

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

HÁLISON FERNANDES BEZERRA DANTAS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DOS SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DOS MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO NORTE: UMA
APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM
UM CONTEXTO DE ESCASSEZ HÍDRICA.

NATAL

2018

HÁLISON FERNANDES BEZERRA DANTAS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DOS SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DOS MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO NORTE: UMA
APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS EM
UM CONTEXTO DE ESCASSEZ HÍDRICA.

Dissertação de mestrado apresentado à Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Engenharia de Produção
Subárea: Pesquisa Operacional e Logística

Orientadora: Prof^a. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida

NATAL

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DOS SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DOS MUNICÍPIOS DO RIO GRANDE DO NORTE:
UMA APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE
DADOS EM UM CONTEXTO DE ESCASSEZ HÍDRICA.**

Por

HÁLISON FERNANDES BEZERRA DANTAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO NORTE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE

MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

FEVEREIRO, 2018

**@2018 HÁLISON FERNANDES BEZERRA DANTAS
TODOS OS DIREITOS RESERVADOS**

O autor aqui designado concede ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte permissão para reproduzir, distribuir e comunicar ao público em geral, em papel ou meio eletrônico, esta obra no todo ou em parte, nos termos da lei.

Assinatura do autor:

Prof. Dr. Mariana Rodrigues de Almeida – Presidente

Prof. Dr. Jose Alfredo Ferreira costa – Examinador interno ao programa

Prof. Dr. José Mayrton Figueiredo de França – Examinador externo à instituição

Prof. Dr. Anne Emília Costa Carvalho – Examinador Externo ao Programa

Reitora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof^a. Dr^a. Ângela Paiva Cruz

Diretor do Centro de Tecnologia

Prof. Dr. Luiz Alessandro Pinheiro da Câmara de Queiroz

Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González

Orientação

Prof^a. Dr^a. Mariana Rodrigues de Almeida

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Dantas, Hálison Fernandes Bezerra.

Avaliação da eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água dos municípios do Rio Grande do Norte: uma aplicação do modelo dinâmico da análise envoltória de dados em um contexto de escassez hídrica / Hálison Fernandes Bezerra Dantas. - 2021.

116 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Natal, RN, 2021.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida.

1. Recursos hídricos - Dissertação. 2. Água - Dissertação. 3. Dynamic Model Data Envelopment Analysis - Dissertação. I. Almeida, Mariana Rodrigues de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.1

Aos meus pais, Francisco Dantas Junior e Antônia Bezerra da Silva, por todo o amor, cuidado, sacrifício e dedicação. Meus maiores exemplos de vida, educação e honestidade.

À minha irmã, Haila Fernanda Bezerra Dantas, como forma de incentivá-la a trilhar caminhos brilhantes.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco Dantas Junior e Antônia Bezerra da Silva, por serem exemplos de caráter, sinônimos de dedicação e pelo amor incondicional. Por todo o sacrifício e pelas diversas dificuldades que enfrentaram por mim. Por tudo que já fizeram, fazem e irão fazer para que eu me torne uma pessoa cada vez melhor.

À minha irmã, Haila Fernanda Bezerra Dantas, pelo amor e companheirismo. Por ser um pedaço meu fora de mim.

Ao meu grande amor, minha avó, Francisca Dantas de Medeiros, pelo exemplo de fortaleza, generosidade, pelo grande amor, dedicação e torcida. Amo-te! Aos demais familiares, por se fazerem meu alicerce, pela força, pelos incentivos, sorrisos e apoio emocional.

À Izaac Paulo Costa Braga por estar sempre ao meu lado e pelo companheirismo durante toda esta jornada. Além disso, agradeço de forma especial à Maria Lúcia Fátima Costa e demais familiares, por terem me acolhido em sua família, pelo carinho e ajuda.

À todos os meus amigos, sem exceção, que sempre estiveram ao meu lado, fazendo-me uma pessoa mais feliz. Pelos bons momentos, pelas partilhas, conselhos e todo o suporte.

Aos professores do mestrado, pelos conhecimentos repassados, e à toda equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRN, por todo o suporte durante o curso.

À minha orientadora, Mariana Rodrigues de Almeida, pela sua atenção, presteza e disponibilidade em contribuir com minha formação acadêmica e conclusão deste trabalho. Por acreditar no meu potencial e pelos incentivos nos momentos mais difíceis.

Aos Professores Dr^a. Anne Emília Costa Carvalho e Dr. José Mairton Figueiredo de França pela disponibilidade em ajudar, tempo empenhado e por acreditarem no meu sonho. O auxílio de vocês foi essencial para a conclusão deste trabalho.

“Quando a circunstância é boa, devemos desfrutá-la; quando não é favorável devemos transformá-la e quando não pode ser transformada, devemos transformar a nós mesmos.”

(Viktor Frankl)

DANTAS, Hálison Fernandes Bezerra. **Avaliação da eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água dos municípios do Rio Grande do Norte: uma aplicação do modelo dinâmico da Análise Envoltória de Dados em um contexto de escassez hídrica.** 116 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2018.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor um modelo para avaliar o sistema de abastecimento de água dos municípios potiguares, que são atendidos pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), na operacionalização dos recursos em anos de estiagem (2010-2015) por meio de uma modelagem dinâmica. O cenário de insustentabilidade observado nas reservas de água é resultado da falta de conscientização e do uso desenfreado dos recursos hídricos. O crescimento populacional e as mudanças climáticas agravam, ainda mais, esse cenário. Os efeitos negativos da falta de água estão presentes em todo o território nacional, sobretudo na região semiárida, onde os impactos são observados de forma mais acentuada. Assim, será utilizado o modelo Dinâmico da Análise Envoltória de Dados para avaliar o contexto apresentado durante uma janela temporal de 5 anos e medir o potencial das perdas como fontes de ineficiência. A amostra contempla 155 municípios de todas as mesorregiões do estado. Como forma de representar a realidade, a modelagem adotada para o processo de avaliação considera 1 variáveis de input, 2 variáveis de output e 1 carry-over. Os dados necessários para condução deste trabalho foram obtidos por meio de consultas ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ao término do trabalho, foi possível observar que os sistemas de abastecimento estudados operam, em sua grande maioria, de forma ineficiente. Apenas 6% dos municípios obtiveram escores máximos na análise global. Embora o desempenho das mesorregiões também não seja satisfatório, os municípios da mesorregião central potiguar obtiveram melhores resultados, sobretudo no ano de 2013. Por fim, foi possível constatar o potencial negativo das perdas de água e como esta variável compromete a sustentabilidade do atual sistema de abastecimento das cidades do Estado, o que aponta a necessidade de um planejamento estratégico para auxiliar na gestão dos recursos.

Palavras chaves: Recursos hídricos. Água. *Dynamic Model Data Envelopment Analysis.*

DANTAS, Hálison Fernandes Bezerra. **Avaliação da eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água dos municípios do Rio Grande do Norte: uma aplicação do modelo dinâmico da Análise Envoltória de Dados em um contexto de escassez hídrica.** 116 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2018.

ABSTRACT

The objective of this work is to propose a model to evaluate the water supply system of the Potiguar municipalities, which are served by the Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), in the operationalization of resources in the dry years (2010-2015) by means of a dynamic modeling. The scenario of unsustainability observed in water reserves is a result of lack of awareness and unrestrained use of water resources. Population growth and climate change exacerbate this scenario. The negative effects of the lack of water are present throughout the national territory, especially in the semi-arid region, where impacts are observed more sharply. Thus, the Dynamic Data Envelopment Analysis model will be used to evaluate the context presented during a 5-year time window and measure the potential of the losses as sources of inefficiency. The sample includes 155 communes of all the mesoregions of the state. As a way of representing reality, the modeling adopted for the evaluation process considers 1 input variables, 2 output variables and 1 carry-over. The data needed to conduct this work were obtained through consultations with the National Information System on Sanitation. At the end of the work, it was possible to observe that the supply systems studied operate, for the most part, inefficiently. Only 6% of the municipalities obtained maximum scores in the overall analysis. Although the performance of the mesoregions is also not satisfactory, the municipalities of the Central Potiguar mesoregion have obtained better results, especially in 2013. Finally, it was possible to verify the negative potential of water losses and how this variable compromises the sustainability of the current system of supply of the cities of the State, which points out the necessity of a strategic planning to assist in the management of the resources.

Keywords: Water resources. Water. Dynamic Model Data Envelopment Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nível dos reservatórios do Nordeste nos últimos 15 anos.....	22
Figura 2 - Estrutura da dissertação.	25
Figura 3 - Fronteira de eficiência e representação de uma DMU.....	28
Figura 4 - Comportamento de uma DMU.	30
Figura 5 - Modelagens DEA.....	33
Figura 6 - Modelo clássico e dinâmico da DEA.....	38
Figura 7 - Evolução do número de publicações.	41
Figura 8 - Interligação entre os autores da amostra.	45
Figura 9 - Perspectiva de indústria da água.	50
Figura 10 - Perspectiva de Regulamentação de preços.	51
Figura 11 - Perspectiva de serviço público de água.	53
Figura 12 - Perspectiva de serviço de esgoto.	55
Figura 13 - Perspectiva de irrigação.	56
Figura 14 - Perspectiva a sustentabilidade.	57
Figura 15 - Quantificação do número de artigos por perspectiva.....	58
Figura 16 - Modelos DEA abordados nos artigos.	59
Figura 17 - Técnicas auxiliares usadas em conjunto com a DEA.	60
Figura 18 - Sequência das atividades da pesquisa.	65
Figura 19 - Sistematização da pesquisa bibliográfica.	67
Figura 20 - Mapa das cidades eleitas para composição da amostra.	71
Figura 21 - Estrutura da fase de resultados.	80
Figura 22 - Sistema de abastecimento genérico.	81
Figura 23 - Ilustração do modelo da pesquisa.	82
Figura 24 - Eficiência das cidades estudadas.	85
Figura 25 - Média dos escores das mesorregiões no período estudado.....	90
Figura 26 - Eficiência da mesorregião oeste.	91
Figura 27 - Eficiência da mesorregião central.....	92
Figura 28 - Eficiência da mesorregião agreste.	94
Figura 29 - Eficiência da mesorregião leste.	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelagens DEA-CCR.....	29
Quadro 2 – Modelagens DEA-BCC.....	30
Quadro 3 – Retornos de escala.....	31
Quadro 4 – Enquadramentos da pesquisa.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação volumétrica dos reservatórios do Rio Grande do Norte.	23
Tabela 2 - Distribuição geográfica dos estudos selecionados.	42
Tabela 3 - Disposição das publicações por periódico.....	43
Tabela 4 - Sistematização dos autores por perspectivas.....	47
Tabela 5 - Esquema dos artigos selecionados.	61
Tabela 6 - Municípios selecionados e mesorregiões.	70
Tabela 7 - Sistematização das variáveis recorrentes na literatura.	72
Tabela 8 - Variáveis adotadas neste estudo.	74
Tabela 9 - Estatística descritiva para os dados das variáveis adotadas.	75
Tabela 10 - Classificação das variáveis carry-overs.....	77
Tabela 11 - Estatística descritiva dos resultados do modelo.	84
Tabela 12 - Níveis de eficiência das DMUs.	85
Tabela 13 - Metas de melhoria em perdas de água para municípios potencialmente eficientes.	86
Tabela 14 - Metas de melhoria em perdas de água para os municípios menos eficientes.....	87
Tabela 15 - Metas de melhoria em DEX para municípios potencialmente eficientes.....	88
Tabela 16 - Metas de melhoria em DEX para os municípios menos eficientes.	89
Tabela 17 - Níveis de eficiência da mesorregião Oeste.....	90
Tabela 18 - Níveis de eficiência da mesorregião Central.	92
Tabela 19 - Níveis de eficiência da mesorregião Agreste.	93
Tabela 20 - Níveis de eficiência da mesorregião Leste.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCC	Banker, Charnes e Cooper
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
DDEA	<i>Dynamic Data Envelopment Analysis</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
DSBM	<i>Dynamic Slack Based Measure</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
IGP-DI	Índice Geral de Preços-Disponibilidade Interna
PL	Programação Linear
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RN	Rio Grande do Norte
SBM	<i>Slack Based Measure</i>
SEMARH	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
SUMÁRIO	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1. APRESENTAÇÃO.....	16
1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA.....	16
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA	20
1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	21
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA	26
2.2. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	29
2.2.1. Procedimento para seleção das unidades de decisão	31
2.2.2. Procedimento para seleção das variáveis	32
2.2.3. Modelos matemáticos clássicos	33
2.2.3.1. Modelo <i>Constant Returns to Scale</i> (CRS ou CCR).....	34
2.2.3.2. Modelo <i>Variable Returns to Scale</i> (VRS ou BCC).....	36
2.2.4. <i>Dynamic Data Envelopment Analysis</i>	37
CAPÍTULO 3 – DEA E RECURSOS HÍDRICOS	41
3.1. MAPEAMENTO DAS PUBLICAÇÕES.....	41
3.2. FLUXO DE CONHECIMENTO E INTER-RELAÇÃO DA AMOSTRA.....	43
3.3. ÁREAS DE APLICAÇÃO.....	46
3.3.1. Indústria da água	49
3.3.2. Regulamentação de preços	50

3.3.4. Serviço de esgoto	54
3.3.5. Irrigação	55
3.3.6. Desenvolvimento econômico	56
3.3.7. Sustentabilidade	56
3.3.8. Pegada hídrica	57
3.4. MODELAGENS UTILIZADAS NA LITERATURA	58
CAPÍTULO 4 – MÉTODO DE PESQUISA	65
4.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	65
4.2. REVISÃO DA LITERATURA	66
4.3. ABRANGÊNCIA DO ESTUDO E DETERMINAÇÃO DAS DMUs	68
4.4. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	71
4.5. INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	75
4.6. DESCRIÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	76
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DO RN.	80
5.2. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DINÂMICA.	82
5.2.1. Eficiência dos sistemas de abastecimento de água norte-riograndenses.	83
5.2.2. Eficiência no abastecimento das mesorregiões do RN	89
5.2.2.1. Oeste Potiguar	90
5.2.2.2. Central Potiguar.....	91
5.2.2.3. Agreste Potiguar	92
5.2.2.4. Leste Potiguar	94
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6.2. LIMITAÇÕES DA PESQUISA	98
6.3. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE A – Resultados dos escores de Eficiência	114

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Diante da escassez dos recursos hídricos e da dificuldade de geri-los de forma efetiva, ressalta-se a relevância deste tema, bem como dos desafios inerentes à área. Para que o acesso à água seja real, os usuários em geral e os prestadores de serviço devem mesclar os volumes consumidos às práticas do uso sustentável.

Embora a água seja considerada o recurso mais valioso do planeta, no que se refere à vida humana, uma crise hídrica tem se instaurado e as previsões, em todo o globo, não são otimistas (DARMON, 1996). A escassez de água é um dos problemas ambientais mais desafiadores para a humanidade no Século XXI (WANG *et al.*, 2011). Assim, justifica-se a urgência em garantir a segurança da água e a necessidade do desenvolvimento de soluções sustentáveis em engenharia (GREEN *et al.*, 2015).

Ainda que os líderes políticos e os usuários em geral desempenhem papéis decisivos por buscar pela gestão eficiente dos recursos hídricos, Sivakumar (2009) destaca o papel vital dos pesquisadores no desenvolvimento de estudos e técnicas para que a gestão sustentável da água seja alcançada.

Neste capítulo, será apresentado o panorama da crise hídrica no mundo a fim expor o contexto no qual o questionamento e a problemática adotados nesta pesquisa foram elaborados. Além disso, as observações gerais e possíveis métodos de solução, presentes na literatura, serão apresentados.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA

A água é o recurso natural mais abundante na superfície do planeta, porém a parcela apropriada para consumo humano é mínima (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992). Apenas 2,5% da água do mundo é doce e cerca de 67% desta quantidade se encontra no estado sólido, compondo geleiras e neve permanente. O volume de água disposto em rios, lagos e reservatórios representam apenas 0,007% de toda a água do planeta (DARMON, 1996).

Sivakumar (2009) destaca que a mínima parcela de água doce disponível no mundo já se encontra sob severos estresses. Já Swatuk *et al.* (2015) acrescentam que os estresses e a eminente escassez de água são ocasionados pela inegável crise hídrica resultante da má gestão

e das práticas insustentáveis. Dando continuidade, Darmon (1996) exemplifica a má gestão da água quando pontua que a retirada deste recurso, entre os anos de 1950 e 1990, superou o dobro da taxa de crescimento populacional nesta época.

É possível identificar, na literatura, uma série de fatores recorrentes que podem ser considerados como as principais causas que agravam a crise hídrica mundial:

- Crescimento populacional (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; AWERBUCH, 1994; DARMON, 1996; FREDERIKSEN; MADANI, 2014; BHATTA *et al.*, 2015; GREEN *et al.*, 2015; SWATUK *et al.*, 2015; ZHOU; ZHANG; SHI, 2015; KANG; LOU; XU, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016; BRAGA; KELMAN, 2016);
- Crescimento e desenvolvimento econômico (AWERBUCH, 1994; DARMON, 1996; DUDA; EL-ASHRY, 2000; GRIMES, 2009; ZHENG *et al.*, 2010; YILMAZ; HARMANCIOGLU, 2010; WANG *et al.*, 2011; LU *et al.*, 2013; MADANI, 2014; SCHIERMEIER, 2014; GREEN *et al.*, 2015; ZHOU; ZHANG; SHI, 2015; KANG; LOU; XU, 2015);
- Alterações climáticas (DUNGLAS, 2000; GRIMES, 2009; AL-JAMAL, 2009; TIELBÖRGER *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2011; HAIDERA, 2011; CHEN; SUN, 2012; LU *et al.*, 2013; JI; QIN *et al.*, 2014; CHEN; DAVIS, 2014; SWATUK *et al.*, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016; BECERRA *et al.*, 2016);
- Uso excessivo dos recursos hídricos (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; DARMON, 1996; LAKI, 1998; DUDA; EL-ASHRY, 2000; RAGAB; PRUDHOMME, 2002; MOHSEN; JABER; AFONSO, 2003; SIVAKUMAR, 2009; EHSAN, 2012; LU *et al.*, 2013; GARMABDARI *et al.*, 2014; GREEN *et al.*, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Poluição e degradação ambiental (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; AWERBUCH, 1994; CARVAJAL-ESCOBAR, 2008; SIVAKUMAR, 2009; ZHENG *et al.*, 2010; YILMAZ; HARMANCIOGLU, 2010; HAIDERA, 2011; QIN *et al.*, 2014; BHATTA *et al.*, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Fortes estiagens (FREDERIKSEN; ASCE, 1996; RAGAB; PRUDHOMME, 2002; WARNER, 2009; VERDIER; VIOLLET, 2015; BRAGA; KELMAN, 2016; BECERRA *et al.*, 2016; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Gestão ineficiente (DELLAPENNA, 1997; MADANI, 2014; GREEN *et al.*, 2015; SWATUK *et al.*, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);

- Atividades humanas (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; WANG *et al.*, 2011; QIN *et al.*, 2014; KANG; LOU; XU, 2015; JÚNIOR *et al.*, 2016);
- Práticas agrícolas insustentáveis (EHSAN, 2012; MADANI, 2014; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016); e
- Baixo Índice de Desenvolvimento humano (HAIDERA, 2011).

