilizar a água, economizar e racionar, menor será o valor em sua conta de água.	CAGECE	1
	Medidas de impacto social	Intensificação das informações ao consumidor	A comunicação com a sociedade é um passo de grande importância para conscientizar a população quanto ao papel das instituições e dela mesma na conservação da água.	CAGECE	1
		Intensificação das informações para a mídia, destacando a suspensão de lava-jato, o corte por desperdício, multas e a suspensão de irrigação	A mídia será o meio de informar a população sobre a situação dos recursos hídricos e sobre as medidas que os órgãos gestores estão tomando para minimizar a escassez hídrica. Ela é um meio estratégico para uma comunicação eficiente.	CAGECE/COGERH	1
		Intensificação das campanhas educacionais com vista a redução do consumo	Estas campanhas ajudam a população a ter novos hábitos e condutas quanto ao consumo da água. Elas podem melhorar e aprofundar a sustentabilidade da oferta e demanda e a segurança da sociedade em relação à disponibilidade e vulnerabilidade. Assim, elas têm o caráter de sensibilização e conscientização e devem ser realizadas no dia-a-dia.	CAGECE	1
	Medidas de impacto ambiental	Interrupções Noturnas	Essa é uma das formas de reduzir o consumo de água e evitar a utilização de novas fontes de abastecimento que, muitas vezes, pode gerar prejuízos ambientais de grande alcance.	CAGECE	1
		Operação carro pipa em pontos críticos e periurbano	O uso do carro pipa é uma realidade e está intimamente associado ao problema da distribuição de água a populações rurais e urbanas habitam regiões vulneráveis às secas e que se encontram em situação ou estado de calamidade pública.	CAGECE	1
		Intensificação do racionamento	Tendo em vista o possível colapso no sistema abastecimento de água das cidades, o racionamento é uma medida essencial para a manter a disponibilidade hídrica.	CAGECE	1
		Controle das descargas residuais para os rios, dessalinização do oceano e Trens Pipa	As águas residuais poluentes são responsáveis pela degradação da qualidade de água e, consequentemente pela redução de água para consumo humano ou pelo aumento dos custos de tratamento da água e esgoto.	SRH/COGERH	1
		Reutilização de água e esgoto (obras de construção civil de adequação	Esta ação pode ser implantada em sistemas agropecuários como a agricultura irrigada e a aquicultura.	CAGECE	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 17 – Continuação Quadro 16.

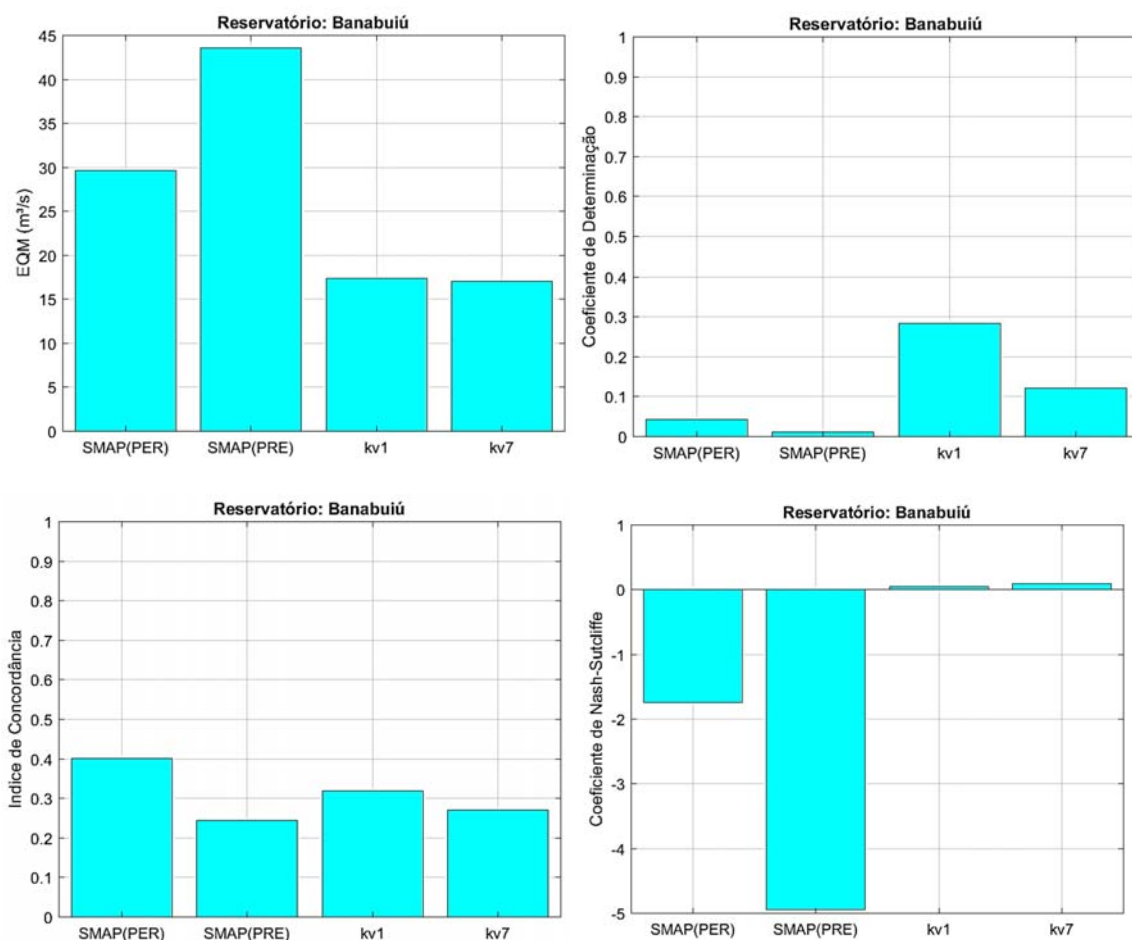
Estado	Classe	Tipo de Ação	Descrição	Responsável	Prioridade
EMERGÊNCIA II	Cumprimento dos objetivos de gestão de seca	Flexibilizar as exigências ambientais e reguladoras	Esta ação é necessária para agilizar as obras de infraestrutura hídrica.	SRH	1
		Aumento de recursos financeiros e humanos para lidar com a seca	No período de seca aumentam os gastos com a gestão, com o monitoramento e com o tratamento de água e os valores arrecadados são menores por isso, é necessário mobilizar recursos para a aplicação de medidas de prevenção e mitigação.	SRH/COGERH/CAGECE	1
		Intensificar as atividades do grupo de trabalho para controlar a situação em estado de seca severa	Aumentar a frequência das reuniões para monitorar as condições da seca severa.	SRH/COGERH/CAGECE/CBH	1
		Expansão da capacidade de produção de água subterrânea (Complexo Dunas/Barreiras)	Esta ação é um passo para integração de todas as fontes de abastecimento. Esta expansão requer a elaboração de mapas hidrogeológicos, de estudos de vulnerabilidade bem como do conhecimento da disponibilidade e da qualidade do recurso.	SRH	1
	Medidas de expansão e melhoria da infraestrutura e da disponibilidade hídrica	Implementação de obras de emergência	Uma seca de grande severidade exige a implementação de obras de emergência com a construção e instalação de adutoras de montagem rápida, ensecadeiras e a perfuração de novos poços para sustentar o abastecimento das cidades.	SRH	1
		Utilização das reservas estratégicas	As reservas estratégicas da RMF correspondem: (i) volume "morto" do Pacoti-Riachão (cota 31); (ii) volume "morto" do açude Gavião (cota 35,5); (iii) reservas do reservatório Aracoiaba; e (iv) volume do açude Castanhão a partir do nível de racionamento para o setor de irrigação.	COGERH	1
		Intensificação das medidas para tornar os processos de tratamento e purificação da água mais eficientes	Estes processos são a principal forma de reduzir as contaminações na água e torna-la potável, assim, aumentar a eficiência desses processos ajuda a otimizar a gestão da água e reduzir os custos do sistema de abastecimento.	CAGECE	1
		Avaliação da situação e do desenvolvimento esperado das ações de resposta à seca	Esta ação deve ser realizada em todas as fases de seca para analisar se as ações estão gerando as respostas desejadas. Ela vai subsidiar o planejamento e a formulação de novas ações.	SRH/COGERH	1
	Planejamento e Gestão de Secas	Avaliação do impacto econômico no sistema de abastecimento de água	Esta ação visa avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de abastecimento e avaliar as perdas econômicas.	CAGECE	1
		Avaliação do impacto econômico no sistema de gestão de recursos hídricos	Esta ação é necessária para avaliar o impacto da seca sobre o faturamento da companhia de gestão e avaliar suas perdas econômicas.	SRH/COGERH	1