Em contrapartida, os autores têm discutido e sistematizado possíveis soluções ou planos de melhoria que facilitem o alcance do uso sustentável e garantam a perpetuidade da vida no planeta. Dentre as alternativas discutidas, encontram-se:

- Gestão e uso eficiente ou sustentável (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; DELLAPENNA, 1997; LAKI, 1998; WANG *et al.*, 2011; EHSAN, 2012; LU *et al.*, 2013; MADANI, 2014; QIN *et al.*, 2014; GARMABDARI *et al.*, 2014; VERDIER; VIOLLET, 2015; SWATUK *et al.*, 2015; GREEN *et al.*, 2015; BRAGA; KELMAN, 2016; BECERRA *et al.*, 2016);
- Dessalinização (AWERBUCH, 1994; RAGAB; DUNGLAS, 2000; PRUDHOMME, 2002; MOHSEN; JABER; AFONSO, 2003; WARNER, 2009; AL-JAMAL, 2009; ZHENG *et al.*, 2010; SCHIERMEIER, 2014; VERDIER; VIOLLET, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Reutilização e tratamento de águas residuais (AWERBUCH, 1994; RAGAB, R.; PRUDHOMME, 2002; WARNER, 2009; AL-JAMAL, 2009; BHATTA *et al.*, 2015; VERDIER; VIOLLET, 2015; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Redução do consumo (DUNGLAS, 2000; WARNER, 2009; AL-JAMAL, 2009; HAIDERA, 2011; GARMABDARI *et al.*, 2014; BRAGA; BECERRA *et al.*, 2016; KELMAN, 2016);
- Otimização das práticas agrícolas (DUNGLAS, 2000; FARUQUI, 2004; ZHENG *et al.*, 2010; HAIDERA, 2011; VERDIER; VIOLLET, 2015; SWATUK *et al.*, 2015);
- Desenvolvimento sustentável (LAKI, 1998; YILMAZ; HARMANCIOGLU, 2010; QIN *et al.*, 2014; CHEN; DAVIS, 2014; ZHOU; ZHANG; SHI, 2015; BECERRA *et al.*, 2016);
- Revisão das tarifas da água (DUDA; EL-ASHRY, 2000; AL-JAMAL, 2009; ZHENG ET AL., 2010; BRAGA; KELMAN, 2016; ZARGAN; WAEZ-MOUSAVI, 2016);
- Gestão integrada e participação dos usuários (LAKI, 1998; DUDA; EL-ASHRY, 2000; WANG *et al.*, 2011; JÚNIOR *et al.*, 2016);
- Políticas públicas eficazes (DUDA; EL-ASHRY, 2000; FARUQUI, 2004); e

- Redução de perdas (AL-JAMAL, 2009; BRAGA; KELMAN, 2016).

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos está sujeita à Lei nº 9.433 de 8 de Janeiro de 1997. Este documento institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que, por sua vez, objetiva assegurar a disponibilidade de água à atual e às futuras gerações (BRASIL, 1997).

A região semiárida se encontra em um período de forte estiagem, iniciada na safra de 2011/2012 e prolongada até os dias atuais. Como resultado da seca, a produtividade da região permanece em queda. Embora os níveis dos reservatórios tenham apresentado um pequeno aumento no final de janeiro de 2017, a situação ainda é preocupante e a quantidade de água disponível para a população continuará restrita (BRASIL, 2017).

Já existem na literatura alguns trabalhos que estudam os recursos hídricos brasileiros sob a ótica do modelo dinâmico da DEA, como visto em Barbosa, Lima e Brusca (2016). No entanto, pesquisas focadas na eficiência do abastecimento de água ainda não foram publicadas.

Diante do exposto, foi possível identificar algumas lacunas na literatura: (1) Uso restrito da DEA no âmbito dos recursos hídricos no Brasil; (2) Poucas aplicações voltadas para o uso da água nas cidades ou comunidades; (3) Poucos trabalhos voltados para eficiência dos sistemas de abastecimentos urbanos e, dentre eles, nenhuma considera a intertemporalidade agregada à gestão da água. Frente às lacunas apresentadas, este trabalho visa preenchê-las e contribuir para a comunidade acadêmica.

Sabendo-se da importância das pesquisas como meio para propor alternativas às práticas insustentáveis, este trabalho visa explorar o tema abordado e responder ao seguinte questionamento: **Em que medida os sistemas de abastecimento de água dos municípios do Rio Grande do Norte são eficientes do ponto de vista operacional?**

A eficiência no uso dos recursos hídricos é discutida na literatura mediante aplicação de técnicas e ferramentas quantitativas. Uma dessas ferramentas é a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA). Criada por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), a DEA caracteriza-se como um método de medição da eficiência de unidades em estudo, chamadas DMU's (*Decision Making Units*), que considera a utilização de *inputs* na geração de múltiplos *outputs*.

Com o objetivo de avaliar de forma mais completa a eficiência das DMU's e entender o funcionamento dos processos internos de cada uma delas, o método DEA foi aprimorado. O modelo inicial da técnica considera apenas a relação existente entre os *inputs* e os *outputs* não permitindo, portanto, uma visão holística do real funcionamento das unidades observadas.

Assim, surgiu o modelo Dinâmico da Análise Envoltória de Dados (DDEA), criado por Färe e Grosskopf (1996), que abarca em sua análise a influência dos períodos de tempo na eficiência.

Kao (2013) afirma que a principal característica do modelo dinâmico da Análise Envoltória de Dados é a capacidade de mensurar as eficiências de um grupo de DMU sob a influência da mudança de períodos. Senante; Maziotis e Garrido (2017) corroboram com Kao (2013) e afirmam que o modelo dinâmico considera que o desempenho de uma DMU em um dado período é afetado pelo seu desempenho no período anterior.

A problemática adotada neste trabalho visa interligar a perspectiva de serviço público de água e desenvolvimento econômico. Portanto, este estudo busca captar a característica de abastecimento eficiente tratada por Hu, Wang e Yeh (2006), Sánchez (2006), Singh, Mittal e Upadhyay (2011), Lo Storto (2013b) e, sobretudo, Carvalho e Sampaio (2015) que analisaram a influência da regulamentação sobre a eficiência dos prestadores no Brasil. Todos os estudos listados serviram de inspiração para que esta pesquisa fosse idealizada e usaram a DEA como ferramenta de pesquisa.

Portanto, o presente trabalho busca contribuir com a criação de um panorama do abastecimento de água no do Rio Grande do Norte. De posse dos resultados, pretende-se identificar quais as cidades e regiões do Estado mais ineficientes e propor direcionamento para o alcance do uso sustentável.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Cerca de 93% dos municípios do Estado são abastecidos pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do norte (CAERN). A problemática central deste trabalho diz respeito à mensuração da eficiência na gestão operacional dos sistemas de abastecimento de água em cada uma das 137 cidades consideradas, nas quatro mesorregiões do Estado.

Frente ao problema identificado, esta pesquisa tem como objetivo geral propor um modelo dinâmico para avaliar a eficiência do abastecimento de água dos municípios potiguares em um período de forte estiagem, compreendidos entre os anos de 2010 e 2015.

Para que tal objetivo seja alcançado, faz-se necessário elencar uma série de objetivos específicos:

- Realizar a revisão bibliométrica sistemática dos eixos de pesquisa adotados;
- Identificar as variáveis recorrentes na literatura para mensuração da eficiência no que tange ao abastecimento da água;

- Coletar dados referentes ao sistema de abastecimento de água e caracterizar os sistemas de abastecimento dos municípios incluídos neste estudo;
- Realizar uma modelagem dinâmica da Análise Envoltória de Dados;
- Mensurar a eficiência dos sistemas de abastecimento de água do Estado, bem como as respectivas fontes de ineficiências;

1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Cerca de 33% da população mundial vive em países que sofrem com graves problemas de escassez de água (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992). Em termos globais, Darmon (1996) supõe que a disponibilidade potencial per capita de água doce diminuirá de 17.000 m³ no ano de 1950 para 5.100 m³ em 2025.

Ragab e Prudhomme (2002) afirmam que no ano de 2050 os montantes pluviométricos sofrerão diminuições de até 20%. Além disso, esta acentuada redução das precipitações irá contribuir para o aumento das temperaturas em até 2°C. Todas estas alterações irão afetar de forma mais drásticas o norte de África e algumas partes do Egito, da Arábia Saudita, do Irã, da Síria, da Jordânia e de Israel. Zheng *et al.* (2010) afirmam que, provavelmente, a China se aproximará do uso total dos recursos hídricos exploráveis em 2030. Verdier e Viollet (2015) apontam uma possível crise hídrica no mediterrâneo no ano de 2050.

Embora o seu ciclo seja aparentemente interminável, a água é um recurso finito. Além disso, sua distribuição nas regiões do globo é desigual (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992). Dellapenna (1997) destaca que os atuais padrões de uso da água são a principal causa da crise hídrica, superando o excessivo crescimento populacional.

Laki (1998) reafirma a necessidade de políticas eficazes de governança e ilustra que a má gestão e a falta destas políticas têm acelerado a crise hídrica no Rio Nilo. A influência da crise de governança também é abordada por Grimes (2009). Ragab e Prudhomme (2002) apontam que o uso e o abastecimento eficientes da água são as soluções para minimização da crise hídrica.

A Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional, de acordo com os dados dos Reconhecimentos de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública, afirma que 976 municípios iniciaram o ano de 2017 em estado de emergência. De acordo com a Secretaria, os decretos vigentes por unidade federativa são: Alagoas (40); Bahia (79); Ceará (127), Espírito Santo (25), Maranhão (11), Minas Gerais

(80), Paraíba (196), Pernambuco (125), Piauí (124), Rio Grande do Norte (153), Sergipe (16) (BRASIL, 2017).

Embora os níveis dos principais reservatórios do Nordeste tenham aumentado levemente em dezembro de 2016, a situação hídrica da região ainda é crítica. A série histórica de 15 anos mostra uma tendência decrescente no nível de água armazenada e ilustra o impacto da estiagem, conforme a Figura 1.

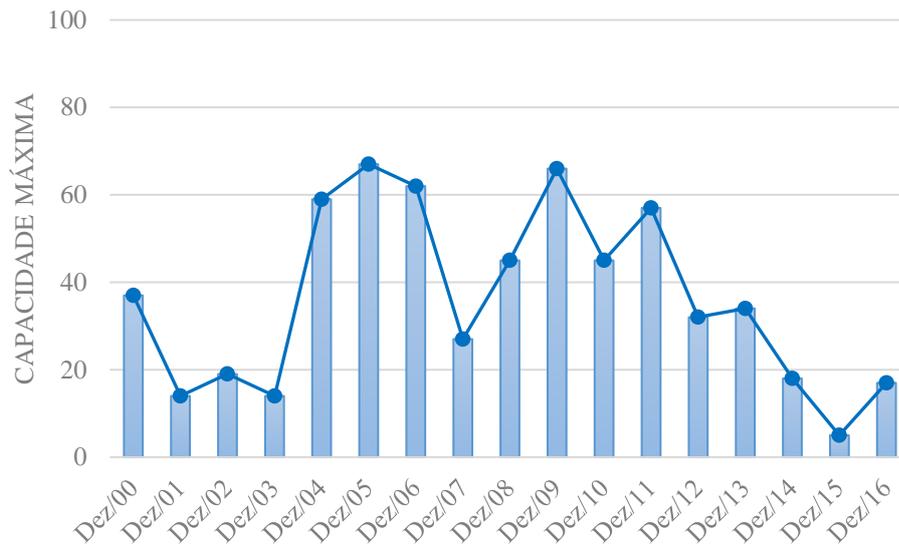


Figura 1 - Nível dos reservatórios do Nordeste nos últimos 15 anos
Fonte: Brasil (2017).

No Estado do Rio Grande do Norte, a forte estiagem ocasiona escassez da água desde o ano de 2012 e os impactos da falta de água já perduram por cinco anos consecutivos. A grande maioria dos municípios se encontram em estado de emergência devido às baixas e irregulares precipitações pluviométricas. Além de afetar a qualidade de vida de toda a população, a escassez hídrica e a gestão ineficiente da água têm influenciado a tomada de decisão sobre as áreas plantadas. Em 2016, observou-se uma redução de aproximadamente 28,32% no plantio de milho, arroz, feijão e sorgo e 30,86% da produção total, dados comparados ao ano de 2014 (BRASIL, 2016).

Nos primeiros meses de 2017, chuvas consideráveis foram relatadas em todo o Estado, mas, segundo os dados da Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos, dos 47 reservatórios, 12 estão secos e 15 estão no volume morto. Além disso, a quantidade de água das bacias hidrográficas do Estado requer cautela. A Tabela 1 apresenta a situação atual dos reservatórios que possuem capacidade superior a 5 milhões de m³ de água.

BACIA	CAPACIDADE (m ³)	VOLUME ATUAL (m ³)	VOLUME ATUAL (%)	MÊS/ANO DA MEDIÇÃO
Apodi/Mossoró	1.126.852.144	202.473.299	17,97	03/2017
Boqueirão	11.074.800	8.165.117	73,73	03/2017
Ceará-Mirim	136.000.000	9.281.328	6,82	03/2017
Doce	11.019.525	5.729.520	51,99	03/2017
F. Litorânea Leste de Escoamento Difuso	84.268.200	43.078.765	51,12	03/2017
Jacu	29.970.194	9.321.195	31,10	03/2017
Piranhas/Assu	2.966.798.008	525.361.020	17,71	03/2017
Potengi	112.975.265	6.568.140	5,81	03/2017
Trairi	57.988.750	558.200	0,96	03/2017

Tabela 1 - Situação volumétrica dos reservatórios do Rio Grande do Norte.
Fonte: SEMARH (2017).

Frente à situação crítica dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Norte, esta pesquisa poderá colaborar para que um panorama geral do abastecimento estadual de água seja avaliado. Assim, pretende-se identificar quais as fontes de ineficiência na disponibilização da água e possibilitar que as autoridades estaduais empenhem esforços para que o uso sustentável da água nos municípios seja alcançado.

Outros autores já utilizaram o modelo DDEA no contexto hídrico, porém com enfoque diferente, como visto em Barbosa, Lima e Brusca (2016) que utilizaram o método para estudar a governança das concessionárias brasileiras de água. Sendo assim, ao término da pesquisa, objetiva-se contribuir para a comunidade acadêmica por preencher a lacuna da literatura no que tange ao uso do modelo Dinâmico da Análise Envoltória de Dados no contexto dos sistemas de abastecimento de água das cidades do Rio Grande do Norte.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos cujas descrições serão realizadas abaixo, incluindo este que aqui se conclui.

O Capítulo 1, referente às abordagens introdutórias, trata da situação atual dos recursos hídricos em todo o globo terrestre, as principais causas para a ocorrência da escassez da água e os possíveis meios de minimizar o impacto da crise hídrica. Além disso, apresenta o problema e delimita os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2, referente à revisão da literatura, apresenta os conceitos iniciais ligados às modelagens matemáticas adotadas: os modelos clássicos da Análise Envoltória de Dados, a

Evolução destes modelos e a modelagem dinâmica. Ademais, são apresentadas as aplicações destes métodos na gestão dos recursos hídricos.

O Capítulo 3, descreve como se organizará as fases do procedimento metodológico para que se alcance os objetivos descritos no Capítulo 1. Serão apresentadas as variáveis que compõem o modelo, conforme a literatura, o instrumento de coleta de dados, o processo de seleção das variáveis e a estruturação do método adotado.

O Capítulo 4 refere-se à caracterização genérica dos sistemas de abastecimento de água do Estado do Rio Grande do Norte e apresenta as eficiências destes sistemas em atender às expectativas da CAERN.

Por fim, o Capítulo 5 explora as considerações finais do trabalho. São apresentados os principais *insights*, as contribuições desta pesquisa, as limitações e propostas para trabalhos futuros. As interligações entre os capítulos e a sistematização de toda a pesquisa são ilustradas pela Figura 2:

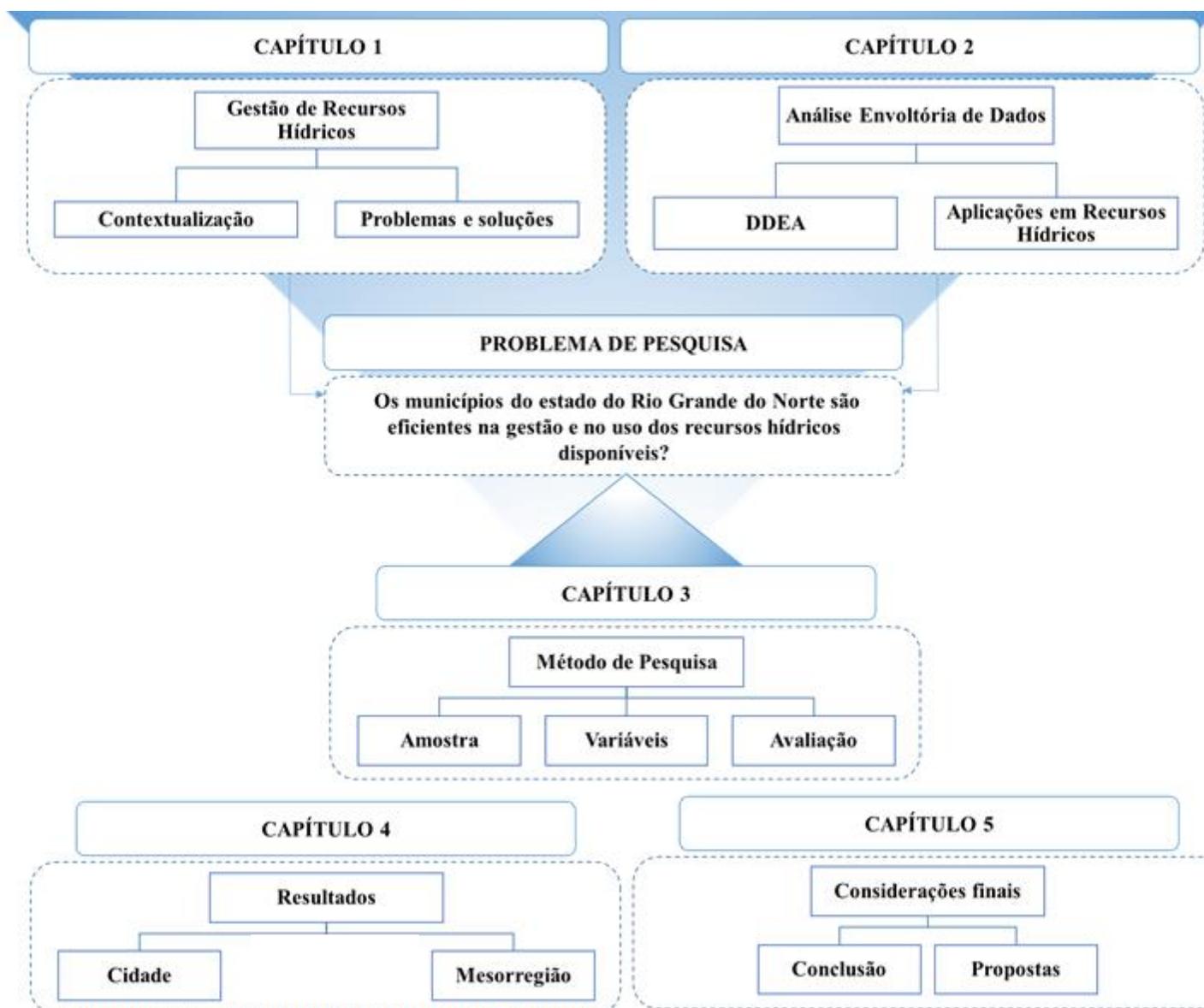


Figura 2 - Estrutura da dissertação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos iniciais do método *Data Envelopment Analysis* (DEA). Serão discutidos os fundamentos do método, as nuances entre as modelagens e suas principais características. Além disso, a Seção 2.3 apresentará os principais usos da DEA em pesquisas de gerenciamento dos recursos hídricos ao redor do mundo.

2.1. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA

No ambiente industrial, a medição da eficiência produtiva além de representar ganhos econômicos, possibilita o alinhamento das políticas organizacionais. Uma vez que exista o acompanhamento da eficiência produtiva e que se empenhe esforços para maximizá-la, será possível alcançar um aumento dos *outputs* sem que o volume dos *inputs* seja alterado (FARREL, 1957).

Os conceitos de eficiência e eficácia podem ser aplicados à inúmeros sistemas e utilizados para fundamentar a tomada de decisão, pois se caracterizam como indicadores de desempenho produtivo. Embora essas medidas sejam facilmente confundidas, eficiência e eficácia são termos distintos. A eficiência está ligada à forma como um sistema irá utilizar os recursos necessários. Assim, o sistema será eficiente quando utilizar os recursos da melhor forma possível. A eficácia, por sua vez, diz respeito a uma meta pré-estabelecida que deverá ser alcançada pelo sistema em observação (MARIANO, 2012).

Coelli *et al.* (2005) abordam a produtividade como outro indicador utilizado para medição do desempenho de um sistema. Os conceitos de produtividade e eficiência também são comumente confundidos, porém a produtividade diz respeito à razão entre a quantidade de produtos e os insumos necessários para sua produção, de acordo com a Equação 1 (COOPER; SEIFORD; TONE, 2007; MARIANO, 2012).

$$Produtividade = \frac{outputs}{inputs} \quad (\text{Equação 1})$$

A produtividade de um único produto resultante do uso de um único insumo é denominada Produtividade Parcial dos Fatores (PPF) e seu uso pode gerar resultados

inconsistentes. Por outro lado, há a Produtividade Total dos Fatores (PTF) que busca levar em consideração todas as dimensões de desempenho possíveis (COELLI *et al.*, 2005; MARIANO, 2012), como representado pela Equação 2:

$$PTF = \frac{u_1y_1 + u_2y_2 + u_3y_3 + \dots + u_ny_n}{v_1x_1 + v_2x_2 + v_3x_3 + \dots + v_nx_n} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

u_n : Utilidade do *output* n ;

y_n : Quantidade do *output* n ;

v_n : Utilidade do *input* n ;

x_n : Quantidade do *input* n ;

Portanto, a PTF é resultante da combinação linear dos produtos por uma combinação linear dos insumos, já que na equação da produtividade total dos fatores os valores atribuídos para os *inputs* e *outputs* são multiplicados por pesos (COOPER; SIEFORD; TONE, 2007).

De posse do valor da PTF, a eficiência produtiva de um sistema é representada pela razão entre a produtividade atual e o valor máximo que o sistema poderá alcançar, ou seja, a eficiência representa uma comparação entre o estado atual e o estado ótimo de um sistema (LOVELL, 1993), conforme a Equação 3:

$$\text{Eficiência produtiva} = \frac{P}{P_{Máx}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

P = Produtividade atual do sistema;

$P_{máx}$ = Produtividade ótima (máxima) do sistema.

Os valores resultantes do cálculo da eficiência estarão abarcados no intervalo de 0 a 1 e também poderão ser expressos em termos percentuais. Assim, o sistema produtivo é inteiramente eficiente quando o resultado da razão entre a sua produtividade atual e a produtividade máxima for igual a 1. A produtividade, por sua vez, pode assumir qualquer valor real (CHARNES; COOPER; RHODES, 1978; RUBIO; GÓMEZ; GUARDIOLA, 2010; MARIANO, 2012).

Coelli *et al.* (2005) desmembram a eficiência produtiva e apresenta duas vertentes: (1) a eficiência absoluta que é obtida quando, no cálculo, o valor da produtividade máxima é

igual ao valor ótimo (idealizado) e (2) a eficiência relativa, calculada quando o valor da produtividade máxima adotado representa o maior valor obtido por uma das unidades observadas.

Além dos conceitos de eficiência, eficácia e produtividade apresentados acima, faz-se necessário, para que se entenda a real funcionalidade das técnicas de análise de eficiência produtiva, a discussão de alguns conceitos como (1) *Decision Making Units* (DMU), (2) Fronteira de eficiência (MARIANO, 2008).

Sabendo-se que as técnicas de mensuração da eficiência foram inicialmente utilizadas pelo setor de manufatura e que, posteriormente, passaram a ser aplicadas em diversas áreas do conhecimento, foi necessário a criação de um termo geral que represente o uso de tais técnicas em qualquer setor, seja ele manufatureiro ou de serviços (MARIANO 2008).

O termo genérico, dotado da flexibilidade do conceito de eficiência produtiva, foi denominado *Decision Making Units* - DMU (Mariano, 2008). Almeida (2010) define que uma DMU representa qualquer unidade em análise no processo de mensuração da eficiência e destaca que sua principal característica é a capacidade de produção de um conjunto de *outputs* mediante o uso de um conjunto de *inputs*.

A fronteira de eficiência, representada por uma função $f(x)$, retrata a curva geométrica obtida pela disposição das DMUs eficientes de um dado conjunto observado. Portanto, considera-se como ineficiente uma DMU que se encontra abaixo desta curva. Caso a DMU sobressaia à curva, ela passa a operar sob uma modelagem de supereficiência (MARIANO, 2008; ALMEIDA, 2010). Considerando relação ótima entre insumos e produtos, Casa Nova (2002) define a fronteira de eficiência como a curva máxima de produtividade. A Figura 3 ilustra a fronteira de eficiência e o funcionamento de uma DMU:

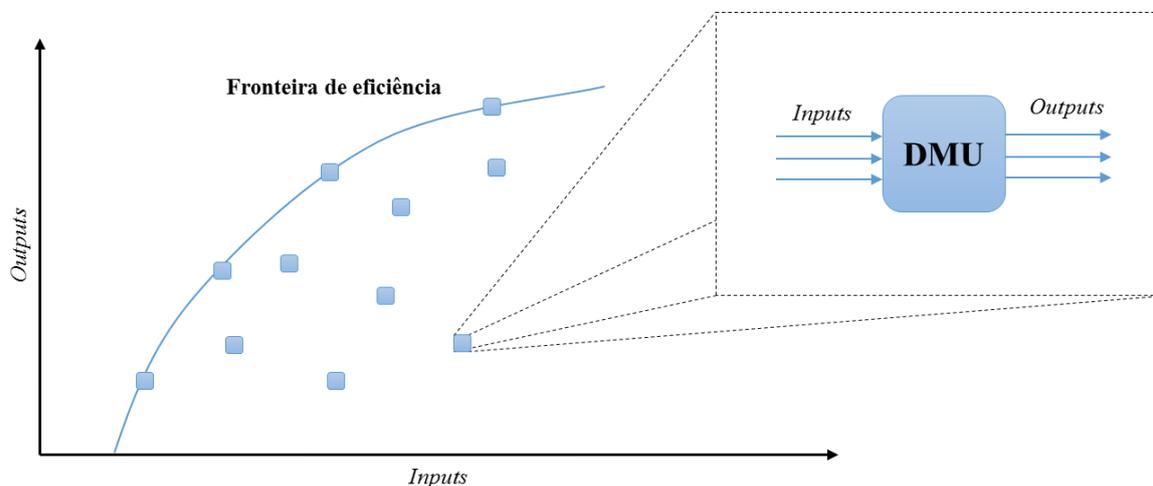


Figura 3 - Fronteira de eficiência e representação de uma DMU.

A eficiência técnica de uma DMU pode ser calculada mediante o uso de técnicas classificadas como paramétricas e não-paramétricas. As técnicas paramétricas fazem uso de uma função produção para mensurar a eficiência. Por outro lado, as técnicas não-paramétricas calculam a eficiência segundo a construção de uma fronteira (MARIANO, 2008). A Análise Envoltória de Dados é considerada uma técnica não-paramétrica e será utilizada neste estudo para determinar a eficiência relativa dos sistemas de abastecimento de água dos municípios do Estado do Rio Grande do Norte atendidos pela CAERN.

2.2. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

O trabalho seminal, do qual a técnica Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) é resultante, foi realizado por Farrel (1957). Em sua obra, Farrel (1957) buscou mensurar e avaliar a eficiência relativa de unidades observadas mediante o uso de uma única entrada e uma única saída.

Considerando que a DEA é uma técnica não-paramétrica, logo não são feitas hipóteses sobre o contorno analítico da função produção, Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984) introduzem a ideia de mensurar a eficiência de DMUs baseada no uso de múltiplos *inputs* e múltiplos *outputs*. A DEA pode ser conceituada como uma abordagem fundamentada na Programação Linear (PL) que permite a estimação da eficiência relativa por meio da construção empírica de uma fronteira de eficiência.

Dyson *et al.* (2001) destacam alguns pontos importantes que devem ser respeitados para que o uso da DEA retrate a realidade: as DMUs selecionadas para o estudo devem ser similares, ou seja, devem desempenhar as mesmas atividades ou produzirem os mesmos *outputs* e, além disso, devem operar mediante o uso dos mesmos *inputs* e no mesmo ambiente ou circunstâncias.

O objetivo da DEA em estimar a eficiência de um conjunto de DMU permite que as unidades que apresentam melhores resultados sejam tidas como *benchmarks*, ou exemplos de boas práticas, para as DMUs ineficientes, ou seja, aquelas que se localizam abaixo da fronteira (COOK; SEIFORD, 2009; MARQUES, 2016). Esse processo é chamado de *Benchmarking* e caracteriza a determinação de metas a serem alcançadas pelas DMUs (SOARES DE MELLO *et al.*, 2002).

Uma DMU ineficiente poderá alcançar a fronteira de eficiência mediante a realização de duas manobras: (1) redução dos insumos, sem que a produção final seja alterada e (2) aumento do volume de produção, sem que haja alteração na quantidade dos insumos

necessários. As manobras descritas acima caracterizam a orientação do modelo DEA. Assim, quando se deseja minimizar os insumos, o modelo estará orientado aos *inputs*. Caso se deseje maximizar os produtos, o modelo será orientado *outputs* (COOK; SEIFORD, 2009; MARIANO, 2012). A Figura 4 ilustra o comportamento de uma DMU ineficiente em alcançar a fronteira de eficiência.

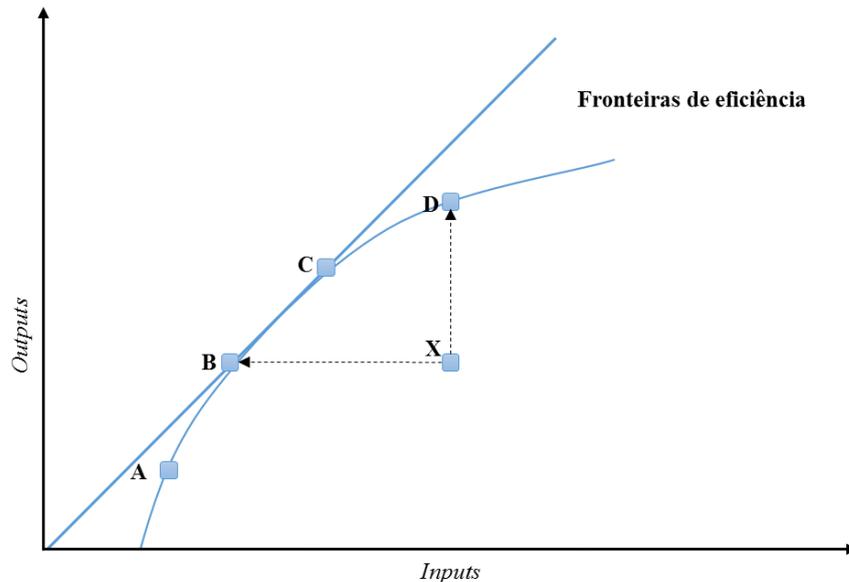


Figura 4 - Comportamento de uma DMU.

Portanto, para que a DMU X consiga alcançar 100% da sua eficiência, deverá: (1) reduzir o consumo dos seus insumos – orientação aos *inputs* – conforme ilustrado pelo segmento X-B. Por outro lado, caso o objetivo seja alcançar a eficiência mediante o aumento dos produtos e otimização do uso dos insumos – orientação aos *outputs* – a DMU deverá seguir o segmento X-D (ALMEIDA, 2010).

Hu *et al.* (2010) destacam que em aplicações da DEA não se faz necessário que os pesos, apresentados na Equação 2, ou a função produção sejam especificados. Soares de Mello *et al.* (2002) corroboram com o afirmado acima e explicam que os pesos, indispensáveis nesta abordagem, são obtidos através da programação linear.

Golany e Roll (1989) elencam as etapas necessárias para uso da DEA: (1) Determinação do número de DMUs a serem estudadas; (2) Determinação e seleção das variáveis de *input* e *output*; (3) Escolha do modelo e da formulação mais adequada; (4) Definição da orientação do modelo; e (5) Análise dos resultados. As próximas seções irão abordar os procedimentos básicos para aplicação da DEA.

2.2.1. Procedimento para seleção das unidades de decisão

Sabendo-se das características básicas para uso da DEA descritas por Dyson *et al.* (2001) acerca das condições de atuação e das DMUs, faz-se necessário discutir outras peculiaridades que, caso não sejam atendidas, poderão influenciar na validação do método. A determinação leviana do número de DMUs a serem utilizadas na modelagem irá influenciar os resultados e fundamentará uma tomada de decisão tendenciosa. As DMUs selecionadas devem ser autônomas e operar sob as mesmas condições, utilizando os mesmos insumos e produzindo as mesmas saídas. A única diferença aceitável é a intensidade de uso e produção (GOLANY; ROLL, 1989).

Almeida (2010) enfatiza que o procedimento de seleção das DMUs é crucial para que o modelo adotado seja representativo, porém destaca que não há um consenso acerca da forma mais adequada de eleger as unidades tomadoras de decisão, embora existam recomendações de como prosseguir nesta etapa da modelagem.

Além disso, Mariano (2012) expõe a importância do processo de seleção das DMUs e explica que o resultado da eficiência obtida, mediante aplicação da DEA, está diretamente ligada ao conjunto eleito para o estudo. A eficiência de uma DMU só será representativa quando comparada às demais DMUs do conjunto. Já Golany e Roll (1989) afirmam que não há sentido compara DMUs não homogêneas, uma vez que a eficiência calculada não seria representativa pelas diferenças estruturais existentes.

Dyson *et al.* (2001) e Cooper; Seiford e Tone (2007) propõem formas de determinar o número adequado de DMUs. Dyson *et al.* (2001) afirmam que o dobro da soma do número de *inputs* e *outputs* já caracteriza uma amostra suficiente de unidades, como ilustrado na Equação 4. Cooper; Seiford e Tone (2007) explicam que o quantitativo das DMUs que deverão ser utilizadas pode ser representado por (1) o produto do número de *inputs* e *outputs* e (2) o triplo da soma do número de *inputs* e *outputs*, conforme o Equação 5.

$$z > 2(n + m) \quad \text{(Equação 4)}$$

$$z > [(m * n) \text{ ou } 3 * (n + m)] \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

z = N° de DMU

n = N° de *inputs*

m = N° de *outputs*

2.2.2. Procedimento para seleção das variáveis

Cooper, Seiford e Tone (2007) destacam, conforme exposto na seção anterior, que a determinação do número de *inputs* e *outputs* pode afetar a robustez do método DEA de forma que os resultados da análise não representem a realidade sendo, portanto, irrelevantes. O número de variáveis afetará a validade do modelo, pois quanto maior o número de entradas e saídas, maior será o número de DMUs na fronteira, logo, menos discriminatório será o modelo.

Embora o procedimento de seleção das variáveis possua grande importância nas aplicações da DEA, ainda não há, na literatura, um consenso sobre qual o melhor método ou maneira mais adequada de se realizar esta atividade, pois a Análise Envoltória de Dados não possui diretrizes específicas neste sentido (SENRA *et al.*, 2007; NATARAJA; JOHNSON, 2011).

A identificação das variáveis passíveis de serem abarcadas na modelagem DEA pode ser realizada mediante uma busca prévia dos estudos da literatura. Os artigos selecionados para identificação das variáveis deverão estar alinhados ao objetivo da pesquisa (GOLANY; ROLL, 1989; ALMEIDA, 2010; MARIANO, 2012). Senra *et al.* (2007) acrescentam que a opinião de especialistas ou até mesmo a disponibilidade de dados poderá determinar ou influenciar a abordagem da seleção de variáveis.

Golany e Roll (1989) apontam que após a busca em estudos prévios, o número de variáveis encontradas deve ser reduzido, corroborando com as explicações de Cooper, Seiford e Tone (2007). Os autores propõem uma triagem inicial das variáveis, uso de técnicas econométricas e realização de análise de sensibilidade. A triagem inicial irá alinhar as variáveis preestabelecidas ao objetivo central da pesquisa. As técnicas econométricas irão discriminar o comportamento de uma dada variável. Por fim, as análises de sensibilidade irão descrever a influência das variáveis nos escores de eficiência.

Embora seja ideal que apenas as variáveis realmente importantes compoñham o modelo, é imprescindível que não haja omissão de potenciais variáveis. Indica-se que sejam utilizados métodos quantitativos para garantir que a seleção ocorra de forma mais confiável (Dyson *et al.*, 2001; Senra *et al.*, 2007; Meza *et al.*, 2007).

Alguns métodos são destacados na literatura como ferramentas eficientes no processo de seleção de variáveis: (1) Análise de Correlação (Golany; Roll, 1989; Almeida, 2010), (2) Análises multiatributo (Meza *et al.*, 2007; Senra *et al.* 2007; Mariano, 2012; Reis *et al.* 2017) e (3) *Stepwise* (Senra *et al.*, 2007; Mariano, 2012).

Portanto, a escolha do método para determinação das variáveis estará sujeita à intervenção do tomador de decisão e às circunstâncias de uso da DEA. Por mais sofisticado que seja o método matemático, a seleção de variáveis deverá ser realizada em conjunto com decisores e especialistas (Senra *et al.*, 2007).

2.2.3. Modelos matemáticos clássicos

Os estudos em Análise Envoltória de Dados geralmente utilizam uma das duas modelagens clássicas: (1) *Constant Returns to Scale* (CRS ou CCR), desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e (2) *Variable Returns to Scale* (VRS ou BCC), idealizada por Banker, Charnes e Cooper (1984), vale destacar que ambos os modelos são fundamentados em Farrell (1957). As especificações das formas dos modelos e serão discutidas nas seções seguintes. A Figura 5 apresenta a interligação entre as nuances dos modelos abordados neste trabalho.

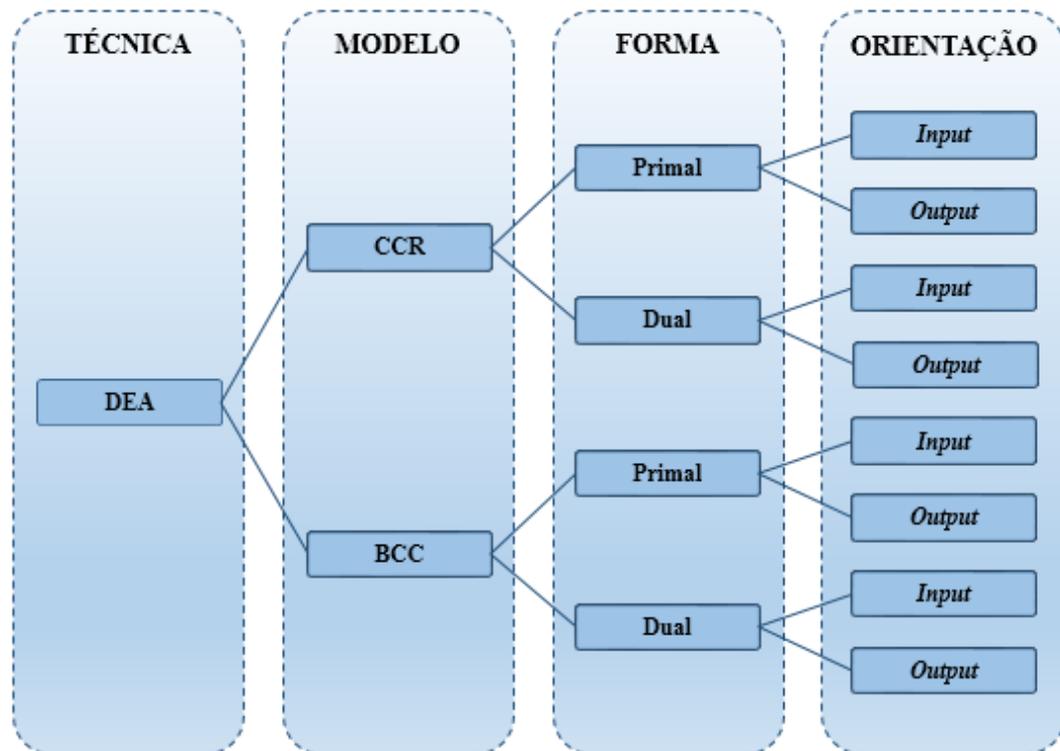


Figura 5 - Modelagens DEA.

Seiford e Thrall (1990) e Mariano (2012) frisam que após a realização dos procedimentos iniciais de seleção das DMUs e das variáveis a serem modeladas, deve-se atentar em três características do modelo para que este represente, em termos aceitáveis, a

realidade do problema estudado: (1) observar o tipo de retorno de escala; (2) a orientação do modelo e (3) a forma de se combinar *inputs* e *outputs*.