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE C

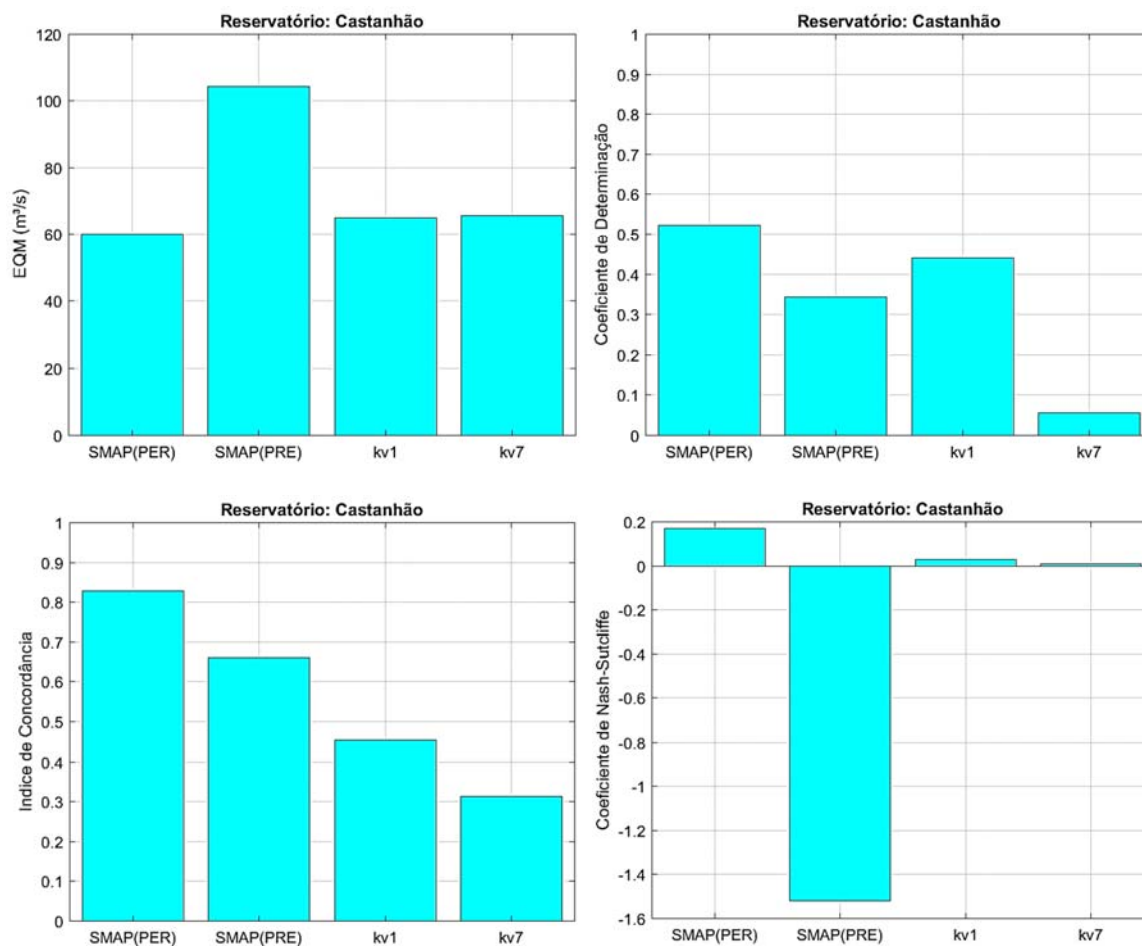
Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos

Figura 13 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Banabuiú.



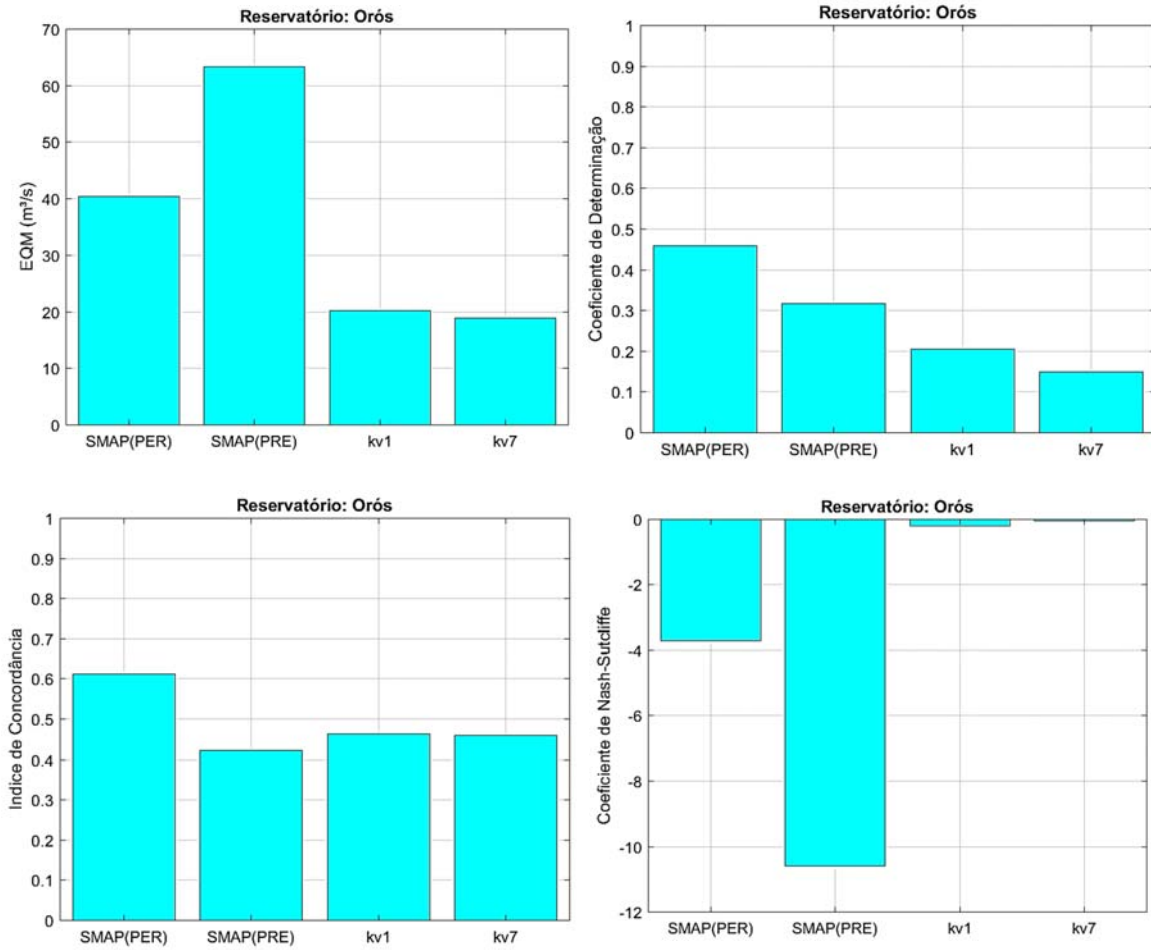
Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Castanhão.