O fundamento dos retornos constantes de escala, utilizado na modelagem CCR, diz respeito aos processos que apresentam variações proporcionais nos *inputs* e *outputs*. Por outro lado, os retornos variáveis de escala, modelagem BCC, podem ser observados em processos onde a alteração dos *inputs* não representa, necessariamente, uma alteração proporcional nos índices de *outputs* (COOPER; SEIFORD; TONE, 2007).

Além da orientação do modelo, apresentada por Cook e Seiford (2009), Almeida (2010) e Mariano (2012) na Seção 2.2 deste trabalho, faz-se necessário discutir a forma como os *input* e *outputs* irão se relacionar. Existem duas formas uso da DEA: a forma primal ou dos multiplicadores e a dual ou envelopamento (COOK; SEIFORD, 2009).

Mariano (2012) explica que o uso dos modelos em sua forma primal permite que sejam identificados os pesos de cada variável de *input* e *output*, além da eficiência. Enquanto isso, o uso dos modelos em sua forma dual possibilita a definição das metas a serem alcançadas por DMUs que se encontram fora da fronteira de eficiência. Logo, as DMUs eficientes servirão de *benchmark* para as unidades ineficientes.

Por fim, vale ressaltar que o uso conjunto dos modelos CCR e BCC permite a identificação da eficiência de escala que, por sua vez, é obtida pela razão entre a eficiência total, calculada pelo modelo CCR, e a eficiência técnica, resultado do modelo BCC (ALMEIDA, 2010).

2.2.3.1. Modelo *Constant Returns to Scale* (CRS ou CCR).

A programação linear que compõe cada uma das variações do método de Charnes, Cooper e Rhodes (1978) possui algumas características distintas. O Quadro 1 apresenta a modelagem CCR, a função objetivo, suas restrições e variações no que diz respeito às formas e à orientação.

CCR		ORIENTAÇÃO	
		Input	Output
FORMA	Primal	$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{i=1}^m u_i y_{i0} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m u_i y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{j=1}^n v_j x_{j0} = 1 \\ & u_i, v_j \geq 0, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^n v_j x_{j0} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m u_i y_{ik} - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{j=1}^n u_i y_{i0} = 1 \\ & u_i, v_j \geq 0, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$
	Dual	$\begin{aligned} & \text{Min } \theta \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^z y_{ik} \cdot \lambda_k \geq y_{i0}, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z x_{jk} \cdot \lambda_k - \theta \cdot x_{j0} \leq 0, j = 1, 2, \dots, z \\ & \lambda_k e \theta \geq 0, k = 1, \dots, j \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Max } \eta \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^z x_{jk} \cdot \lambda_k \geq x_{j0}, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z y_{ik} \cdot \lambda_k - \eta \cdot y_{i0} \leq 0, j = 1, 2, \dots, z \\ & \lambda_k e \eta \geq 0, k = 1, \dots, j \end{aligned}$

Quadro 1 – Modelagens DEA-CCR.
Fonte: Cooper, Charnes e Rhodes (1978).

Onde:

u_i : Utilidade do *output* i ;

v_j : Utilidade do *input* j ;

x_{jk} : Quantidade do *input* j da DMU k ;

y_{ik} : Quantidade do *output* i da DMU k ;

x_{j0} : Quantidade do *input* j da DMU em análise;

y_{i0} : Quantidade do *output* i da DMU em análise;

z : Número de DMUs em análise;

m : Número de *outputs*;

n : Número de *inputs*.

θ : Eficiência;

η : Inverso da eficiência; e,

λ_k : Escalar de não negatividade da DMU k ;

Além da determinação das metas para DMUS ineficientes, o número reduzido de restrições nas modelagens dual faz com que estas formas da DEA sejam mais atrativas para gestores e pesquisadores. Esta relação de preferência é relatada por Almeida (2010).

A relação de retornos constantes à escala remete à proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*. Portanto, a fronteira de eficiência deste modelo é representada por uma reta que

possui em torno de 45° de inclinação. A eficiência do modelo CCR é calculada pela razão entre a produtividade da DMU observada e a produtividade da DMU mais produtiva (MARIANO, 2008; ALMEIDA, 2010).

2.2.3.2. Modelo *Variable Returns to Scale* (VRS ou BCC).

Banker, Charnes e Cooper (1984) aprimoraram o modelo CCR e incorporaram ao modelo BCC a ideia de economia de escala, principal característica da mensuração dos retornos variáveis à escala. Neste modelo, a eficiência é calculada pelo quociente entre a produtividade de uma DMU observada e a maior produtividade dentre as DMUs com o mesmo tipo de retorno a escala (MARIANO, 2012). As modelagens do modelo de Banker, Charnes e Cooper (1984) são apresentadas no Quadro 2:

BCC		ORIENTAÇÃO	
		Input	Output
FORMA	Primal	$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{i=1}^m u_i y_{i0} + u \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m u_i y_{ik} + u - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{j=1}^n v_j x_{j0} = 1 \\ & u_i, v_j \geq 0, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^m v_j x_{j0} + v \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^m u_i y_{ik} - v - \sum_{j=1}^n v_j x_{jk} \leq 0, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{i=1}^m u_i y_{i0} = 1 \\ & u_i, v_j \geq 0, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \end{aligned}$
	Dual	$\begin{aligned} & \text{Min } \theta \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^z y_{ik} \cdot \lambda_k \geq y_{i0}, i = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z x_{jk} \cdot \lambda_k - \theta \cdot x_{j0} \leq 0, j = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z \lambda_k = 1 \\ & \lambda_k e \theta \geq 0, k = 1, \dots, z \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Max } \eta \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^z x_{jk} \cdot \lambda_k \leq x_{j0}, k = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z y_{ik} \cdot \lambda_k - \eta \cdot y_{i0} \geq 0, j = 1, 2, \dots, z \\ & \sum_{k=1}^z \lambda_k = 1 \\ & \lambda_k e \eta \geq 0, k = 1, \dots, z \end{aligned}$

Quadro 2 – Modelagens DEA-BCC.
Fonte: Banker, Charnes e Cooper (1984).

Onde:

u_i : Utilidade do *output* i ;

v_j : Utilidade do *input* j ;

- x_{jk} : Quantidade do *input* j da DMU k ;
 y_{ik} : Quantidade do *output* i da DMU k ;
 x_{j_0} : Quantidade do *input* j da DMU em análise;
 y_{i_0} : Quantidade do *output* i da DMU em análise;
 z : Número de DMUs em análise;
 m : Número de *outputs*;
 n : Número de *inputs*.
 u : Coeficiente de retorno à escala dos *outputs*;
 v : Coeficiente de retorno à escala dos *inputs*;
 θ : Eficiência;
 η : Inverso da eficiência; e,
 λ_k : Escalar de não negatividade da DMU k ;

Mariano (2008) explica que a convexidade da fronteira de eficiência do modelo BCC permite que o diagnóstico das DMUs eficientes seja feito mais de forma mais adequada, haja vista que a fronteira é composta por uma série de semi-retas em ângulos diferenciados. Cook e Seiford (2009) salientam a semelhança entre os modelos CCR e BCC e destacam que as únicas diferenças são: (1) o acréscimo das variáveis referentes aos fatores de escala (u e v) e (2) Restrição de Convexidade nos modelo BCC-Dual.

As variáveis u e v , referentes aos coeficientes de escala, tem o objetivo de tornar o modelo sensível às diferentes escalas de operação das DMUs (MARIANO, 2008; ALMEIDA, 2010). O Quadro 3 apresenta como os retornos a escala são representados pelos valores dos coeficientes de escala.

COEFICIENTE u	TIPO DE RETORNO	COEFICIENTE v	TIPO DE RETORNO
$u < 0$	Decrescente	$v < 0$	Crescente
$u = 0$	Constante	$v = 0$	Constante
$u > 0$	Crescente	$v > 0$	Decrescente

Quadro 3 – Modelagens DEA-BCC.
Fonte: Mariano (2008).

2.2.4. *Dynamic Data Envelopment Analysis*

Além dos modelos clássicos da Análise Envoltória de Dados, há na literatura algumas modelagens mais avançadas. As abordagens CCR e BCC são estáticas e, portanto, consideram em suas análises que as unidades de decisão são "caixas-pretas", ou seja, as inter-relações entre as variáveis e os processos internos não são considerados (COOK; ZHU, 2014).

Färe e Grosskopf (1996) buscaram aprimorar as modelagens DEA e propuseram o conceito de subtecnologias com o objetivo de compreender amplamente os processos internos das unidades de decisão. Assim, os modelos gerais propostos foram: (1) Modelo de rede estático; (2) Modelo dinâmico; e (3) Adoção de tecnologia (COOK; SEIFORD, 2009).

O modelo dinâmico da DEA (*Dynamic Data Envelopment Analysis – DDEA*) idealizado por Färe e Grosskopf (1996) introduz a característica da intertemporalidade dos sistemas de produção. Portanto, a análise de uma unidade de decisão é realizada mediante a observação das operações em períodos distintos e consecutivos. Vale destacar que os períodos analisados devem estar ligados por variáveis intermediárias que garantem a interdependência entre os períodos (TONE; TSUTSUI, 2010). A Figura 6 ilustra o funcionamento das DMUs sob a ótica das modelagens clássica e dinâmica.

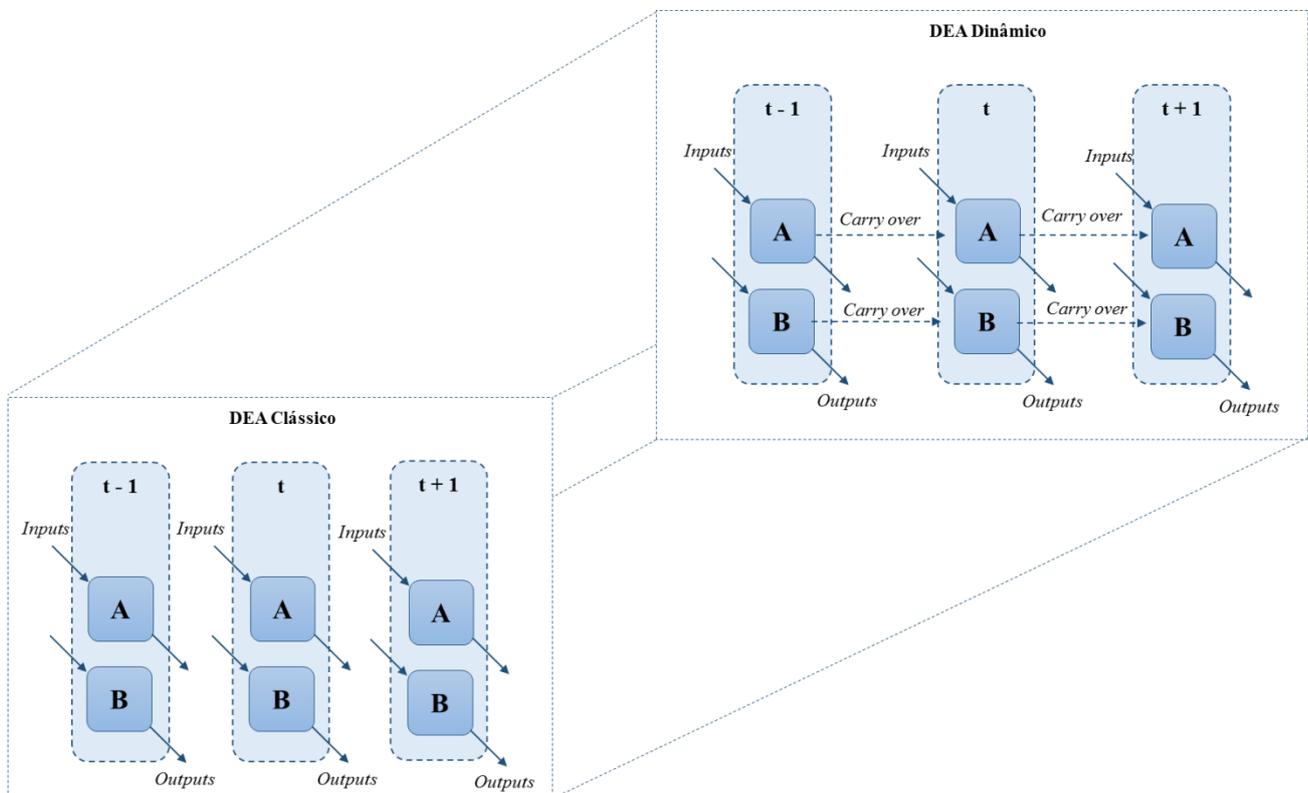


Figura 6 - Modelo clássico e dinâmico da DEA.

A principal característica que distingue a modelagem da DEA da DDEA é a presença dos produtos intermediários que interligam as DMUs entre os períodos de tempo (CHANG *et*

al., 2016). Tais elementos são conhecidos na literatura como: (1) variáveis intermediárias (FÄRE; GROSSKOPF, 1996); (2) *quasi-fixed inputs* (NEMOTO; GOTO, 1999); e (3) *carry-over* (TONE; TSUTSUI, 2010).

Após a pesquisa primária de Färe e Grosskopf (1996), outros estudos foram desenvolvidos utilizando esta abordagem. A segunda extensão dos modelos clássicos da DEA para uma abordagem dinâmica foi realizada por Nemoto e Goto (1999). O estudo fundamenta-se na teoria dos custos de ajustamento do investimento e permite que a ineficiência das unidades em um dado período de tempo seja identificada.

Outra evolução dinâmica da modelagem clássica foi proposta por Tone e Tsutsui (2010). Neste modelo, os autores propõem modelos *Slack Based Measure* (SBM) com estrutura dinâmica para capturar os "*carryovers*" entre os períodos analisados. O modelo é conhecido por *Dynamic Slack Based Measure* (DSBM) e fundamenta-se nas folgas do sistema estudadas anteriormente por Tone e Tsutsui (2009).

Kao (2009) estudou sistemas cujos processos estão conectados entre si e fundamentou o trabalho de Kao (2013). Em sua obra, Kao (2013) abordou a relação entre os processos dos períodos de uma DMU específica e propôs o modelo DDEA relacional para medição da eficiência dinâmica.

Os modelos da DEA são amplamente usados na literatura e suas aplicações abrangem as mais diversas áreas: bancos, cuidados em saúde, agricultura, transportes, educação, manufatura, energias, dentre outras aplicações, conforme ilustram Liu *et al.* (2013). Os autores identificaram que a área de recursos hídricos foi pouco explorada na literatura DEA. Liu *et al.* (2016) destacam, ainda, que os modelos de avaliação da estrutura interna, onde também se enquadram os modelos dinâmicos, são pouco aplicados e apresentam uma tendência crescente para novas publicações.

Quanto à modelagem dinâmica, também é possível identificar uma gama de aplicações e áreas, dentre elas: Agricultura (KHALILI-DAMGHANI *et al.*, 2015); Manufatura (KWEH *et al.*, 2015); Transportes (CHANG *et al.*; 2016); Energia (YOU; JIE, 2016); Bancos (ZHA *et al.*, 2016); e água (POINTON; MATTHEWS, 2016). Uma sistematização foi publicada recentemente por Mariz, Almeida e Aloise (2018) onde há uma compilação de todas as publicações da literatura dinâmica desde o início da modelagem até o ano de 2017.

De maneira específica, o trabalho de Pointon e Matthews (2016) é pioneiro na aplicação da DDEA na área de recursos hídricos. O estudo concentrou-se em mensurar e comparar a eficiência estática e dinâmica de dez companhias de água e esgoto da Inglaterra e País de Gales. Estudos desenvolvidos no Brasil como o de Tupper e Resende (2004) e

Barbosa, Lima e Brusca (2016) abordaram a DEA em problemáticas ligadas à gestão da água, no entanto, trabalhos com o objetivo de mensurar a eficiência dos sistemas de abastecimento, sobretudo com aplicação do método dinâmico, não foram identificados.

CAPÍTULO 3 – DEA E RECURSOS HÍDRICOS

O objetivo deste capítulo é mapear a utilização da técnica Análise Envoltória de Dados em problemáticas ligadas à gestão dos recursos hídricos e, assim, identificar as principais pesquisas, variações de modelagem e tendências de novos trabalhos.

3.1. MAPEAMENTO DAS PUBLICAÇÕES

O mapeamento realizado no presente trabalho, referente à aplicação do DEA em problemáticas relacionadas ao uso eficiente de recursos hídricos, foi construído mediante um corte longitudinal da literatura. O primeiro estudo desta seleção que aborda as duas temáticas foi catalogado no ano de 1993, sendo assim, o intervalo estudado compreende os anos de 1993 a 2017. A distribuição dos trabalhos durante os anos é ilustrada na Figura 7. A amostra selecionada é composta por 115 artigos, sendo 93,97% estudos empíricos e 6,03% estudos inteiramente teóricos.

Embora o número de publicações tenha diminuído no ano de 2017, pode-se observar uma tendência crescente nas publicações. A crise hídrica devido as consequências das alterações climáticas (DUNGLAS, 2000; BECERRA et al., 2016), do aumento considerável da população mundial (FALKENMARK; WIDSTRAND, 1992; BRAGA; KELMAN, 2016) e do desenvolvimento econômico (AWERBUCH, 1994; KANG; LOU; XU, 2015) podem ser apontados como principais fatores que influenciam o crescimento do número de estudos nesta temática.

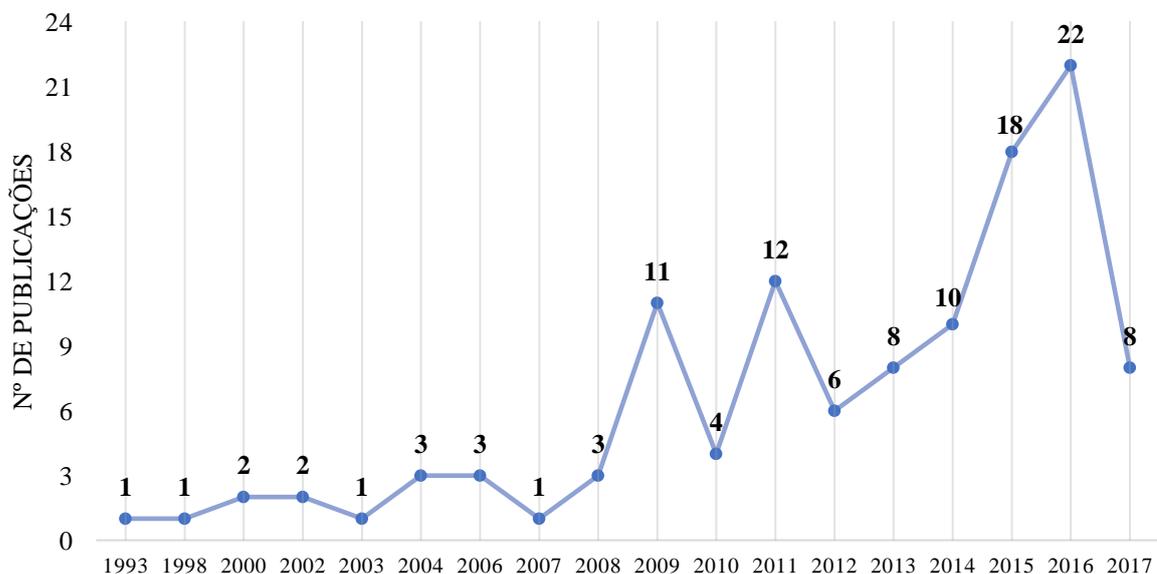


Figura 7 - Evolução do número de publicações.

Quanto aos países que formam o portfólio bibliográfico, é possível observar, por meio da Tabela 2, que China e Austrália são os países com maior número de publicações, com 31,58% e 10,53%, respectivamente. Em seguida, aparecem a Espanha, Reino Unido e Índia. Os países estão distribuídos em todos os continentes e revelam a preocupação mundial com as questões hídricas e os impactos causados pelo uso insustentável da água.