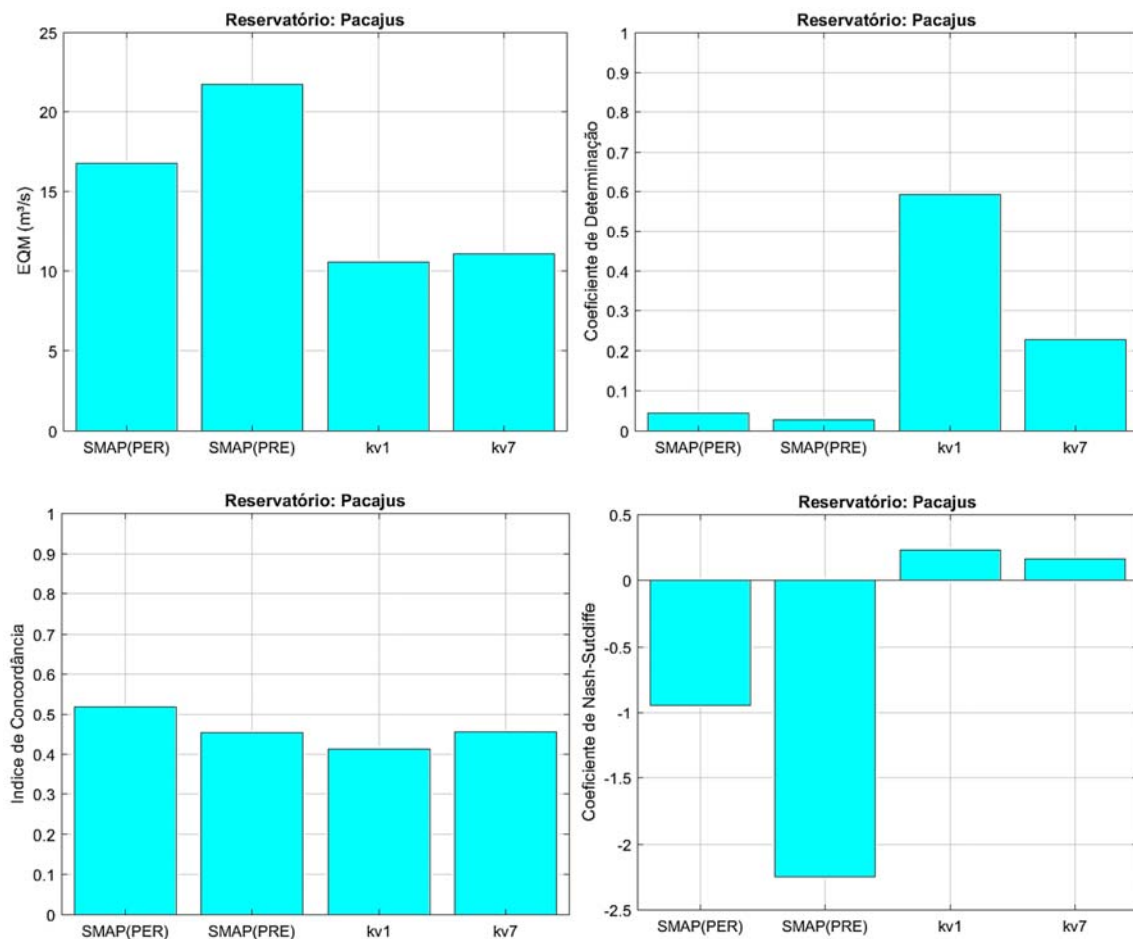
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Orós.



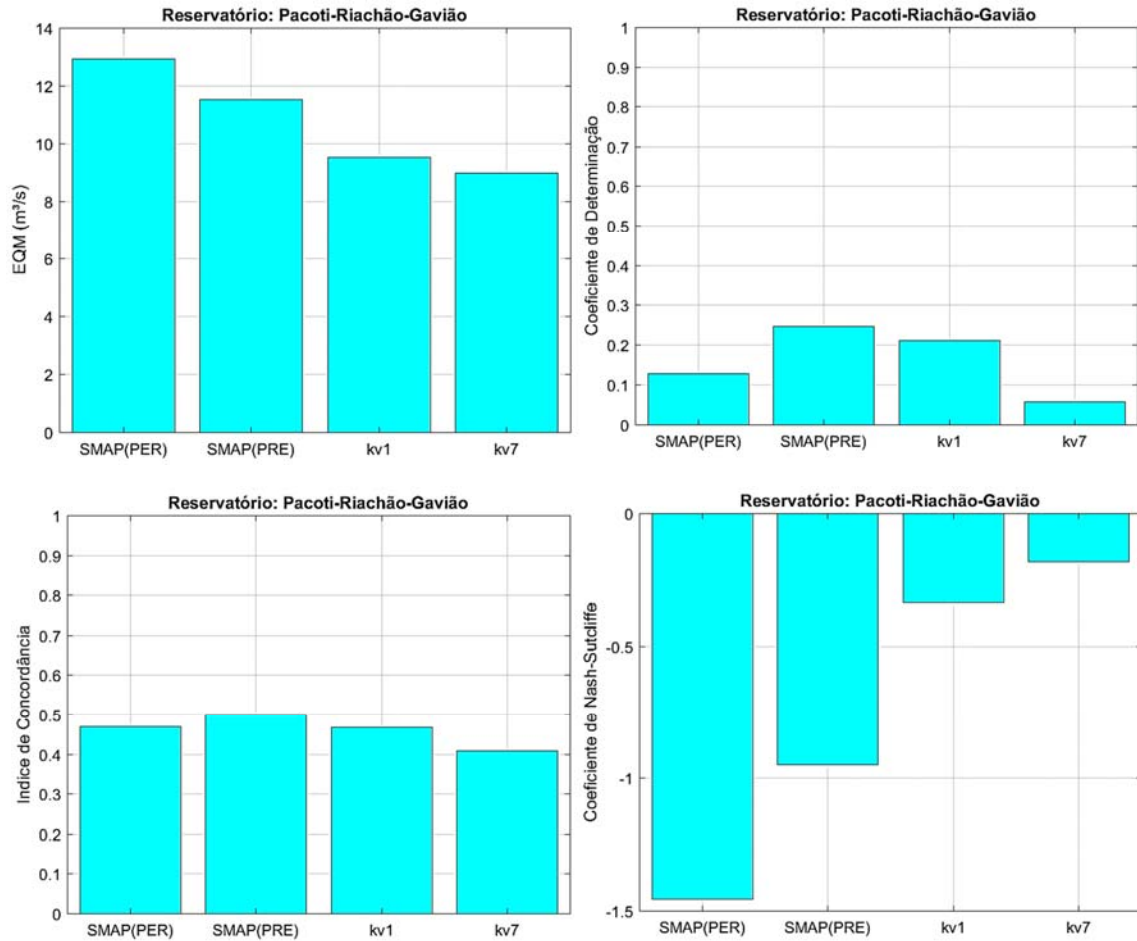
Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o reservatório Pacajus.



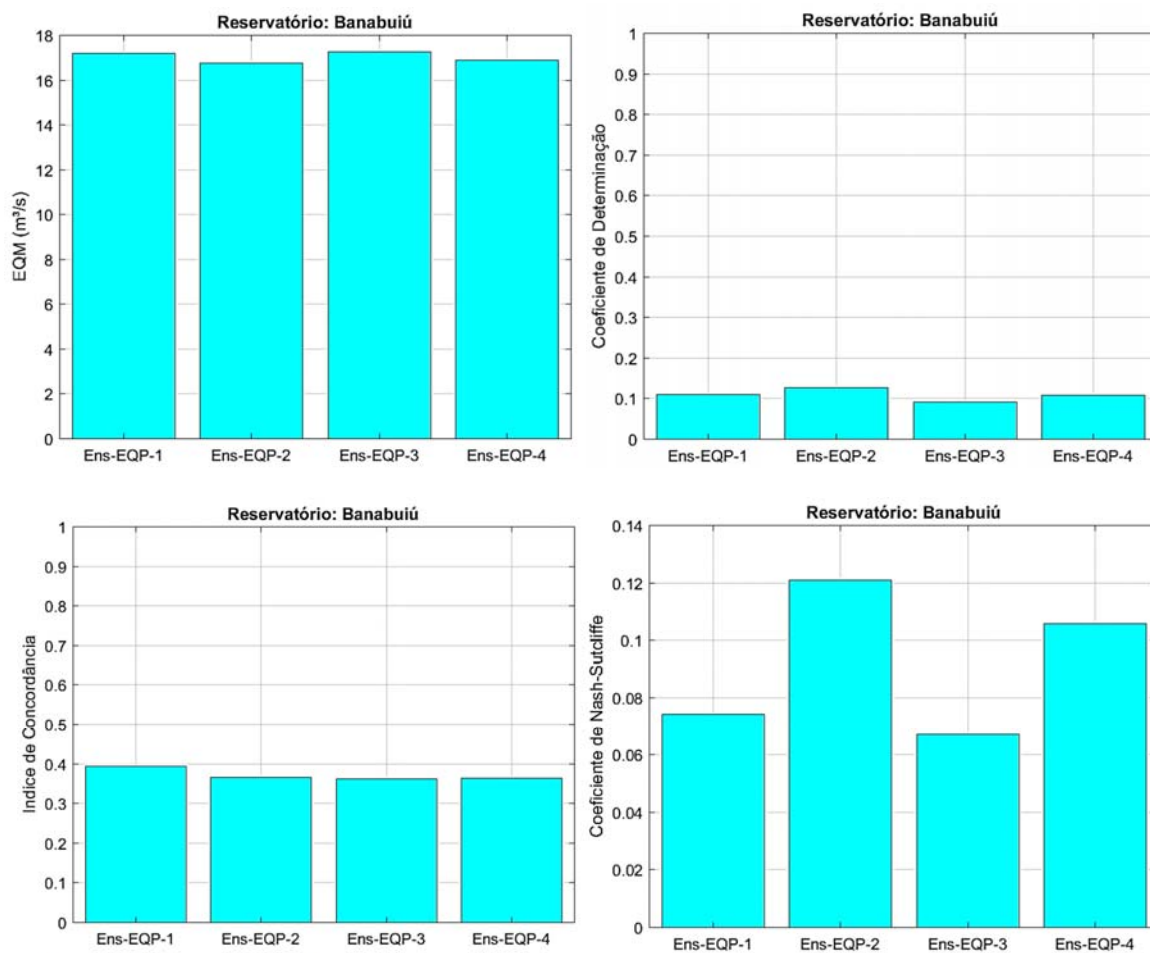
Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Índices de desempenho dos modelos dinâmicos e estatísticos para o conglomerado Pacoti, Riachão e Gavião.



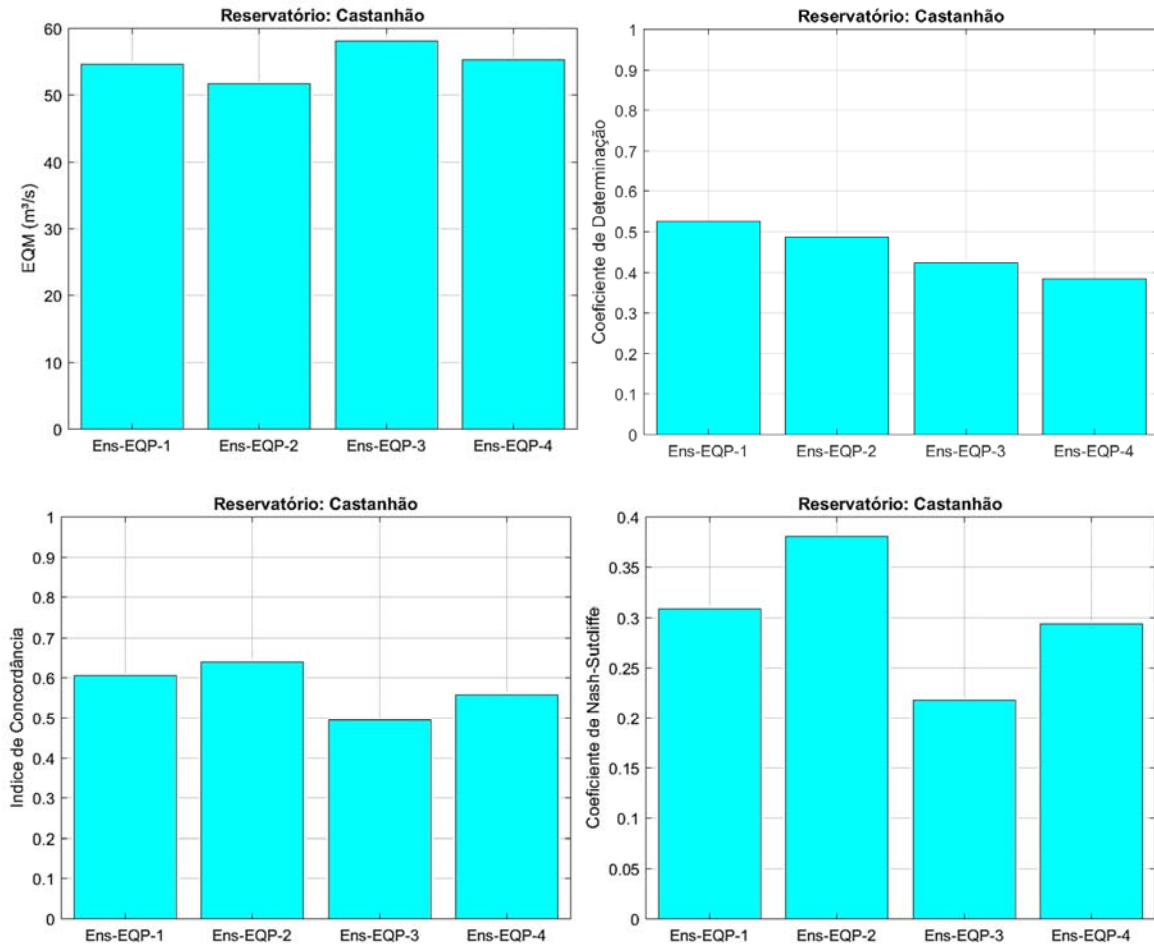
Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE D

Índices de desempenho para técnica de *pooled ensemble*Figura 28 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do *pooled ensemble* para o reservatório Banabuiú.

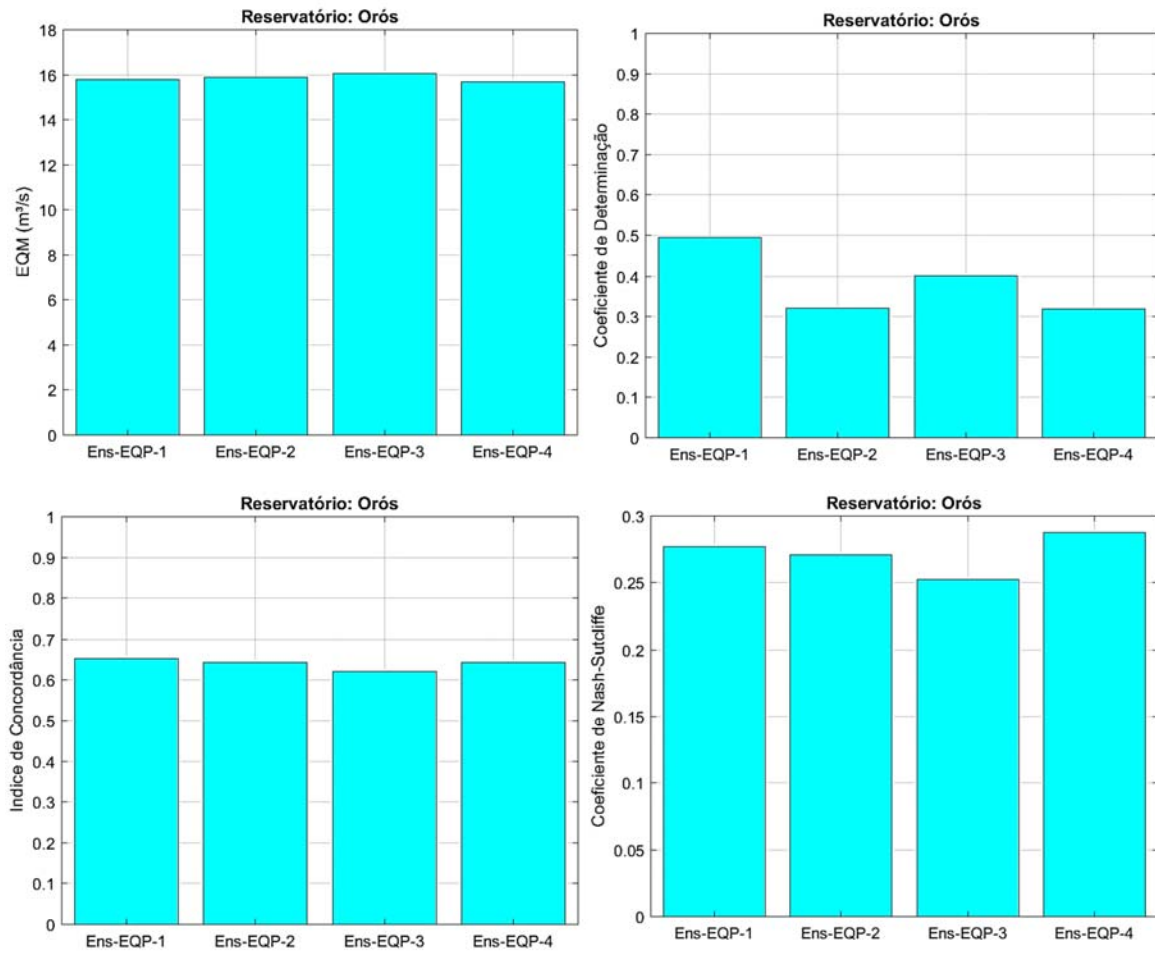
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do *pooled ensemble* para o reservatório Castanhão.