País	Nº de estudos	País	Nº de estudos
China	25	Singapura	2
Espanha	15	Dinamarca	2
Índia	11	França	2
Austrália	8	Portugal	2
Itália	8	Turquia	2
UK	7	México	2
EUA	5	Palestina	1
Malásia	4	Jordânia	1
Paquistão	4	Japão	1
África do Sul	4	Bielorrússia	1
Tunísia	4	Bangladesh	1
Brasil	4	Egito	1
Vietnã	3	Cazaquistão	1
Chile	3	República Macedônica	1
Quênia	2	Lituânia	1
Lau	2	Moldávia	1
Camboja	2	Romênia	1
Tailândia	2	Rússia	1
Indonésia	2	África do norte	1
Filipinas	2	Suécia	1

Tabela 2 - Distribuição geográfica dos estudos selecionados.

Os autores explicam que, na China, as dificuldades resultantes da má distribuição geográfica da água e o crescimento populacional são os principais motivadores da busca pelo uso sustentável. Nesta perspectiva, é possível inferir, também, que a preocupação em desenvolver pesquisas acerca do uso eficiente da água está ligada ao desenvolvimento econômico, uma vez que os países onde há a maior concentração de pesquisa são economicamente desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Por fim, foi possível identificar e elencar os periódicos mais relevantes no que diz respeito aos artigos que tratam da gestão dos recursos hídricos com o auxílio da Análise Envoltória de dados. Ao todo, foram identificados 63 periódicos. A Tabela 3 elenca os 30 principais periódicos, classificados pela quantidade de artigos presentes na seleção estudada.

As revistas que mais catalogaram artigos da amostra selecionada foram: (1) *Utilities Policy*, publicou 8,33%; (2) *Agricultural Water Management*; (3) *Journal of Environmental Management*; (4) *Water Resources Management*, com 3,70% cada, e (5) *Water Science and Technology*, com 2,78%.

Journal	Nº de artigos	%
<i>Utilities Policy</i>	9	7,76%
<i>Agricultural Water Management</i>	4	3,45%
<i>Journal of Environmental Management</i>	5	4,31%
<i>Water Resources Management</i>	4	3,45%
<i>Urban Water Journal</i>	4	3,45%
<i>Water Science and Technology</i>	3	2,59%
<i>Benchmarking</i>	3	2,59%
<i>Irrigation and Drainage</i>	3	2,59%
<i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	3	2,59%
<i>Water Resour Manage</i>	3	2,59%
<i>Water Resources and Economics</i>	3	2,59%
<i>Jurnal Teknologi</i>	2	1,72%
<i>Journal of Geographical Sciences</i>	2	1,72%
<i>Agricultural Sciences in China</i>	2	1,72%
<i>Applied Economics</i>	2	1,72%
<i>Chinese Geographical Science</i>	2	1,72%
<i>Ecological Indicators</i>	2	1,72%
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	2	1,72%
<i>European Journal of Operational Research</i>	2	1,72%
<i>Journal of Cleaner Production</i>	2	1,72%
<i>Journal of Infrastructure Systems</i>	2	1,72%
<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2	1,72%
<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	2	1,72%
<i>Review of Policy Research</i>	2	1,72%
<i>Water (Switzerland)</i>	2	1,72%
<i>Water Policy</i>	2	1,72%
<i>Water Science & Technology: Water Supply</i>	2	1,72%
<i>Sustainability</i>	2	1,72%
<i>African Geographical Review</i>	1	0,86%
<i>Agrekon</i>	1	0,86%

Tabela 3 - Disposição das publicações por periódico.

3.2. FLUXO DE CONHECIMENTO E INTER-RELAÇÃO DA AMOSTRA

A construção de uma rede de citação permite que o fluxo e a evolução do conhecimento sejam identificados (KAFFASH; MARRA, 2016). Sendo assim, a Figura 8 apresenta um grafo que ilustra a inter-relação e a ligação cronológica existente entre os autores da seleção inicial. A acentuação na colocação dos nós representa o quão citado é o artigo. Portanto, destaca-se os trabalhos de Thanassoulis (2000b), Abbot e Cohen (2009), Cubbin e Tzanidakis (1998), Tupper e Resende (2004) e Thanassoulis (2000a).

No universo da amostra selecionada, os autores mais citados são Thanassoulis (2000b), citado 16 vezes, Tupper e Resende (2004), citado 11 vezes, Anwandter e Ozuna

(2002), citado 10 vezes, Cubbin e Tzanidakis (1998), citado 9 vezes e Thanassoulis (2000a), Lambert e Dichev (1993), Sánchez (2006) e Woodbury e Dollery (2004), todos citados 8 vezes cada.

Os trabalhos de Thanassoulis (2000b) e Thanassoulis (2000a) foram os destaques desta pesquisa, uma vez que esses artigos sempre aparecem entre os mais citados. Além destas duas pesquisas, Thanassoulis (2002) ainda aparece com 7 citações entre os artigos da amostra.

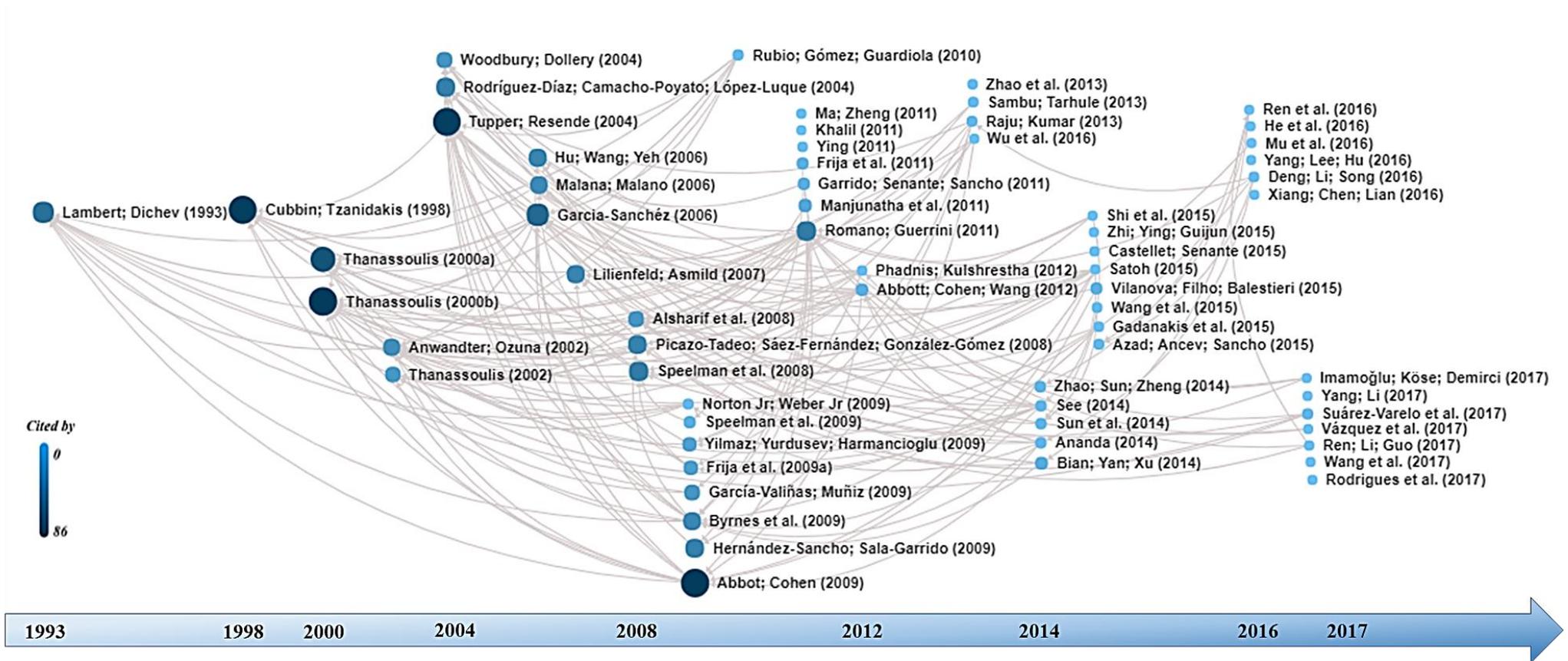


Figura 8 - Interligação entre os autores da amostra.

3.3. ÁREAS DE APLICAÇÃO

Os estudos práticos da seleção podem ser subdivididos em 8 perspectivas: Indústria da água (16,19% dos artigos); Regulamentação de preços (2,86%); Serviço público de água (33,28%); Serviço de Esgoto (10,48%); Irrigação (22,86%); Desenvolvimento econômico (1,90%); Sustentabilidade (8,57%) e Pegada ecológica (2,86%). A Tabela 4 expõe a subdivisão dos autores da amostra nas perspectivas observadas.

É possível identificar que as perspectivas de sustentabilidade e pegada ecológica serão tendência para novas publicações, uma vez que os trabalhos desta perspectiva aparecem nos anos finais da janela temporal. Além disso, é esperado que publicações desta natureza surjam, já que a preocupação com a escassez de água é crescente em todo o planeta.

ANO	Indústria de água	Regulamentação de preços	Serviço público de água	Serviço de esgoto	Irrigação	Desenvolvimento econômico	Sustentabilidade	Pegada Hídrica
1993	[1]							
1998	[2]							
2000		[3]; [4]						
2002			[5]	[6]				
2003			[7]					
2004			[8]; [10]		[9]			
2006			[11]; [12]		[13]			
2007					[14]			
2008			[16]; [17]		[15]			
2009	[25]	[21]	[20];[26]	[19]	[22];[23];[24];[27]			
2010	[29];[30]				[31]		[32]	
2011	[40]		[33];[44]	[35];[41];[43]	[34]; [36];[42]	[38]	[39]	
2012			[45];[47];[48]		[46];[49];[50]			
2013	[52]		[53];[54];[55]; [56];[57]		[51];[58]			
2014	[68]		[59];[61];[63];[65]		[66]		[67]	[60];[62]
2015	[75];[81];[82]		[80];[105];[106]	[73];[79]	[70];[71];[72];[83]		[74];[76];[77];[78]	
2016	[91];[92];[94]; [102];[103]		[84];[87];[95];[96]; [100];[101]	[90]; [97] [98]; [99]	[93];[104]	[85]	[86]; [89]	[88]
2017	[108]	[111]	[110];[113]	[114]	[109];[112]		[107]	

Tabela 4 - Sistematização dos autores por perspectivas.

Fonte: Elaborado a partir de Lambert; Dichev (1993) [1]; Cubbin; Tzanidakis (1998) [2]; Thanassoulis (2000a) [3]; Thanassoulis (2000b) [4]; Anwandter; Ozuna (2002) [5]; Thanassoulis (2002) [6]; Renzetti; Dupont (2003) [7]; Tupper; Resende (2004) [8]; Díaz; Poyato; Luque (2004) [9]; Woodbury; Dollery (2004) [10]; Sánchez (2006) [11]; Hu; Wang; Yeh (2006) [12]; Malana; Malano (2006) [13]; Lilienfeld; Asmild (2007) [14]; Speelman *et al.* (2008) [15]; Tadeo; Fernández; Gómez (2008) [16]; Alsharif *et al.* (2008) [17]; Abbot; Cohen (2009) [18]; Sancho; Garrido (2009) [19]; Byrnes *et al.* (2009) [20]; Valiñas; Muñoz (2009) [21]; Frija *et al.* (2009a) [22]; Yilmaz; Yurdusev; Harmancioglu (2009) [23]; Speelman *et al.* (2009) [24]; Norton Jr.; Weber Jr. (2009) [25]; Tadeo; Gómez; Fernández (2009) [26]; Frija *et al.* (2009b) [27]; Walter *et al.* (2009) [28]; Rubio; Gómez; Guardiola (2010) [29]; Al-Assa'd; Sauer (2010) [30]; Wang (2010) [31]; Singh; Upadhyay; Mittal (2010) [32]; Romano; Guerrini (2011) [33]; Manjunatha et al. (2011) [34]; Garrido; Senante; Sancho (2011) [35]; Frija et al. (2011) [36]; Ying (2011) [37]; Ma; Zheng (2011) [38]; Khalil (2011) [39]; Singh; Upadhyay; Mittal (2010) [40]; Sancho; Senante; Garrido (2011)

[41]; Speelman; D'Haese; D'Haese (2011) [42]; Soderberg (2011) [43]; Guerrini; Romano; Campedelli (2011) [44]; Abbott; Cohen; Wang (2012) [45]; Phadnis; Kulshrestha (2012) [46]; Cruz et al. (2012) [47]; Mbuvi; De Witte; Perelman (2012) [48]; Veetil; Speelman; Huylenbroeck (2012) [49]; Gómez et al. (2012) [50]; Raju; Kumar (2013) [51]; Sambu; Tarhule (2013) [52]; Zhao et al. (2013) [53]; Lo Storto (2013a) [54]; Lo Storto (2013b) [55]; Kulshrestha; Vishwakarma (2013) [56]; Guerrini; Romano; Campedelli (2013) [57]; Njiraini; Guthiga (2013) [58]; Bian; Yan; Xu (2014) [59]; Zhao; Sun; Zheng (2014) [60]; Ananda (2014) [61]; Sun et al. (2014) [62]; See (2014) [63]; Worthington (2014) [64]; Lannier; Porcher (2014); Lannier; Porcher (2014); [65]; Chebil; Frija; Bahri (2014) [66]; Singh; Mittal; Upadhyay (2014) [67]; Lo Storto (2014) [68]; Vilanova; Filho; Balestieri (2015) [69]; Azad; Ancev; Sancho (2015) [70]; Wang et al. (2015) [71]; Gadanakis et al. (2015) [72]; Castellet; Senante (2015) [73]; Shi et al. (2015) [74]; Zhi; Ying; Guijun (2015) [75]; Satoh (2015) [76]; Wang; Bian; Xu (2015) [77]; Guerrini et al. (2015a) [78]; Ananda; Hampf (2015) [79]; Guerrini et al. (2015b) [80]; Senante; Garrido; Lafuente (2015) [81]; Carvalho; Sampaio (2015) [82]; Morales; Heaney (2015) [83]; See (2015) [84]; Watto; Mugerá (2015) [85]; Deng; Li; Song (2016) [86]; Ren et al. (2016) [87]; Xiang; Chen; Lian (2016) [88]; Mu et al. (2016) [89]; He et al. (2016) [90]; Yang; Lee; Hu (2016) [91]; Wu et al. (2016) [92]; Pinto; Simões; Marques (2016) [93]; Senante; Garrido (2016) [94]; Watto; Mugerá (2016) [95]; You; An (2016) [96]; Kamarudin; Ismail (2016) [97]; Kamarudin; Ismail; Ramli (2016) [98]; Senante et al. (2016) [99]; Senante; Donoso; Garrido (2016) [100]; Senante et al. (2016b) [101]; Brettennt; Sharp (2016) [102]; Nyathikala; Kulshrestha (2016) [103]; Pointon; Matthews (2016) [104]; Senante; Garrido (2016) [105]; Varela et al. (2016) [106]; Manjunatha et al. (2016) [107]; Yang; Li (2017) [108]; Suárez-Varelo et al. (2017) [109]; Wang et al. (2017) [110]; Ren; Li; Guo (2017) [111]; Rodrigues et al. (2017) [112]; Vázquez; et al. (2017) [113]; Imamoğlu; Köse; Demirci (2017) [114]; Guerrini et al. (2017) [115].

3.3.1. Indústria da água

A primeira menção da Análise Envoltória de Dados como ferramenta de auxílio no diagnóstico do uso eficiente dos recursos hídricos foi realizada por Lambert e Dichev (1993), na perspectiva da indústria da água. O principal objetivo do trabalho foi identificar fontes de ineficiências na prestação de serviços de água em empresas públicas e privadas. Os autores estudaram a eficiência na distribuição da água de 238 empresas públicas e 33 empresas privadas por meio, unicamente, da modelagem clássica da DEA. Embora as empresas públicas tenham apresentado melhores resultados, ambas obtiveram índices de ineficiência global consideráveis.

Ainda na perspectiva de indústria da água, Cubbin e Tzanidakis (1998) compararam a DEA com a análise de regressão. Os autores destacam que, comumente, as técnicas são tidas como substitutas. No artigo, é discutida a importância de ambas e, além de toda discussão teórica, apresentado um estudo prático com os reguladores britânicos no processo de fixação de preços da água.

Em conformidade com os resultados de Lambert e Dichev (1993), Norton Jr. e Weber Jr. (2009) trabalharam com uma amostra de 549 empresas públicas, 96 privadas sem fins lucrativos e 62 privadas com fins lucrativos. O estudo mostrou que as empresas públicas possuem escores de eficiência maiores que as empresas sem fins lucrativos e estas, por sua vez, superaram os escores das empresas com fins lucrativos.

Rubio, Gómez e Guardiola (2010) também fizeram a comparação entre organizações públicas e privadas, porém concluíram que as empresas privadas obtiveram melhor desempenho. Os autores afirmam que quando a variável qualidade da água é levada em conta, as organizações privadas se sobressaem. Além disso, afirmam que a gestão pública apresentou mais sensibilidade quanto ao quesito sustentabilidade.

Al-Assa'd e Sauer (2010) mediram o desempenho dos serviços de água e esgoto da Jorgânia por meio da DEA em conjunto com o modelo Tobit. Os resultados apontaram para potenciais reduções nos insumos referentes ao abastecimento de água e às despesas operacionais.

O modelo dinâmico foi a única evolução matemática observada nesta perspectiva. Os autores Pointon e Matthews (2016) utilizaram o modelo de Nemoto e Goto (2003) para mensurar a eficiência intertemporal das indústrias inglesas de água e esgoto. Os resultados mostram que a alocação intertemporal inadequada dos insumos quase-fixed é o maior contribuidor da ineficiência.

Suárez-Varelo *et al.* (2017) desenvolveram uma pesquisa que aborda a clássica comparação entre empresas de água públicas e privadas. O destaque desta pesquisa foi a abordagem de variáveis de gestão e a discussão desta perspectiva entre as instituições. Mais uma vez, a gestão das empresas privadas obteve destaque quando comparada à pública, o que corrobora com os resultados de Rubio, Gómez e Guardiola (2010). A Figura 9 ilustra a ligação entre os autores desta perspectiva.

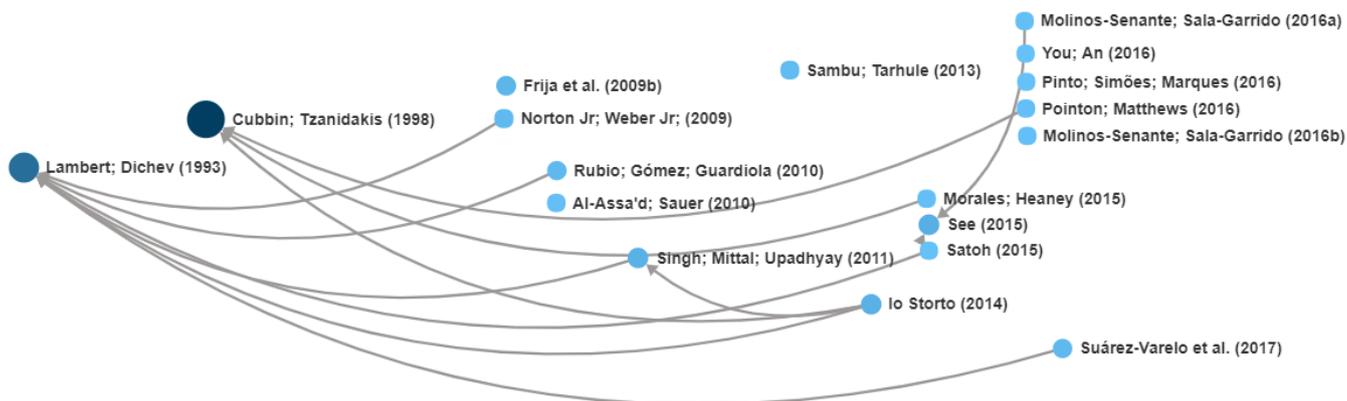


Figura 9 - Perspectiva de indústria da água.

3.3.2. Regulação de preços

A perspectiva de regulamentação de preços de comercialização foi abordada inicialmente nos estudos de Thanassoulis (2000a) e Thanassoulis (2000b). Thanassoulis (2000a) utilizou a DEA para estimar a poupança potencial das despesas operacionais na distribuição de água de 33 empresas na Inglaterra e País de Gales. No estudo de Thanassoulis (2000b), por outro lado, o DEA foi utilizado pelo agente regulador para auxiliar na redução dos preços cobrados devido a ganhos na eficiência operacional de 32 empresas.