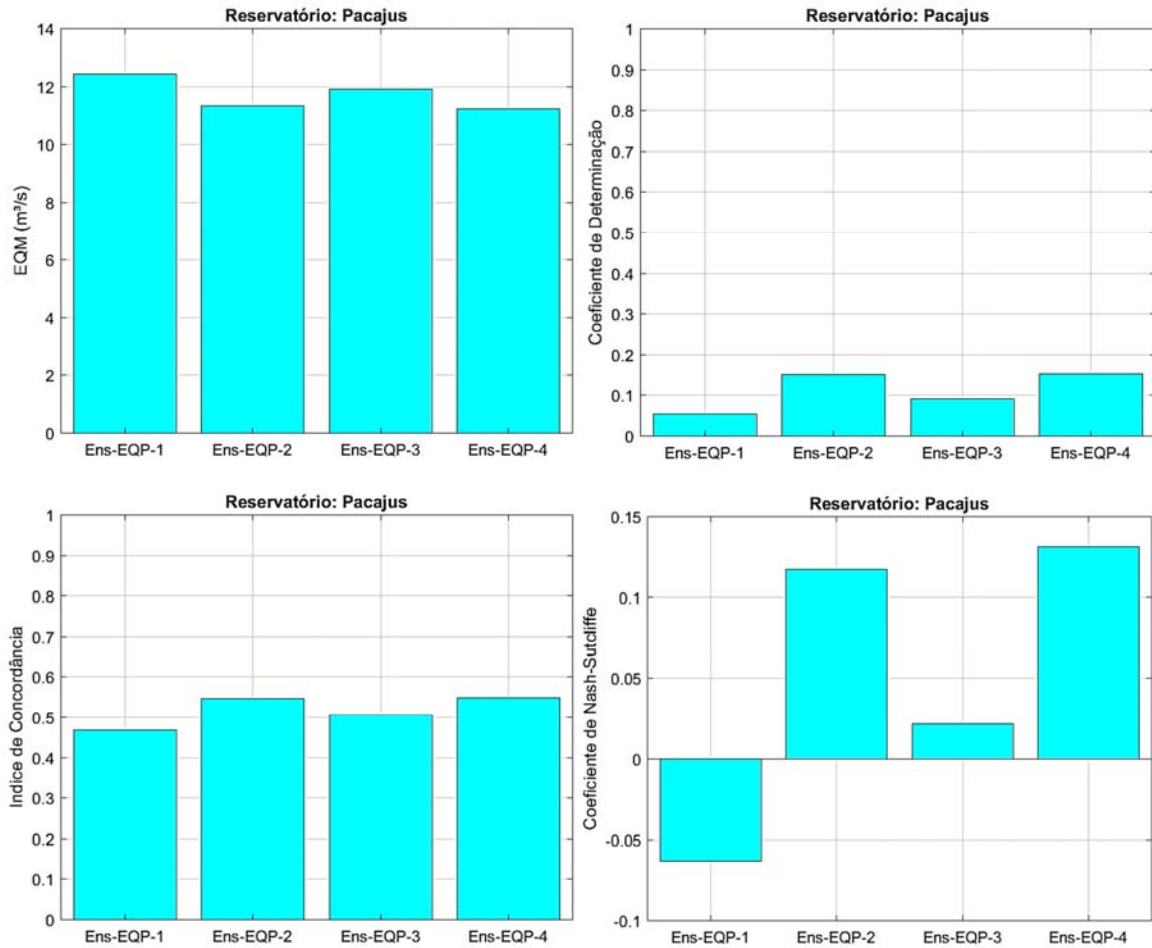
Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do *pooled ensemble* para o reservatório Orós.



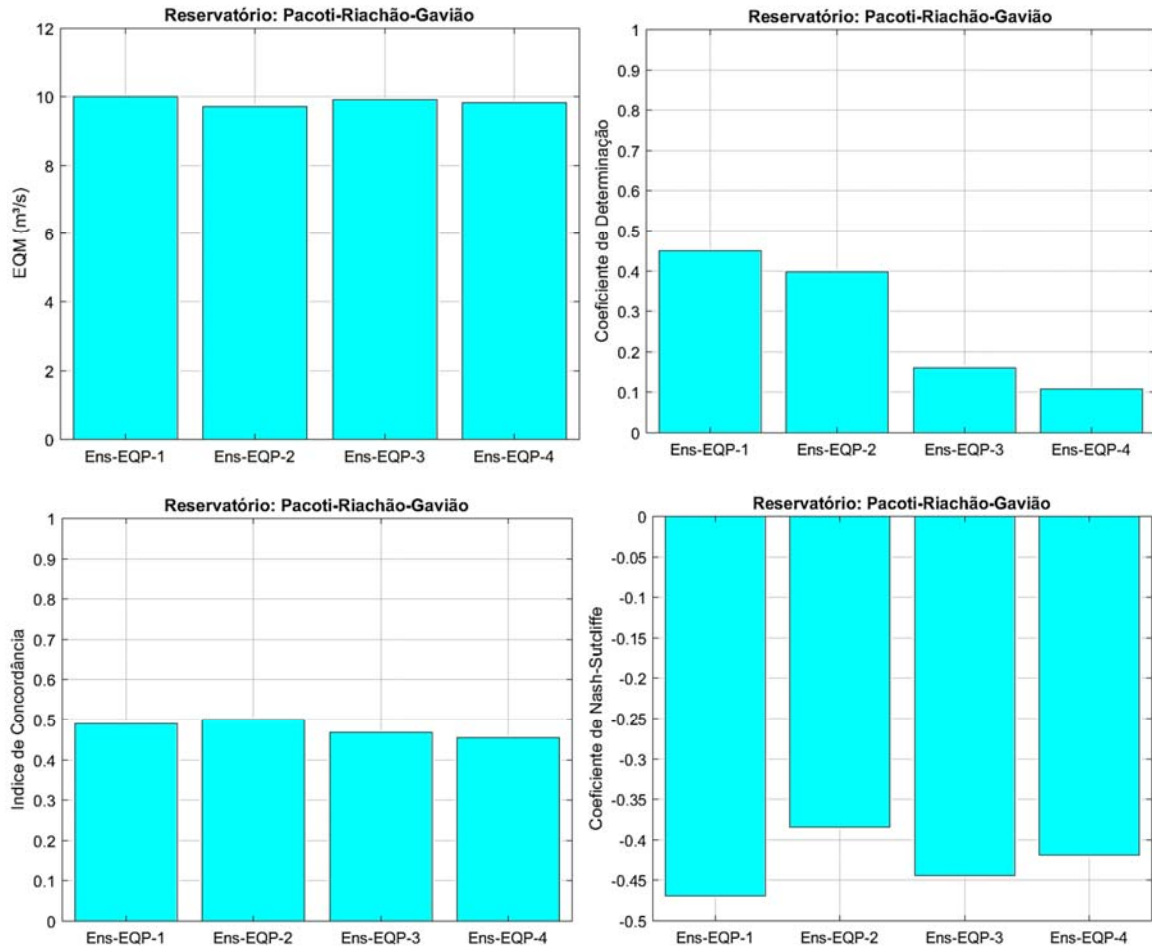
Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do *pooled ensemble* para o reservatório Pacajus.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Índices de desempenho das configuração de agrupamento do *pooled ensemble* para os reservatórios Pacoti-Riachão-Gavião.