Embora o trabalho de Valiñas e Muñiz (2009) também componha a perspectiva de regulamentação de preços, sua modelagem e análise divergem das anteriores. Foram estudadas 3 cidades e o modelo é composto por variáveis diferentes das estudadas por Thanassoulis (2000a) e Thanassoulis (2000b). O estudo buscou reduzir o consumo de insumos e detectar economias nos custos das DMUs. Além disso, os autores fizeram uso de um *input* incontrolável (chuva) para possibilitar maiores comparações entre os municípios da amostra.

Rodrigues *et al.* (2017) desenvolveram um estudo pioneiro que trata de uma análise do desempenho da cobrança pelo uso de água bruta nas bacias hidrográficas do Estado do Ceará,

no Brasil. Esta pesquisa categorizou o uso da água em industrial, abastecimento e irrigação. Segundo os resultados, os encargos do setor industrial obtiveram melhor desempenho, em seguida o setor de abastecimento e, por fim, irrigação. Os autores desta perspectiva são ilustrados na Figura 10.

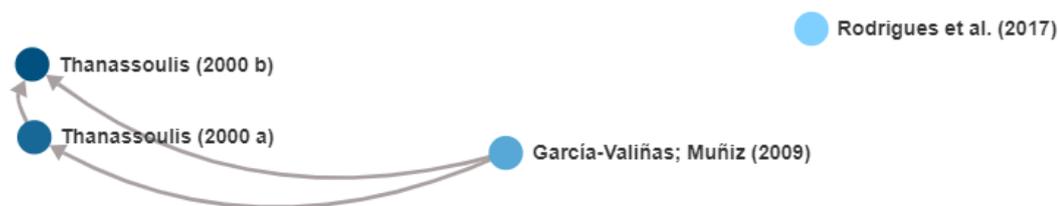


Figura 10 - Perspectiva de Regulamentação de preços.

3.3.3. Serviço público de água

Anwandter e Ozuna (2002) estudaram o serviço público de água e discutiram como as reformas no setor público poderiam melhorar a eficiência operacional dos serviços de água como alternativa à privatização. Como um dos resultados, destacaram que nem a descentralização da responsabilidade pelas operações de água ao nível municipal nem o estabelecimento de um regulador autônomo teve um impacto positivo na eficiência dos serviços de água mexicanos.

Tupper e Resende (2003) são os autores com maior destaque na perspectiva de serviço público de água. O trabalho destes autores objetivou quantificar as eficiências relativas das empresas estatais de água e esgoto do Brasil entre os anos de 1996 e 2000. A amostra estudada é composta por 20 empresas e as análises foram realizadas mediante o uso do modelo CCR associado à estimativas econométricas. Os autores conseguiram identificar sérias ineficiências nas empresas e possíveis economias de custos, porém, devido aos conflitos de jurisdição e à atual estrutura regulatória do setor de águas brasileiro, grande parte dos resultados empíricos é contrafactual.

Woodbury e Dollery (2004) e Sánchez (2006) utilizaram conjuntamente os modelos CCR e BCC para mensurar a eficiência técnica e analisar o sistema de alocação de água em municípios da Austrália e Espanha, respectivamente. O modelo Tobit foi usado como técnica auxiliar em ambos os artigos. Woodbury e Dollery (2004) incorporaram variáveis

quantitativas aos indicadores para retratar de forma mais fiel a realidade estudada e Sánchez (2006), por sua vez, verificou que a densidade populacional influencia fortemente nos resultados das eficiências.

O primeiro avanço matemático desta perspectiva foi realizado por Abbot, Cohen e Wang (2012). Em seu estudo, os autores aplicaram o modelo DEA-Malmquist em 6 cidades da Austrália. Carvalho e Sampaio (2015) e Nyathikala e Kulshrestha (2016) também utilizaram o DEA Malmquist.

No trabalho de Carvalho e Sampaio (2015) foram estudadas os provedores de água e esgoto do Brasil. Os autores verificaram que a regulamentação dos provedores de serviços de água e esgoto não garantiu que os níveis de eficiência fossem maiores e concluíram que a atuação principiante das autoridades reguladoras do Brasil afetam diretamente o alcance dos objetivos reglatórios.

Outros autores estudaram o setor público de água sob a ótica de outros modelagens avançadas da DEA: (1) Networl DEA (NDEA) (Ren; Li; Guo (2017)); Kamarudin; Ismail (2016)); (2) SBM (Shi *et al.* (2015); Guerrini *et al.* (2015); Deng; Li; Song (2016)) e (3) Modelo de Supereficiência (SEDEA) (Guerrini, A.; Romano, G.; Campedelli (2013); Mu *et al.* (2016)). Os autores desta perspectiva são ilustrados na Figura 7.

Bian; Yan; Xu (2014) utilizaram o modelo NDEA para mensurar a eficiência do uso de água e eficiência de descontaminação de águas residuais na China. Diante da séria crise hídrica, os autores concluíram que medidas devem ser tomadas acerca dos sistemas de uso e de descontaminação da água e da reutilização de águas residuais.

A abordagem SBM utilizada por Guerrini et al. (2015) teve como objetivo analisar a eficiência dos utilitários de água dinamarqueses. Os autores analisaram a amostra estudada sob algumas características: tipo de serviço utilizado e densidade de clientes da rede de esgotos. Os resultados mostram que a indústria dinamarquesa de águas residuais é positivamente afetada pela integração vertical de serviços e pela densidade populacional.

Guerrini, Romano e Campedelli (2013) utilizaram o modelo de SEDEA e ampliaram a literatura referente à discussão das sinergias geradas por empresas com alto grau de diversificação de investimentos, à densidade populacional da área atendida e ao porte dos utilitários. A Figura 11 ilustra os autores da perspectiva de serviço público de água.

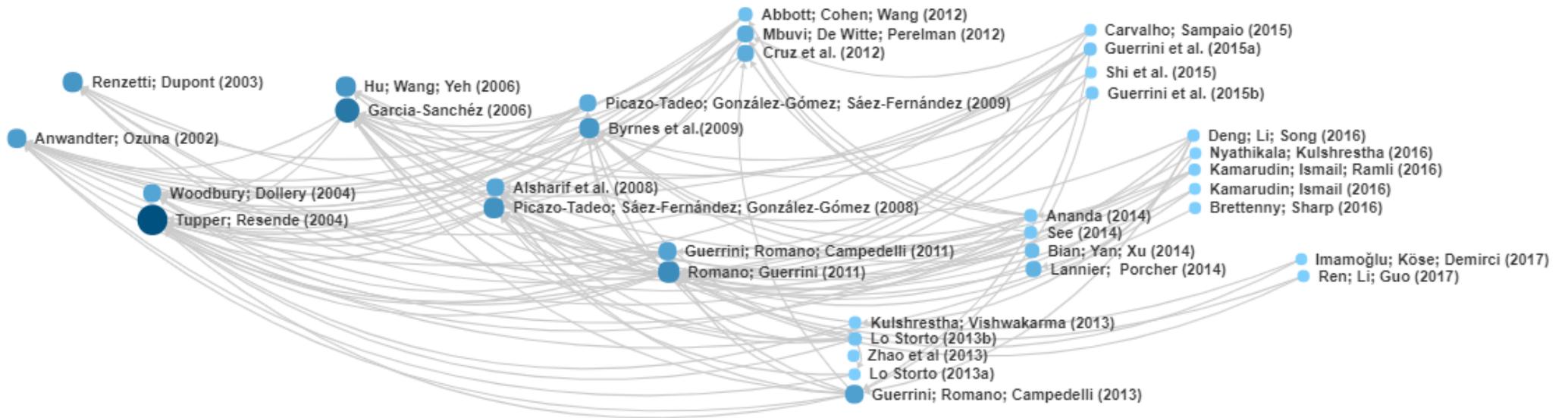


Figura 11 - Perspectiva de serviço público de água.

3.3.4. Serviço de esgoto

O trabalho seminal da perspectiva de serviços de esgoto foi elaborado por Thanassoulis (2002). O autor avaliou as eficiências das empresas responsáveis pelo esgoto na Inglaterra e País de Gales. Ao término do trabalho, o autor destacou que foi possível estimar economias potenciais nas despesas operacionais com esgotos com o objetivo de proteger os interesses públicos.

Foi na perspectiva de serviços de esgoto que o modelo Dual da DEA foi usado pela primeira vez. O objetivo do trabalho de Sancho e Garrido (2009) é analisar a eficiência de 338 estações de tratamento de efluentes como requisito básico para melhorar o potencial de reutilização da água na Espanha. Uma das descobertas do estudo é que as usinas de tratamento são mais eficientes do que plantas menores.

Sancho, Senante e Garrido (2011) usaram o DEA-Mamquist e buscaram estimar os escores de eficiência e as mudanças de produtividade das plantas de tratamento de esgoto da Espanha ao longo do tempo. Os autores concluíram que as eficiência e a produtividade das plantas são afetadas por economias de escalas. Além disso, destacaram que o consumo de energia é um fator chave para o aumento da produtividade. Esta descoberta permite que metas sejam traçadas com o objetivo de reduzir a emissão de carbono.

Castellet e Senante (2015) também estudaram as estações de tratamento espanholas por meio do método SBM. Embora o estudo tenha sido realizado em uma escala bastante inferior, 49 estações de tratamento, os autores utilizaram uma modelagem baseada em folgas e mensuraram a eficiência das estações acrescentando uma ótica financeira às análises.

Guerrini et al. (2017) identificaram os principais influenciadores da eficiência das estações de tratamento italianas. Além das variáveis clássicas, como volume de águas residuais e descartes em geral, os autores estudaram a tecnologia das estações como uma variável do modelo. Esta perspectiva é ilustrada pela Figura 12.

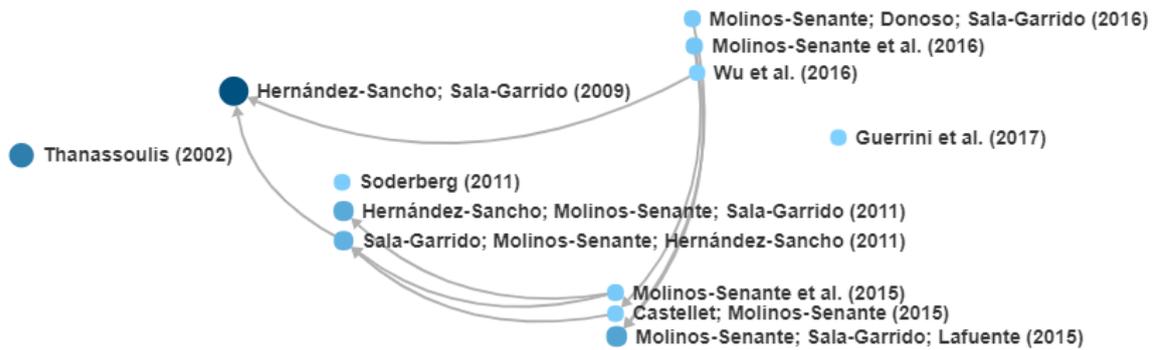


Figura 12 - Perspectiva de serviço de esgoto.

3.3.5. Irrigação

A perspectiva de irrigação foi inicialmente estudada por Díaz, Poyato e Luque (2004) para definir as eficiências dos distritos de irrigação do Sul da Espanha. Os autores subdividiram a área em 4 regiões e discutiram em quais delas a água para irrigação foi melhor utilizada. Malana e Malano (2006) também estudaram o uso da água na perspectiva de irrigação e descreveram o processo de *benchmarking* da eficiência produtiva de trigo em áreas do Paquistão e Índia. Além disso, discutiram a utilização da DEA com *input-output* único, no contexto da irrigação, e os efeitos de se usar múltiplos insumos.

Yilmaz, Yurdusev e Harmancioglu (2009) fizeram o *link* da perspectiva de irrigação com a perspectiva da sustentabilidade quando estudaram 17 distritos da Turquia. Os autores se preocuparam em mensurar o uso eficiente dos recursos hídricos não só para otimizar a produção agrícola, mas para alcançar o uso sustentável. Além disso, o trabalho também abordou o aspecto financeiro da água, uma vez que a rentabilidade do uso foi considerada nas análises.

Raju e Kumar (2013) avançaram as pesquisas na perspectiva de irrigação quando propuseram um novo método de avaliação, denominada modelagem *fuzzy* da DEA. Foram avaliados 16 subsistemas de irrigação e definido um sistema mais adequado para ser usado em ambientes determinísticos e difusos. Os autores afirmam que o modelo adotado representa de forma mais apropriada os problemas reais, uma vez que são mais sensíveis à imprecisão dos experimentos.

Wang *et al.* (2015) associaram o DEA Malmquist ao modelo Tobit e observaram que o investimento e a produção agrícola, o crescimento econômico e a reestruturação industrial e o

ajuste estrutural das plantas têm influência significativa na eficiência do uso da água. A interligação entre os autores desta perspectiva pode ser vista na Figura 13.

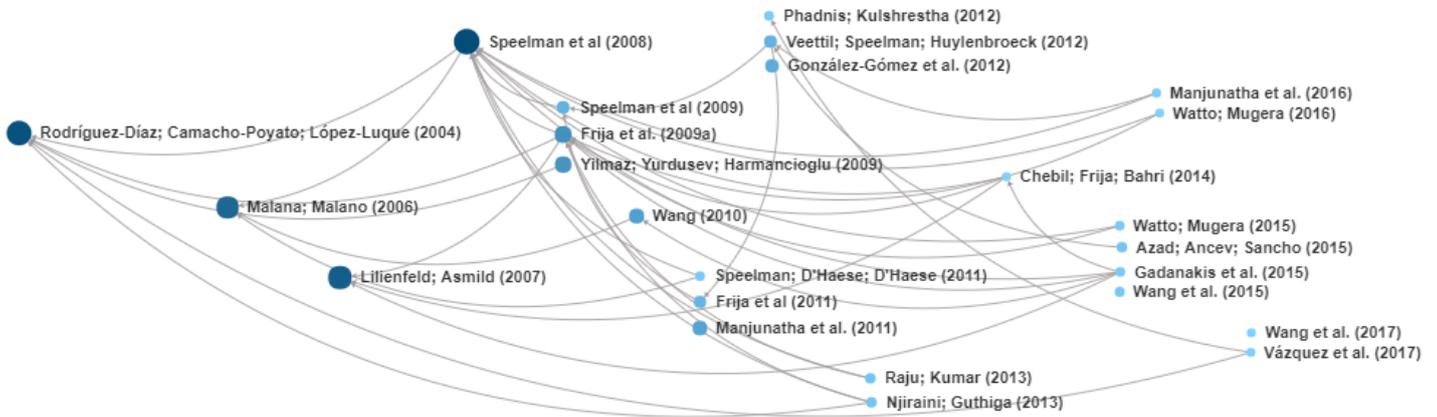


Figura 13 - Perspectiva de irrigação.

3.3.6. Desenvolvimento econômico

Uma característica interessante foi abordada por Ma e Zheng (2011). O estudo realizado pelos autores avalia o grau de harmonia entre o uso dos recursos hídricos, tratados como *input* do processo, e o desenvolvimento econômico de uma área de conservação de água, tratado como *output*. Este estudo foi o primeiro a tratar da perspectiva de desenvolvimento econômico.

Semelhante ao estudo de Ma e Zheng (2011), Ren *et al.* (2016) trabalharam com o objetivo de avaliar a eficiência do uso dos recursos hídricos. Assim, os autores buscaram associar o consumo, em m³, aos benefícios produzidos para a sociedade. Tendo o estudo de Ma e Zheng (2011) quando o de Ren *et al.* (2016) foram realizados na China e ambos apresentaram modelagens avançadas, sendo o primeiro um estudo baseado na supereficiência e o segundo no índice Malmquist.

3.3.7. Sustentabilidade

A perspectiva de sustentabilidade abarca os estudos mais abrangentes no que se refere às análises, uma vez que a sustentabilidade é fundamentada nos pilares econômico, ambiental e social. Os primeiros usos da DEA sob esta perspectiva pode ser vista em Singh, Upadhyay e Mittal (2010) e Khalil (2011).

Embora não aborde especificamente do uso da água, Khalil (2011) trata da aplicação da DEA em 45 indústrias têxtil do Paquistão e avalia o impacto das suas operações nos corpos hídricos. Estudos nesse setor industrial são necessários, haja vista o grande consumo de água pelas indústrias e a quantidade considerável de resíduos poluentes resultantes das atividades que, em muitos casos, não são tratados adequadamente.

Zhi, Ying e Guijun (2015) usaram a modelagem SEDEA e trataram da oferta e da demanda dos recursos hídricos em 31 províncias da China. Os autores Destacaram que o crescimento econômico e a expansão em larga escala da população têm tornado cada vez mais intensa a relação entre oferta e demanda por água.

Assim como Shi et al. (2015), Wang, Bian e Xu (2015) e utilizaram a modelagem SBM. O objetivo da pesquisa foi examinar a eficiência do uso da água e os custos de redução de dois principais poluentes nas águas residuais, ou seja, a demanda química de oxigênio (COD) e amônia nitrogenada (NH4-N), de sistemas industriais regionais na China.

Yang e Li (2017) utilizaram uma modelagem baseada em folgas para mensurar a eficiência dos recursos hídricos na China. Além disso, o modelo evolui as análises por tratar as DMU em dois estágios, ligados pelo volume de águas residuais, variável indesejada. Outra característica do trabalho é a discussão da relação entre consumo de água e desenvolvimento econômico. A Figura 14 esboça a rede de autores na perspectiva da sustentabilidade.



Figura 14 - Perspectiva a sustentabilidade.

3.3.8. Pegada hídrica

O conceito de pegada hídrica está ligado volume de água consumido na produção de bens e serviços, durante toda a extensão da cadeia do ciclo de vida. Seu objetivo é fornecer uma visão abrangente do uso da água, ponderando o volume consumido de acordo com o volume necessário para assimilação dos poluentes (HOEKSTRA et al., 2009).

Sun *et al.* (2014) e Zhao, Sun e Zheng (2014) estudaram as províncias da China sob a ótica da Pegada Hídrica. A principal motivação para a realização das pesquisas foi medir a eficiência do uso dos recursos hídricos e discutir questões críticas como a escassez de água e a deterioração da qualidade dos ecossistemas aquáticos. Em ambos os trabalhos foi utilizado o modelo baseado em folgas.

Expostas as perspectivas encontradas, referente ao uso da DEA na gestão de recursos hídricos, a Figura 10 ilustra a classificação dos artigos da amostra quanto a perspectiva abordada. Observa-se a grande representatividade das perspectivas de Serviço Público de Água e Irrigação que abarcam 31,48% e 25,93% da amostra, respectivamente.

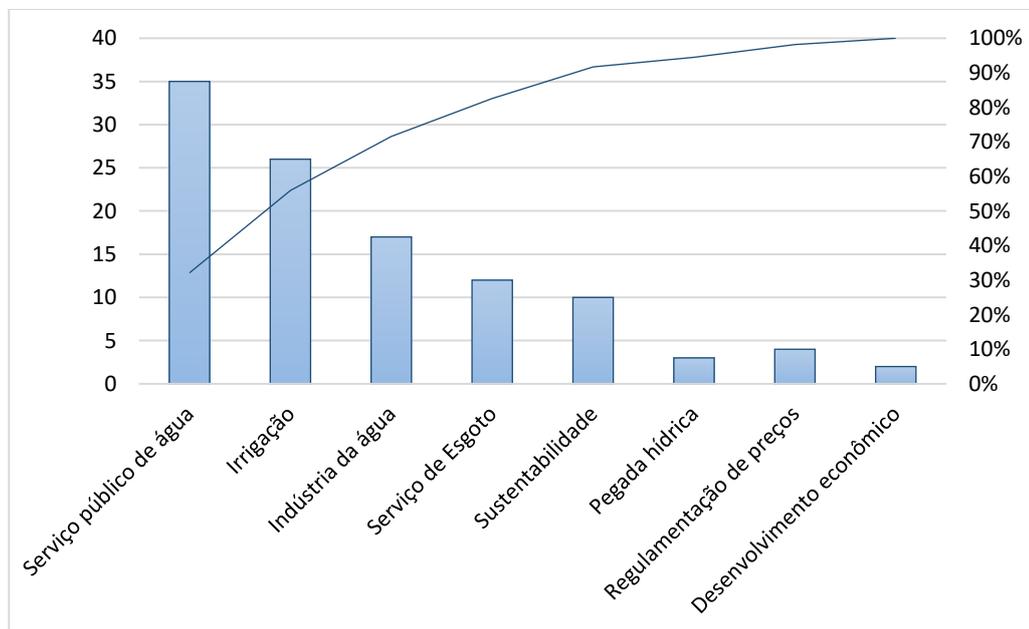


Figura 15 - Quantificação do número de artigos por perspectiva.