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE E

**Resultados das probabilidades de ocorrências futuras dos cenários de operação
tática**

Tabela 27 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2004 e 2008 para o Jaguaribe.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2004	1	0,00	0,00	0,11	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,32	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,34	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	1,00	1,00	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2005	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2007	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	1	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2009 e 2013 para o Jaguaribe.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2009	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2012	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2013	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 29 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2014 e 2015 para o Jaguaribe.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2014	1	0,00	0,00	0,45	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,55	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2015	1	0,00	0,00	0,12	0,18	-	-	-	-
	2	0,00	0,00	0,28	0,35	-	-	-	-
	3	1,00	1,00	0,47	0,33	-	-	-	-
	4	0,00	0,00	0,13	0,13	-	-	-	-
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 30 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2004 e 2008 para o Metropolitano.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2004	1	1,00	1,00	0,52	0,52	1,00	1,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,17	0,26	0,00	0,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,23	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,08	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2005	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,19	0,21	1,00	1,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,11	0,13	0,00	0,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,33	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	1	0,00	0,00	0,31	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,30	0,21	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,18	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,18	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
2007	1	0,00	0,00	0,39	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,12	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,13	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,29	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	1	0,00	0,00	0,54	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,21	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	1,00	1,00	0,14	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 31 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2009 e 2013 para o Metropolitano.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2009	1	0,00	0,00	0,54	0,59	1,00	1,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,24	0,22	0,00	0,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,10	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
2010	1	1,00	1,00	0,52	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,31	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	1	0,00	0,00	0,54	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,20	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00
	3	0,00	0,00	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,08	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
2012	1	0,00	0,00	0,50	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,11	0,07	0,00	0,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,08	0,08	1,00	1,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2013	1	0,00	0,00	0,32	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,14	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,12	0,14	0,00	0,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,31	0,20	1,00	1,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32 – Probabilidades de ocorrências observadas e futuras do Nrac entre 2014 e 2015 para o Metropolitano.

Ano	Nrac	Janeiro (Monitoramento)		Junho (Previsão)		Junho (Monitoramento)		Janeiro (Previsão)	
		Cenário1	Cenário2	Cenário1	Cenário2	Cenário3	Cenário4	Cenário3	Cenário4
2014	1	0,00	0,00	0,17	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	1,00	1,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,08	0,12	0,00	0,00	1,00	1,00
	4	0,00	0,00	0,12	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,55	0,45	1,00	1,00	0,00	0,00
2015	1	0,00	0,00	0,13	0,13	-	-	-	-
	2	0,00	0,00	0,12	0,18	-	-	-	-
	3	1,00	1,00	0,07	0,07	-	-	-	-
	4	0,00	0,00	0,12	0,12	-	-	-	-
	5	0,00	0,00	0,57	0,50	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

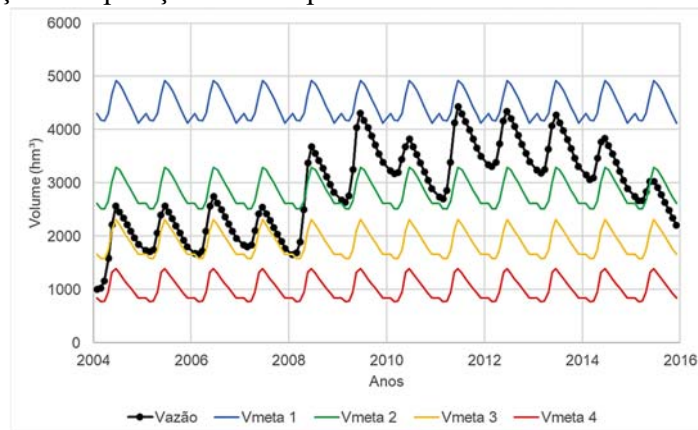
APÊNDICE F

Operação contínua idealizada para os cenários de previsão do SJM

Neste apêndice a análise a análise do modelo de operação foi feita com as vazões medianas dos membros de cada conjunto de *ensemble*. Assim, a operação dos sistemas equivalentes para o Cenário 1 apresentaram evolução conforme a Figura 39(REJ) e Figura 40 (REM). O reservatório Jaguaribe iniciou a operação com volume no estado de Emergência I ou NM 4 e tendeu a diminuir o grau de severidade da seca passando para o estado de Alerta ou NM 3 ainda no ano de 2004, diminuindo o nível de racionamento (Nrac) a qual o sistema estava sujeito de 4 para 3, passando a ficar nesse NM até abril de 2008 quando passa para o NM 2, mantendo o Nrac 3 até junho de 2008, quando ocorre uma nova tomada de decisão e o Nrac é diminuído para 2, permanecendo o NM 2 e o Nrac 2 até junho de 2015 quando há um aumento no grau de severidade da seca e do Nrac simultaneamente.

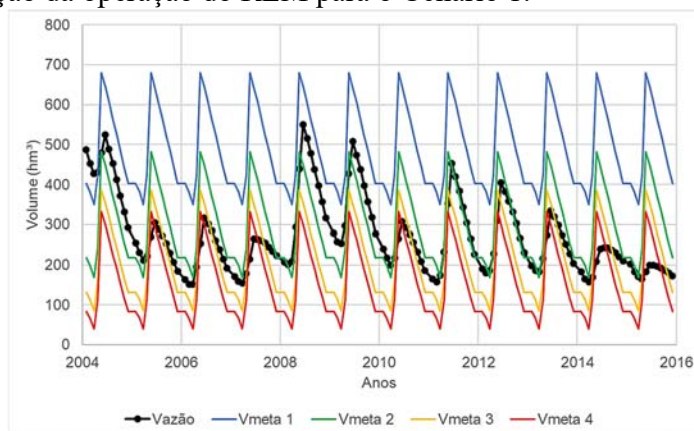
O reservatório Metropolitan iniciou a operação no NM 1, isto é, em estado de normalidade, e Nrac 1 indicando nenhum racionamento para RMF permanecendo assim até junho de 2004 quando o Nrac é alterado para 2, sendo que o NM já tinha passado para 2 em maio. O NM 2 permanece até dezembro de 2005 quando sofre alterações sucessivas de estado de seca até junho de 2006 quando nova decisão é tomada e o Nrac passa a ser definido como 4 indicando que a RMF teria que racionar 20% da sua demanda total. A evolução da operação mostra mudanças repentinas e abruptas tanto do NM como do Nrac, terminando o últimos mês de simulação da operação com NM e Nrac 5 indicando um racionamento severo de 60% da demanda região. Ressalta-se que nesse cenário nenhum reservatório atingiu o colapso.

Figura 39 – Evolução da operação do REJ para o Cenário 1.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Evolução da operação do REM para o Cenário 1.



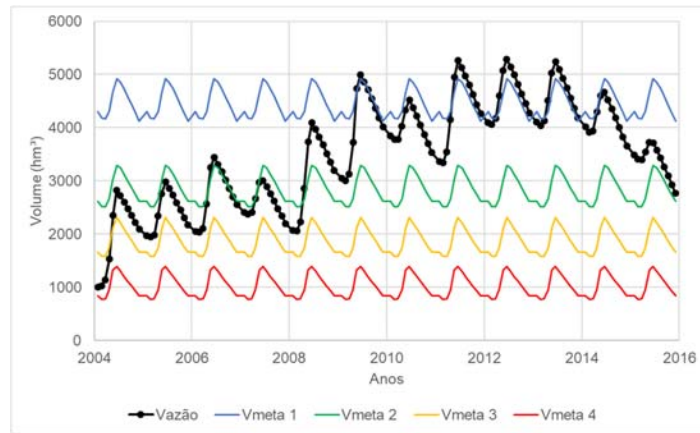
Fonte: Elaboração própria.

A operação para o Cenário 2 apresentou evolução conforme a Figura 41 (REJ) e Figura 42 (REM). O reservatório Jaguaribe, assim como no Cenário 1, iniciou a operação no NM 4 e com Nrac 4, a evolução da operação mostrou transição no Nrac em apenas 12 vezes enquanto o NM se alterou 14, indicando que o sistema poderia sofrer racionamentos mais vezes que o necessário caso não se adotasse uma regra de operação com aversão ao risco.