3.4. MODELAGENS UTILIZADAS NA LITERATURA

Dentre a amostra de artigos selecionada, o modelo BCC foi utilizado de forma única em 29,82% dos artigos, enquanto o modelo CCR foi utilizado em 17,54% dos trabalhos. Alguns autores construíram suas análises empregando as duas modelagens clássicas. Os artigos que apresentaram o uso conjunto dos modelos CCR e BCC representam 21,93% da amostra. Apenas 2 trabalhos usaram o modelo dual: Malana e Malano (2006) e Sancho e Garrido (2009).

Além dos modelos clássicos da DEA, outras modelagens foram observadas nos artigos selecionados. O Modelo Slack-Based Measure (SBM) foi observado em 8,77% dos trabalhos, Índice Malmquist em 7,89%, o modelo DEA de Supereficiência foi usado em 3,51%. Por fim,

a modelagem Network DEA (NDEA) foi usada em 2,63% da amostra, assim como o o modelo Non-Radial DEA. A modelagem dinâmica (DDEA) foi utilizada uma única vez. A Figura 16 dispõe dos modelos citados anteriormente e ilustra o percentual de utilização de cada um deles.

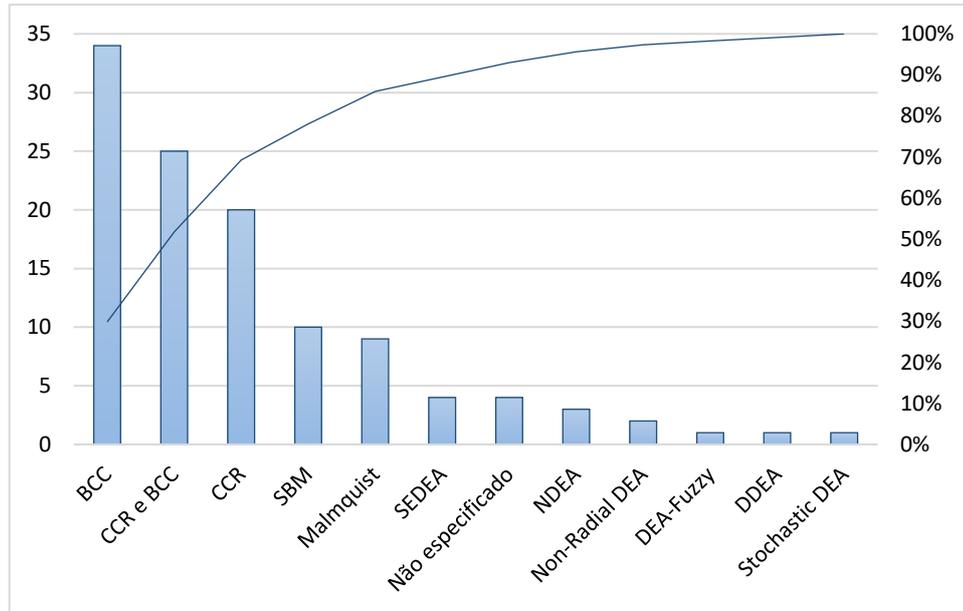


Figura 16 - Modelos DEA abordados nos artigos.

A orientação aos *inputs* é mais adequada quando se trabalha com a gestão de recursos hídricos, uma vez que os estudos visam refletir a realidade e possuem o objetivo de diminuir o consumo de água (LILIENFELD e ASMILD, 2007; Speelman *et al.*, 2009; GADANAKIS *et al.*, 2015). Logo, pode-se observar que 71,21% dos artigos utilizaram a orientação aos *inputs*, enquanto 11,92% utilizaram orientação aos *outputs*. Dentre os artigos práticos, 16,87% não esclareceram qual a orientação utilizada.

Por fim, foi possível identificar algumas ferramentas auxiliares que, em conjunto com a DEA, foram utilizadas na mensuração da eficiência e na análise dos problemas relacionados aos recursos hídricos. Dentre os 114 artigos da amostra, 31,48% deles usaram técnicas auxiliares. As ferramentas e a frequência do uso são ilustradas pela Figura 17.

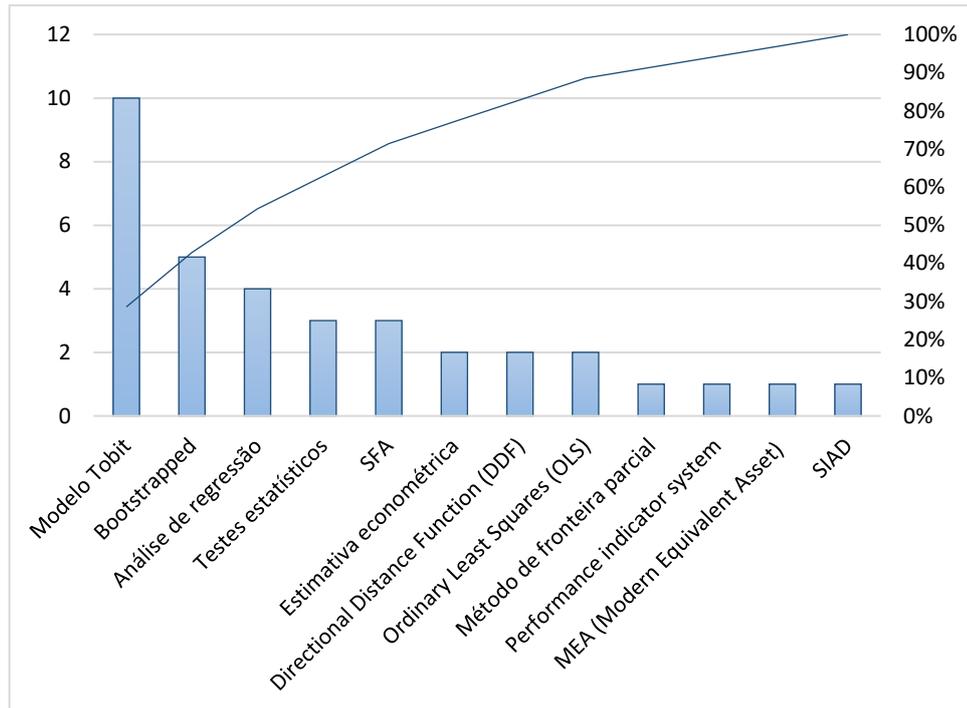


Figura 17 - Técnicas auxiliares usadas em conjunto com a DEA.

As principais técnicas auxiliares usadas em conjunto com a DEA foram: (1) Modelo Tobit (28,57%); (2) Bootstrapped Truncated Regression (14,29%) e (3) Análise de regressão (11,43%). Todas as informações apresentadas acima foram esquematizadas e estão dispostas no Tabela 4. O objetivo desta tabela é proporcionar um panorama geral do perfil das publicações encontrada.

Todas as informações apresentadas acima foram esquematizadas e estão dispostas no Tabela 3. O objetivo desta tabela é proporcionar um panorama geral do perfil das publicações encontradas, dos modelos, orientação e técnicas auxiliares.

A escassez dos recursos hídricos em todo o planeta é uma realidade e a importância de trabalhos que auxiliem a gestão eficiente de tais recursos é indispensável. Portanto, salienta-se a importância desta pesquisa.

AUTOR		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32			
Tipo	Teórico							X											X																	
	Prático	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Teórico / Prático		X																																	
Modelagem	CCR		X	X	X		X		X		X	X	X			X	X			X	X	X	X	X								X				
	BCC	X	X			X				X	X	X		X	X	X		X					X	X			X	X		X	X			X		
	SBM																																			
	NDEA																																			
	DEA - Malmquist																																			
	DEA - Fuzzy																																			
	SEDEA																																			
	Non-radial DEA																																			
	DDEA																																			
	Stochastic DEA																																			
	Não especificado																											X								
	Orientação	Input	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
Output											X						X					X														
Não especificado								X											X										X							
Técnicas auxiliares	Testes estatísticos	X								X																										
	Modelo Tobit										X					X							X					X			X	X				
	Estimativa econométrica								X																											
	Análise de regressão																																			
	<i>Directional Distance Function (DDF)</i>																																			
	Método de Fronteira Parcial																																			
	<i>Ordinary Least Squares (OLS)</i>																																			
	<i>Performance Indicator System</i>		X																																	
	<i>Modern Equivalent Asset (MEA)</i>																											X								
	<i>Stochastic Frontier Analysis (SFA)</i>																																			
	<i>Bootstrapped</i>																																			
SIAD																																				

Tabela 5 - Esquema dos artigos selecionados.

Fonte: Elaborado a partir de Lambert; Dichev (1993) [1]; Cubbin; Tzanidakis (1998) [2]; Thanassoulis (2000a) [3]; Thanassoulis (2000b) [4]; Anwandter; Ozuna (2002) [5]; Thanassoulis (2002) [6]; Renzetti; Dupont (2003) [7]; Tupper; Resende (2004) [8]; Díaz; Poyato; Luque (2004) [9]; Woodbury; Dollery (2004) [10]; Sánchez (2006) [11]; Hu; Wang; Yeh (2006) [12]; Malana; Malano (2006) [13]; Lilienfeld; Asmild (2007) [14]; Speelman *et al.* (2008) [15]; Tadeo; Fernández; Gómez (2008) [16]; Alsharif *et al.* (2008) [17]; Abbot; Cohen (2009) [18]; Sancho; Garrido (2009) [19]; Byrnes *et al.* (2009) [20]; Valiñas; Muñiz (2009) [21]; Frija *et al.* (2009a) [22]; Yilmaz; Yurdusev; Harmancioglu (2009) [23]; Speelman *et al.* (2009) [24]; Norton Jr.; Weber Jr. (2009) [25]; Tadeo; Gómez; Fernández (2009) [26]; Frija *et al.* (2009b) [27]; Walter *et al.* (2009) [28]; Rubio; Gómez; Guardiola (2010) [29]; Al-Assa'd; Sauer (2010) [30]; Wang (2010) [31]; Singh; Upadhyay; Mittal (2010) [32].

Autor		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64		
Tipo	Teórico					X																												X	
	Prático	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Teórico / Prático																																		
Modelagem	CCR	X	X		X		X	X							X	X			X	X	X	X	X	X											
	BCC	X		X	X			X	X						X		X		X			X	X	X			X								
	SBM																								X										
	NDEA																																		
	DEA - Malmquist										X	X			X																				
	DEA - Fuzzy																					X													
	SEDEA						X													X															
	Non-radial DEA																																		
	DDEA																																		
	Stochastic DEA													X	X																				
	Não especificado												X	X																					
	Orientação	Input	X	X		X		X		X	X	X				X	X		X		X	X		X	X	X	X	X				X		X	
Output				X			X										X		X			X													
Não especificado						X						X	X	X														X	X			X		X	
Técnicas auxiliares	Testes estatísticos	X																																	
	Modelo Tobit																								X			X							
	Estimativa econométrica																																		
	Análise de regressão																																		
	<i>Directional Distance Function (DDF)</i>																																		
	Método de Fronteira Parcial																																		
	<i>Ordinary Least Squares (OLS)</i>																																		
	<i>Performance Indicator System</i>																											X							
	<i>Modern Equivalent Asset (MEA)</i>																																		
	<i>Stochastic Frontier Analysis (SFA)</i>																																		
	<i>Bootstrapped</i>																																		
SIAD																															X		X		

Tabela 5 – Continuação.

Fonte: Elaborado a partir de Romano; Guerrini (2011) [33]; Manjunatha *et al.* (2011) [34]; Garrido; Senante; Sancho (2011) [35]; Frija *et al.* (2011) [36]; Ying (2011) [37]; Ma; Zheng (2011) [38]; Khalil (2011) [39]; Singh; Upadhyay; Mittal (2010) [40]; Sancho; Senante; Garrido (2011) [41]; Speelman; D'Haese; D'Haese (2011) [42]; Soderberg (2011) [43]; Guerrini; Romano; Campedelli (2011) [44]; Abbott; Cohen; Wang (2012) [45]; Phadnis; Kulshrestha (2012) [46]; Cruz *et al.* (2012) [47]; Mbuvi; De Witte; Perelman (2012) [48]; Veetil; Speelman; Huylenbroeck (2012) [49]; Gómez *et al.* (2012) [50]; Raju; Kumar (2013) [51]; Sambu; Tarhule (2013) [52]; Zhao *et al.* (2013) [53]; Lo Storto (2013a) [54]; Lo Storto (2013b) [55]; Kulshrestha; Vishwakarma (2013) [56]; Guerrini; Romano; Campedelli (2013) [57]; Njiraini; Guthiga (2013) [58]; Bian; Yan; Xu (2014) [59]; Zhao; Sun; Zheng (2014) [60]; Ananda (2014) [61]; Sun *et al.* (2014) [62]; See (2014) [63]; Worthington (2014) [64].

AUTOR		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	
Tipo	Teórico					X																										X	
	Prático	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Teórico / Prático																																
Modelagem	CCR		X	X					X							X		X					X		X		X	X					
	BCC	X	X		X				X			X				X		X	X				X					X	X	X	X		
	SBM									X	X		X		X							X			X		X					X	
	NDEA																																
	DEA - Malmquist							X						X				X															
	DEA - Fuzzy																																
	SEDEA																																
	Non-radial DEA						X																										
	DDEA																																
	Stochastic DEA																																
	Não especificado																																
Orientação	Input	X	X	X	X			X	X	X		X					X	X		X		X	X	X	X	X		X	X	X	X		
	Output						X													X													
	Não especificado					X					X		X		X	X					X							X					X
Técnicas auxiliares	Testes estatísticos																																
	Modelo Tobit							X																									
	Estimativa econométrica																																
	Análise de regressão																																
	Directional Distance Function (DDF)																																
	Método de Fronteira Parcial																																
	Ordinary Least Squares (OLS)																		X											X			
	Performance Indicator System	X	X	X																													
	Modern Equivalent Asset (MEA)																																
	Stochastic Frontier Analysis (SFA)																																
Bootstrapped												X																			X		
SIAD																																	

Tabela 5 – Continuação.

Fonte: Elaborado a partir de Lannier; Porcher (2014) [65]; Chebil; Frijia; Bahri (2014) [66]; Singh; Mittal; Upadhyay (2014) [67]; Lo Storto (2014) [68]; Vilanova; Filho; Balestieri (2015) [69]; Azad; Ancev; Sancho (2015) [70]; Wang et al. (2015) [71]; Gadanakis et al. (2015) [72]; Castellet; Senante (2015) [73]; Zhi; Ying; Guijun (2015) [74]; Satoh (2015) [75]; Wang; Bian; Xu (2015) [76]; Ananda; Hampf (2015) [77]; Shi et al. (2015) [78]; Senante; Garrido; Lafuente (2015) [79]; Carvalho; Sampaio (2015) [80]; Morales; Heaney (2015) [81]; See (2015) [82]; Watto; Mugerá (2015) [83]; Deng; Li; Song (2016) [84]; Ren et al. (2016) [85]; Xiang; Chen; Lian (2016) [86]; Mu et al. (2016) [87]; He et al. (2016) [88]; Yang; Lee; Hu (2016) [89]; Wu et al. (2016) [90]; Pinto; Simões; Marques (2016) [91]; Senante; Garrido (2016) [92]; Watto; Mugerá (2016) [93]; You; An (2016) [94]; Kamarudin; Ismail (2016) [95].

AUTOR		96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
Tipo	Teórico																			
	Prático	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Teórico / Prático																			
Modelagem	CCR	X		X		X			X	X	X								X	
	BCC							X		X	X				X			X	X	X
	SBM												X							
	NDEA															X				
	DEA - Malmquist				X		X													
	DEA - Fuzzy																			
	SEDEA																			
	Non-radial DEA		X																	
	DDEA							X												
	Stochastic DEA																			
	Não especificado																			
Orientação	<i>Input</i>	X		X		X	X	X	X	X	X			X	X			X	X	X
	<i>Output</i>		X		X												X			
	Não especificado		X									X	X			X				
Técnicas auxiliares	Testes estatísticos																			
	Modelo Tobit																			
	Estimativa econométrica																			
	Análise de regressão																			
	<i>Directional Distance Function (DDF)</i>													X						
	Método de Fronteira Parcial																			
	<i>Ordinary Least Squares (OLS)</i>																			X
	<i>Performance Indicator System</i>										X									
	<i>Modern Equivalent Asset (MEA)</i>														X					
	<i>Stochastic Frontier Analysis (SFA)</i>																			
	<i>Bootstrapped</i>										X	X								
SIAD																X				

Tabela 5 – Continuação.

Fonte: Elaborado a partir de Kamarudin; Ismail (2016) [96]; Senante et al. (2016a) [97]; Senante; Donoso; Garrido (2016) [98]; Senante et al. (2016b) [99]; Brettennt; Sharp (2016) [100]; Nyathikala; Kulshrestha (2016) [101]; Pointon; Matthews (2016) [102]; Senante; Garrido (2016) [103]; Manjunatha et al. (2016) [104]; Guerrini et al. (2015a) [105]; ; Guerrini et al. (2015b) [106]; Yang; Li (2017) [107]; Suárez-Varelo et al. (2017) [108]; Wang et al. (2017) [109]; Ren; Li; Guo (2017) [110]; Rodrigues et al. (2017) [111]; Vázquez; et al. (2017) [112]; Imamoğlu; Köse; Demirci (2017) [113]; Guerrini et al. (2017) [114].

CAPÍTULO 4 – MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos metodológicos desta pesquisa e explicar as etapas adotadas. O método utilizado neste trabalho está dividido em 5 subseções, necessárias para que o objetivo da pesquisa seja alcançado: (1) Pesquisa bibliográfica sistemática; (2) Abrangência do estudo e definição das DMUs; (3) Definição das variáveis; (4) Instrumentos de coleta de dados; e (5) Idealização do modelo e análise dos resultados. A Figura 12 ilustra a sequência das atividades.

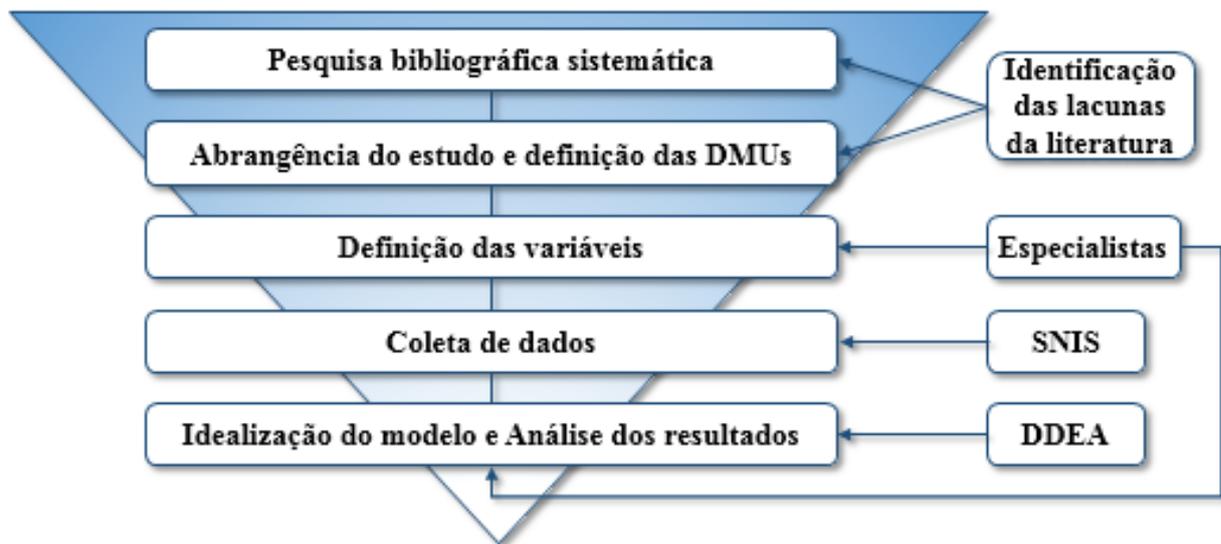


Figura 18 - Sequência das atividades da pesquisa.