Comparando com a evolução do Cenário 1 para o Jaguaribe, tem-se que o Cenário 2 permaneceu menos tempo em estados de Pré-Alerta (NM 2) e mais tempo em estado de normalidade (NM 1) do que no Cenário 1 que nem se quer atingiu o estado de normalidade, indicando uma frequência de tempo menor para o Cenário 2 em estados de maior severidade de seca.

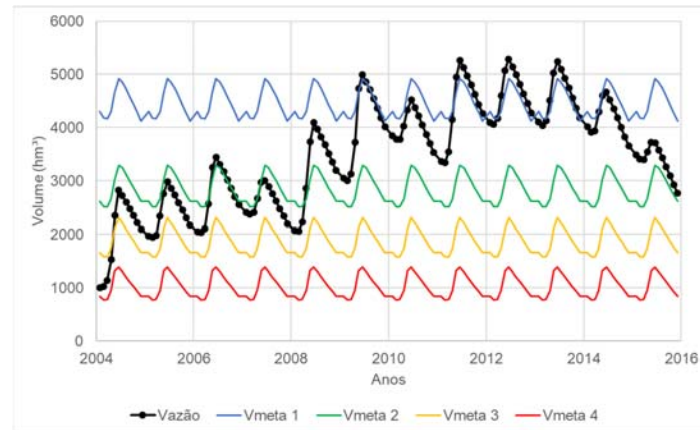
Para o reservatório Metropolitano, o Cenário 2 (Figura 42) apresentou durante o tempo de simulação da operação transição de 16 vezes do Nrac enquanto o NM se modificou 46, isso mostra que o problema de não se adotar um regra de operação com aversão ao risco é ainda maior para a região metropolitana. Nesse cenário o REM atingiu o colapso em no início de 2015 quando o Nrac encontrava-se em 3, mostrando que mesmo aplicando uma regra aversa ao risco na operação faz-se necessário outras medidas de preparação e mitigação dos impactos da seca com um abordagem proativa que serão apresentadas como resultados dessa tese.

Figura 41 – Evolução da operação do REJ para o Cenário 2.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 42 – Evolução da operação do REM para o Cenário 2.



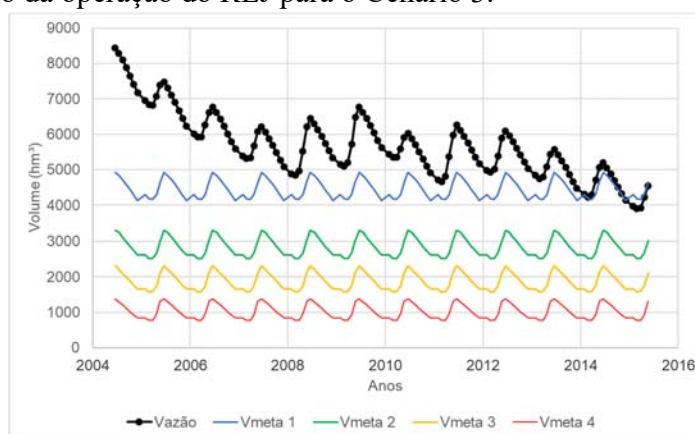
Fonte: Elaboração própria.

Para o Cenário 3, a operação apresentou evolução conforme a Figura 43 (REJ) e Figura 44 (REM). O REJ iniciou a operação em junho de 2004 em estado de normalidade permanecendo assim até janeiro de 2014 quando passa para o estado de Pré Alerta e Nrac 2, voltando no mês seguinte para o NM 1 e permanecendo com Nrac 2 até a nova tomada de decisão que ocorre em junho de 2014 quando Nrac volta a ser 1. Esse novo período de normalidade tanto do NM com Nrac dura até janeiro de 2015 quando a tomada de decisão define o nível 2 tanto para o NM como para o Nrac. Ressaltasse que no Nrac 1 e 2 a porcentagem da demanda racionada é nula entretanto altera a transferência de água entre as bacias.

Comparando com a evolução do Cenário 1 e 2 para o Jaguaribe, nota-se que o Cenário 3 é otimista, característico de anos chuvosos em que a população não precisa se preocupar com a economia de água.

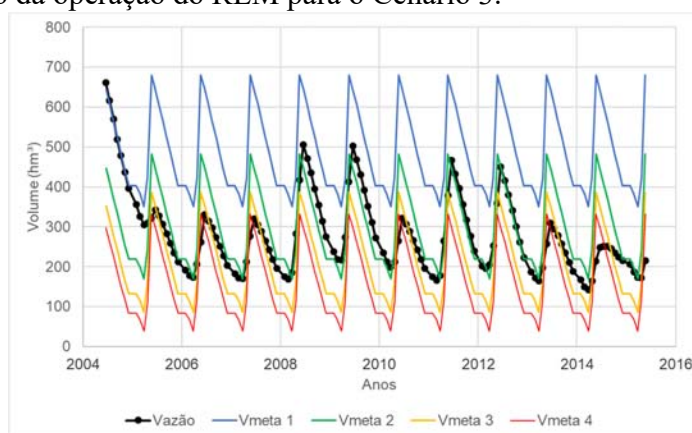
Para o reservatório Metropolitano, o Cenário 3 (Figura 44) apresentou cerca de 40 transições do NM enquanto o Nrac alterou-se apenas 18, nota-se ainda que mesmo em um cenário otimista a evolução da operação mostrou que reservatório tende a passar mais tempo nos estados de Pré-Alerta, Alerta e Emergência, mostrando o alto grau de susceptibilidade da RMF a deficiência hídrica.

Figura 43 – Evolução da operação do REJ para o Cenário 3.



Fonte: Elaboração própria.

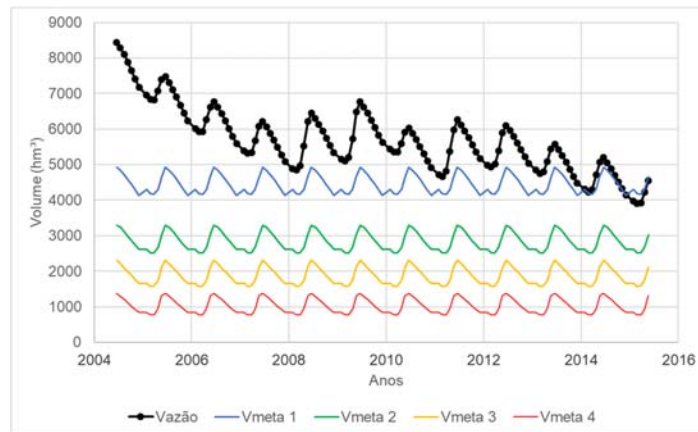
Figura 44 – Evolução da operação do REM para o Cenário 3.



Fonte: Elaboração própria.

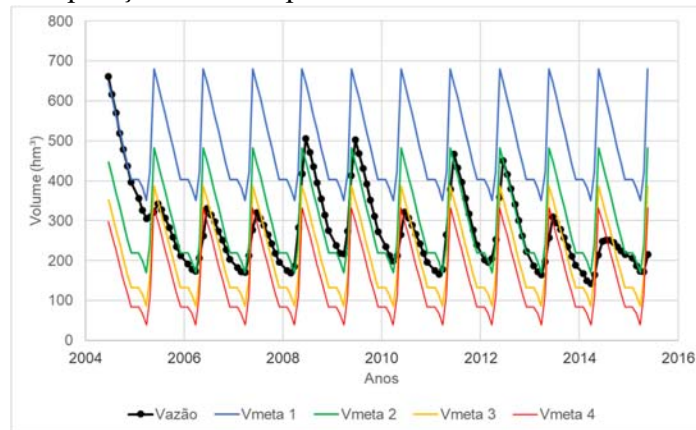
Para o Cenário 4, a operação evoluiu conforme a Figura 45 (REJ) e Figura 46 (REM). Verificou-se para esse cenário que a evolução da operação tanto do REJ como do REM é idêntica ao do Cenário 3, apesar das vazões previstas de entrada serem distintas a diferença de valores entre elas não foi capaz de modificar a operação.

Figura 45 – Evolução da operação do REJ para o Cenário 4.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 – Evolução da operação do REM para o Cenário 4.



Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE G

Resultados da matriz de transição da operação contínua do SMJ

A análise dos resultados de transição entre os níveis de seca foi feita a partir de uma matriz de transição dos níveis de racionamento dos sistemas de reservatórios, que servirá de indicador do estado de seca. A linha da matriz de transição indica o estado atual e a coluna o estado subsequente. A Tabela 33 mostra uma representação da probabilidade de transição entre estados de seca. Baseada nessa matriz de transição é possível calcular o variáveis como probabilidade de ocorrência, tempo de permanencia e tempo de recorrência que seram aqui apresentadas de maneira pontual.

Tabela 33 – Matriz simbólica da probabilidade de transição entre os estados de seca.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	P1,1	P1,2	P1,3	P1,4	P1,5
	Pré-Alerta	P2,1	P2,2	P2,3	P2,4	P2,5
	Alerta	P3,1	P3,2	P3,3	P3,4	P3,5
	Emergência I	P4,1	P4,2	P4,3	P4,4	P4,5
	Emergência II	P5,1	P5,2	P5,3	P5,4	P5,5

Fonte: Elaboração própria

As mudanças dos estados de secas indicados pelo Nrac do REJ e REM, para o Cenário1, podem ser vistos na matriz de probabilidade de transição de níveis apresentados na Tabela 34 e na Tabela 35.

Tabela 34 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 1 para o REJ.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,00	0,99	0,01	0,00	0,00
	Alerta	0,00	0,00	0,98	0,02	0,00
	Emergência I	0,00	0,10	0,10	0,80	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

No REJ verificou-se que a probabilidade de se atingir o estados de normalidade e de Emergencia II é nula, porém há 10% de chance do sistema está no estado de Pré-Alerta e aumentar o seu grau de severidade passando para o estado de Alerta. A probabilidade de seca se agravar passando do estado de Alerta para o estado de Emergência é de 20% . Através dessa matriz de transição calculou-se que o tempo de residência do estado de Pré-Alerta é de 84 meses, do Alerta 49 meses e do Emergência I apenas 5 meses.

Tabela 35 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 1 para o REM.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,00	0,93	0,02	0,05	0,00
	Alerta	0,00	0,04	0,85	0,04	0,06
	Emergência I	0,00	0,00	0,14	0,86	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,10	0,00	0,90

Fonte: Elaboração própria

No REM a probabilidade de sair do estado Normal para o de Pré-Alerta é de 20%, sendo esta a maior probabilidade de transição entre os estados. Verificando a capacidade de recuperação do sistema , tem-se que a probabilidade de está no estado de Emergência II e ir para o Alerta é de 10 % enquanto que saindo de Emergência I é de 14%, mostrando que o sistema tem melhor capacidade de recuperação quando encontra-se em níveis de seca menos severos. A probabilidade de ocorrência dos estados de seca no Cenário 1 para REM é de 3%, 30%, 33%, 19% e 15% para os estados Normal, Pré-Alerta, Alerta, Emergência I e Emergência II, respectivamente. O tempo médio de duração na mesma categoria para o estado de normalidade é 5 meses, para o Pré-Alerta aproximadamente 14 meses, para o Alerta é 7 meses, Emergência I 7 meses e Emergência II 10 meses.

As transições dos estados de secas do REJ e REM, para o Cenário 2, podem ser vistos na matriz de probabilidade de transição de níveis apresentados na Tabela 36 e na Tabela 37.

Tabela 36 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 2 para o REJ.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,86	0,14	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,06	0,93	0,01	0,00	0,00
	Alerta	0,00	0,05	0,95	0,00	0,00
	Emergência I	0,00	0,00	0,20	0,80	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Nesse cenário no REJ registrou-se, uma probabilidade de transição de 20% na recuperação do estado de Emergência I para o estado de Alerta, de 5% do Alerta para o Pré-Alerta e de 6% do Pré-Alerta para o Normal. A probabilidade de permanência mais alta em um estado de seca é o do Nrac 4 (Emergência I) com 16% de chance não se alterar enquanto a probabilidade de ocorrência deste é de 3%, mostrando que apesar da baixa ocorrência quando ocorre ele é persistente. O tempo médio para sair do estado inicial *i* e retornar a essa classe, foi de 4 meses para o estado de normalidade, 2 meses para o estado de Pré-Alerta e 6 meses para o estado de Alerta, implicando em uma frequência maior de retorno ao estado de Pré-Alerta, o estado de Emergência I após transitar de classe não retorna a ela até o final da operação e o estado de Emergência II nem se que chega a ocorrer.

Tabela 37 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 2 para o REM.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,00	0,93	0,02	0,02	0,02
	Alerta	0,00	0,04	0,89	0,06	0,02
	Emergência I	0,00	0,00	0,14	0,86	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,14	0,00	0,86

Fonte: Elaboração própria

Em relação ao REM, no Cenário 2, observa-se uma maior probabilidade de ocorrência do estado de Alerta com 38% de chances de ocorrer, entretanto o estado de Pré-Alerta é o que tem maior tempo de residência com aproximadamente 14 meses sendo a probabilidade de ocorrência desse nível de 30% indicando que apesar de o estado Alerta ter menos chances de ocorrer, o tempo médio de duração nesse estado é maior. Em relação aos estados em que a seca propriamente ocorre, tem que o tempo de residência no estado de Alerta é de 9 meses, nos estados de Emergência I e II é de 7 meses. Através da matriz mostrada na Tabela 37 ainda é possível extrair a probabilidade de transições bruscas de estado, como por exemplo, a probabilidade de 2% sair de um estado de Pré Alerta para um estado de Emergência II.

As matrizes de transições com suas respectivas probabilidades dos estados de secas do REJ e REM, para o Cenário 3 (cenário mais otimista), podem ser vistas na Tabela 38 e na Tabela 39.

Tabela 38 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 3 para o REJ.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,98	0,02	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,11	0,89	0,00	0,00	0,00
	Alerta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Emergência I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria

Pela matriz de transição de estados do REJ observou-se que não houve ocorrência de seca propriamente dita, as únicas transições que ocorreram foi a do estado Normal para Pré Alerta com 2% de chance, e a de Pré Alerta para Normal com uma probabilidade de 11%, Extraí-se ainda que a probabilidade de ocorrência é de 92% para o estado de normalidade e 8% para o estado de Pré-Alerta.

Em relação ao REM, no Cenário 3 observa-se uma probabilidade de de transição de 5% do estado de Pré Alerta para o Alerta e também uma probabilidade de 5% de transição para o estado de Emergência I, somando as duas tem-se a probabilidade de se atingir estados de secas mais severos partindo do estado de Pré Alerta. Saindo do Estado de Alerta, tem-se que a probabilidade

de se chegar a estados mais severos é de 11%. Em relação a recuperação do sistema, tem-se que probabilidade total de sair do nível mais crítico para o estado de Alerta é de 14%, sendo o mesmo valor para sair do estado de Emergência I e ir para o Alerta.

Tabela 39 – Matriz de probabilidade de transição entre os estados de seca do Cenário 3 para o REM.

Estados de Seca		Mês 't+1'				
		Normal	Pré-Alerta	Alerta	Emergência I	Emergência II
Mês 't'	Normal	0,86	0,14	0,00	0,00	0,00
	Pré-Alerta	0,00	0,91	0,05	0,05	0,00
	Alerta	0,00	0,08	0,82	0,08	0,03
	Emergência I	0,00	0,00	0,14	0,86	0,00
	Emergência II	0,00	0,00	0,14	0,00	0,86

Fonte: Elaboração própria

Pelas análises realizadas, extrai-se que no Jaguaribe houve uma maior probabilidade de transição de níveis de seca mais severas para níveis mais amenos, em todos os cenários analisados, indicando a boa capacidade de recuperação desse sistema frente a ocorrência de secas. Dos cenários ainda é possível concluir que o estado de Pré Alerta é o mais provável tanto no Cenário 1 como no Cenário 3, para o Cenário 2 o estado de normalidade tende a ser o mais provável.

Na Metropolitana ocorre o contrário, a uma maior tendência de piora da severidade da seca e menor tempo de residência principalmente nos estados mais próximos a normalidade. Conclui-se ainda que regra de operação utilizada tenta estabilizar o REM no estado Alerta, sendo independente de se ter cenário mais otimista (Cenário 3) ou cenário mais pessimista (Cenários 1 e 2).