4.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Para que a realização desta pesquisa seja possível, faz-se necessário classificá-la conforme a sua natureza, objetivos, métodos e abordagem. Além disso, para que o objetivo central seja alcançado, será utilizada a técnica não paramétrica, DDEA, que, por sua vez, requer uma série de etapas. Estas etapas serão descritas nas próximas seções.

Classifica-se a presente pesquisa como aplicada, no que tange à natureza, uma vez que o estudo se concentra em determinar a eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água das cidades do RN e busca evoluir os trabalhos, no sentido da modelagem, de Sánchez (2006), Alsharif *et al.* (2008), Singh, Mittal e Upadhyay (2011), Lo Storto (2013b), Kulshrestha e Vishwakarma (2013) e Brettenny e Sharp (2016), sob a ótica da modelagem e ambiente aqui estudados. A abordagem utilizada para que o objetivo seja alcançado será quantitativa, já que

será necessário o uso da técnica DDEA. Quanto aos objetivos, esta pesquisa classifica-se como descritiva, pois o panorama estadual do abastecimento de água, as principais razões para o aumento da crise hídrica e as possíveis melhorias serão discutidos.

Por fim, foi necessária uma pesquisa bibliográfica para fundamentar e orientar a realização deste trabalho. Quanto aos procedimentos técnicos, pode-se classifica-la como uma pesquisa bibliográfica sistemática, realizada com o objetivo de identificar as tendências de trabalho nas áreas estudadas. O Quadro 4 resume as classificações deste trabalho:

CRITÉRIO METODOLÓGICO	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA
Natureza	Aplicada
Abordagem	Quantitativa
Objetivos	Descritiva
Procedimentos técnicos	Pesquisa bibliográfica sistemática

Quadro 4 – Enquadramentos da pesquisa.

4.2. REVISÃO DA LITERATURA

Para fundamentar este trabalho e para vislumbrar o panorama das publicações, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática acerca dos eixos de pesquisa adotados: *Data Envelopment Analysis* e Gestão de Recursos Hídricos.

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases científicas *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, e permitiu que os eixos deste estudo fossem observados de forma mais ampla. Após a busca por material, foi possível identificar a importância das pesquisas ligadas à gestão dos recursos hídricos, sobretudo, frente à eminente crise global.

De forma geral, a revisão da literatura, mediante uma pesquisa bibliográfica sistemática, foi utilizada para: (1) Buscar os principais autores, bem como suas obras, das áreas de DEA e recursos hídricos; e (2) Identificar as tendências de aplicações práticas na área de pesquisa. O procedimento inicial da pesquisa bibliográfica foi a busca isolada dos temas. Esta manobra foi realizada para que a magnitude dos temas fosse conhecida. O resultado inicial foi uma seleção de milhares de obras, o que confirma a relevância do tema e da técnica utilizada.

Em seguida, foi realizada a pesquisa com a intersecção dos temas: DEA e recursos hídricos. A ordenação das etapas da pesquisa, as palavras-chave utilizadas, o número de obras encontradas, a quantidade selecionada e o procedimento de análise são explicados pela Figura 13.

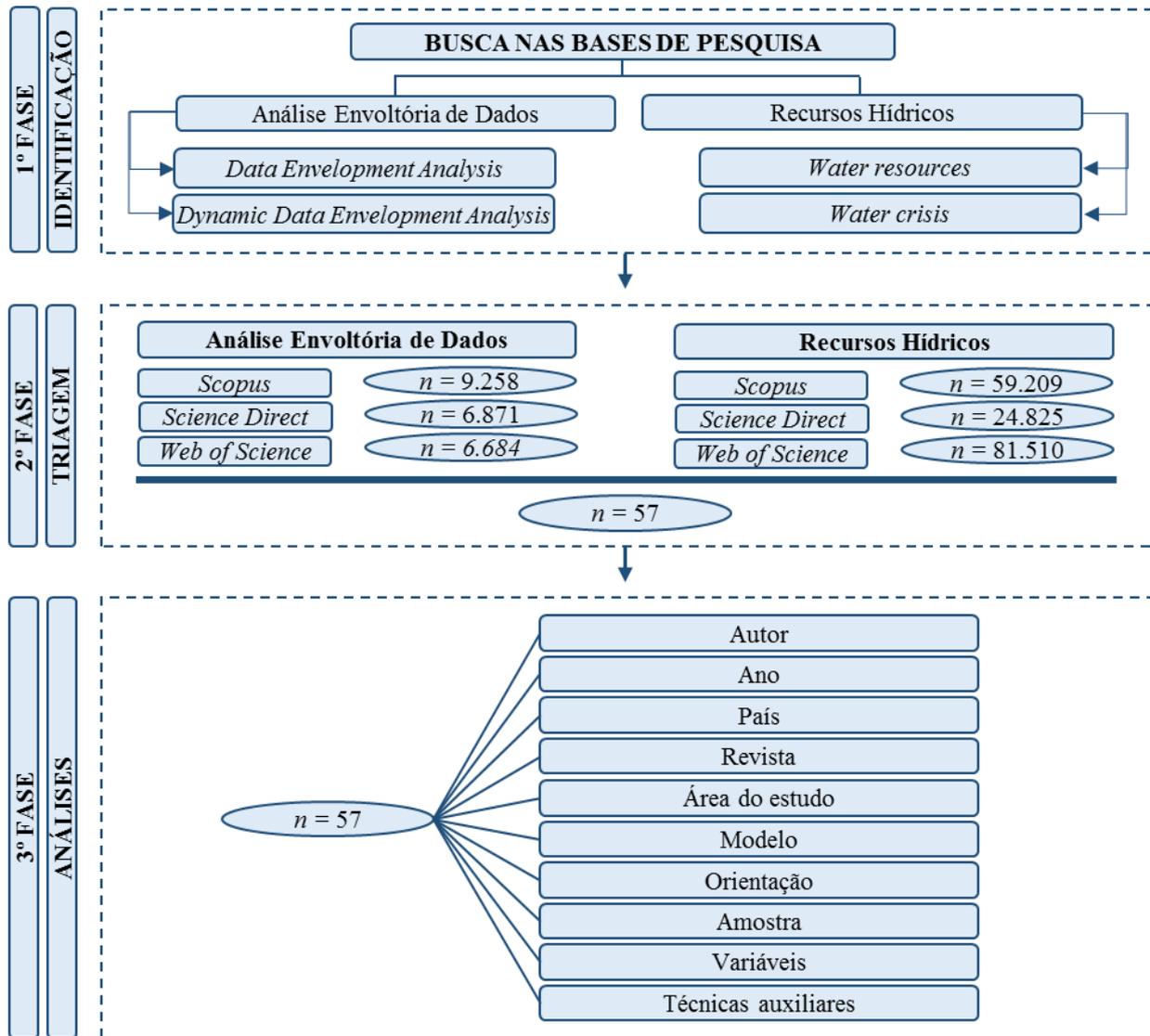


Figura 19 - Sistematização da pesquisa bibliográfica.

A seleção possui artigos publicados entre os anos de 1993 e 2016. Com a combinação de palavras-chave adotada, foi realizada uma seleção prévia de 77 artigos que, de alguma forma, utilizaram a Análise Envoltória de Dados na área de Recursos Hídricos. Na leitura prévia, necessária para a elegibilidade destes artigos, foram observados os títulos, resumos e palavras-chave definidos pelos autores.

A leitura prévia possibilitou a redução da seleção devido à exclusão de trabalhos duplicados ou que não se adequaram ao escopo da pesquisa. A seleção final compreende o conjunto de 57 artigos. Uma planilha foi organizada para que a análise detalhada dos trabalhos fosse otimizada e será apresentada adiante.

Na etapa de análise, os artigos foram lidos na íntegra. A leitura e classificação dos trabalhos foi realizada mediante a observação dos seguintes tópicos: Autor, Ano, País, Revista, Área do estudo, Modelo, Orientação, Amostra, Variáveis utilizadas e Técnicas auxiliares. A

observação destes aspectos é importante para que a análise bibliométrica seja integralmente construída.

A pesquisa e seleção inicial não abarcaram, na íntegra, os artigos relevantes para as temáticas adotadas. Diante disto, outra pesquisa foi realizada incluindo as palavras-chave "*population growth*" e/ou "*climate changes*", pois a grande maioria dos estudos apontam estas variáveis como responsáveis pela crise hídrica mundial. Portanto, foram acrescentados à amostra 39 pesquisas.

As principais características dos artigos selecionados foram captadas mediante a observação dos seguintes quesitos: (1) Classificação: teórico, prático e teórico/prático; (2) Perspectivas de aplicação; (3) Variáveis utilizadas; (4) Amostra estudada; (5) Modelagem utilizada; (6) Técnicas auxiliares adotadas; e (7) Referências bibliográficas.

Foi possível identificar algumas lacunas na literatura: (1) Uso restrito da DEA no âmbito dos recursos hídricos no Brasil; (2) Poucas aplicações voltadas para o uso da água nas cidades ou comunidades; (3) Poucos trabalhos voltados para eficiência dos sistemas de abastecimentos urbanos e, dentre eles, nenhuma considera a intertemporalidade agregada à gestão da água. Frente às lacunas apresentadas, este trabalho visa preenchê-las e contribuir para a comunidade acadêmica.

4.3. ABRANGÊNCIA DO ESTUDO E DETERMINAÇÃO DAS DMUs

Esta pesquisa tem por objetivo desenvolver um modelo dinâmico para medição da eficiência das cidades do RN no que diz respeito ao abastecimento urbano de água. Em busca de uma boa representatividade para o estudo, as cidades eleitas para compor a seleção foram aquelas atendidas pela CAERN, uma vez que a companhia atende 155 dos 167 municípios do Estado. A Figura 14 representa as cidades consideradas na modelagem.

A composição final da seleção de municípios foi limitada pela presença de todos os dados no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Portanto, foi possível compor um banco de dados com informações de 137 dos 155 municípios atendidos pela CAERN. A Tabela 4 estratifica os municípios selecionados e sua respectiva micro e mesorregião.

Quanto ao corte temporal adotado, optou-se por incluir, neste estudo, os anos que compõem o recente período de forte estiagem, ou seja, o intervalo compreendido entre os anos de 2010-2015, conforme dados de Brasil (2017). Além disso, é válido destacar que o corte temporal também foi restrito pela SNIS, uma vez que a plataforma ainda não dispõe dos dados de 2016, sendo 2015, portanto, o ano mais recente do sistema.

Cidade	Microrregião	Mesorregião	Cidade	Microrregião	Mesorregião	Cidade	Microrregião	Mesorregião	
Bom Jesus	Agreste Potiguar	Agreste Potiguar	Apodi	Chapada do Apodi	Oeste Potiguar	Rafael Fernandes	Pau dos Ferros	Oeste Potiguar	
Ielmo Marinho			Caraúbas			Rodolfo Fernandes			
Boa Saúde			Felipe Guerra			Severiano Melo			
Jundiá			Governador Dix-Sept Rosado			Taboleiro Grande			
Lagoa d'Anta			Pedra Grande	Litoral Nordeste	Tenente Ananias	Leste Potiguar	Seridó Ocidental	Viçosa	Central Potiguar
Lagoa de Pedras			Pureza		Caicó				
Lagoa Salgada			São Miguel do Gostoso		Ipueira				
Monte Alegre			Taipu		Jardim de Piranhas				
Nova Cruz			Touros	Litoral Sul	Arês	Leste Potiguar	São Fernando	Seridó Oriental	
Passa e Fica			Arês		São João do Sabugi				
Passagem			Baía Formosa		Serra Negra do Norte				
Serra Caiada			Canguaretama		Timbaúba dos Batistas				
Riachuelo			Espírito Santo		Acari				
Santa Maria			Goianinha		Cruzeta				
Santo Antônio			Montanhas		Currais Novos				
São Paulo do Potengi			Pedro Velho		Jardim do Seridó				
São Pedro			Senador Georgino Avelino		Ouro Branco				
Senador Elói de Souza			Tibau do Sul		Parelhas				
Várzea			Vila Flor	Santana do Seridó	Serra de Santana				
Vera Cruz			Macaíba	São José do Seridó					
Afonso Bezerra	Nísia Floresta	Cerro Corá							
Angicos	São José de Mipibu	Macaíba	Macau	Central Potiguar	Florânia	Serra de São Miguel			
Caiçara do Rio do Vento	Caiçara do Norte				Santana do Matos				
Fernando Pedroza	Guamaré				Coronel João Pessoa				
Jardim de Angicos	Macau				Doutor Severiano				
Lajes	São Bento do Norte	Médio Oeste	Oeste Potiguar	Oeste Potiguar	Encanto	Oeste Potiguar			
Bento Fernandes	Campo Grande				Riacho de Santana				
Jandaíra	Janduís								

João Câmara	Borborema Potiguar	Messias Targino	Mossoró	Leste Potiguar	Venha-Ver	Umarizal	
Parazinho		Paraú			Almino Afonso		
Poço Branco		Triunfo Potiguar			Frutuoso Gomes		
Barcelona		Upanema			Lucrecia		
Campo Redondo		Areia Branca			Martins		
Coronel Ezequiel		Baraúna			Olho-D'ÁGUA do Borges		
Jaçanã		Grossos			Patu		
Japi		Mossoró			Serrinha dos Pintos		
Lagoa de Velhos		Tibau			Umarizal		
Lajes Pintadas		Natal			Açu		Vale do Açu
Monte das Gameleiras		Parnamirim	Alto do Rodrigues				
Ruy Barbosa		Francisco Dantas	Carnaubais				
São Bento do Trairí		Itaú	Ipanguaçu				
São José do Campestre		José da Penha	Jucurutu				
São Tomé		Marcelino Vieira	Pendências				
Serra de São Bento		Paraná	Porto do Mangue				
Sítio Novo		Pau dos Ferros	São Rafael				
Tangará		Portalegre					

Tabela 6 - Municípios selecionados e mesorregiões.

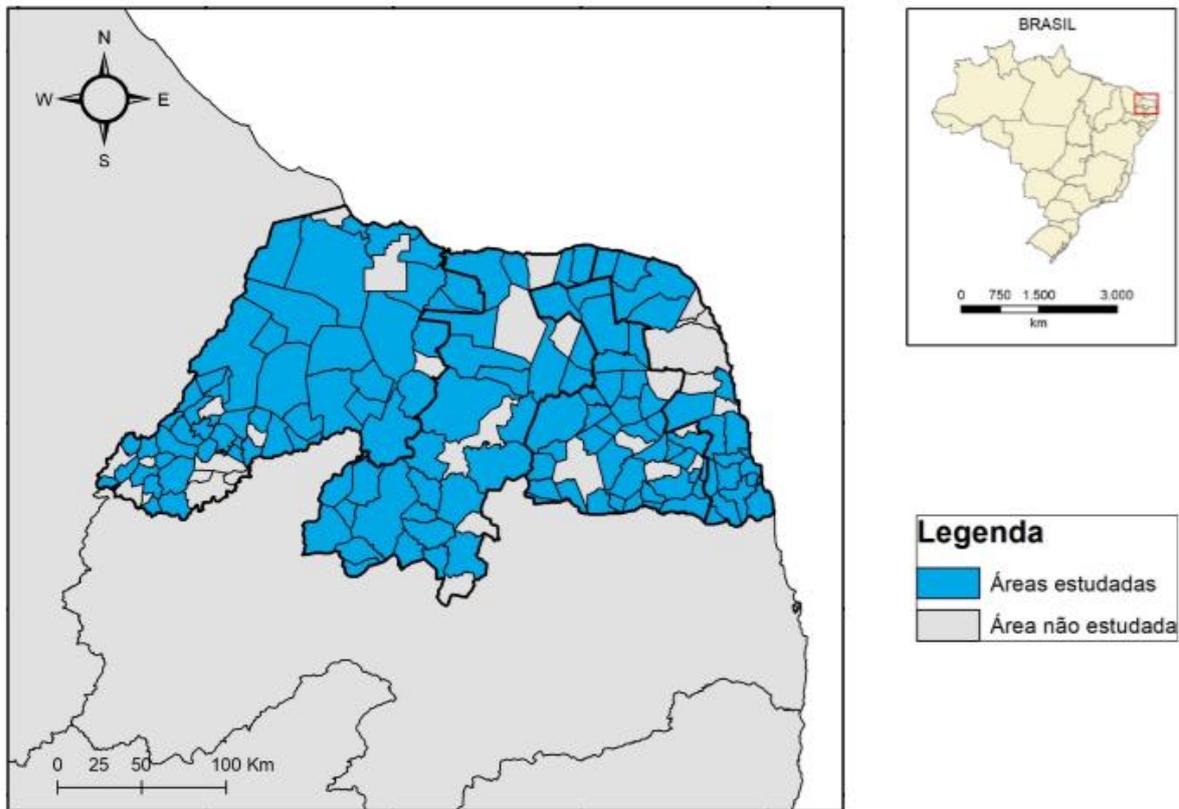


Figura 20 - Mapa das cidades eleitas para composição da amostra.

Ademais, pretende-se mensurar a eficiência agrupada das cidades do Estado e, portanto, identificar a eficiência do abastecimento de água das mesorregiões. Frente ao exposto, o presente estudo irá contribuir para a sociedade com o panorama estadual do abastecimento da água, por cidade e por mesorregião, e com a identificação das fontes de ineficiência.

4.4. DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Após a leitura dos trabalhos que buscam mensurar a eficiência da gestão e uso da água, obtidos por meio da pesquisa bibliográfica, foi possível identificar as variáveis mais recorrentes na literatura. A sistematização das variáveis de *input* e *output* e os respectivos autores que as utilizaram estão esquematizados na Tabela 5.

Com esse panorama, identifica-se 40 tipos de *inputs* e 47 tipos de *outputs* principais. Algumas variáveis como PIB, volume de água entregue, Demanda Química de Oxigênio (DQO), perdas de água e volume de esgoto foram utilizadas tanto como insumos quanto como produtos do processo.

As variáveis mais utilizadas como *inputs* foram mão de obra, custos com manutenção, materiais e serviços, volume de água para uso agrícola, capital empregado e área irrigada. Por

outro lado, as variáveis utilizadas como *output* com maior frequência foram o volume de água entregue, a produção agrícola e o PIB.

INPUTS	AUTORES	OUTPUTS	AUTORES
Mão de obra	[1]; [5]; [7]; [8]; [10]; [12]; [13]; [14]; [15]; [17]; [18]; [21]; [22]; [25]; [26]; [27]; [28]; [30]; [31]; [32]; [34]; [36]; [37]; [38]; [40]; [41]; [42]; [44]; [45]; [46]; [49]; [48]; [51]; [55]	Volume de água entregue	[2]; [3]; [4]; [8]; [12]; [16]; [20]; [21]; [24]; [25]; [31]; [36]; [39]; [42]; [48]
Custos gerais (Manutenção, Materiais, Serviços)	[1]; [5]; [9]; [12]; [15]; [16]; [17]; [21]; [24]; [25]; [27]; [28]; [31]; [33]; [45]; [43]; [49]	Produção agrícola	[7]; [11]; [13]; [14]; [18]; [19]; [30]; [32]; [27]; [34]; [35]; [37]; [44]; [52]; [54]
Volume de água para uso agrícola	[7]; [10]; [11]; [13]; [14]; [18]; [19]; [22]; [30]; [32]; [37]; [44]; [45]; [52]; [54]	PIB	[10]; [26]; [37]; [38]; [41]; [40]; [46]; [47]; [51]; [52]; [56]
Capital	[1]; [9]; [10]; [13]; [20]; [32]; [27]; [38]; [40]; [41]; [46]; [51]; [55]	Volume de esgoto	[33]; [38]; [40]; [46]; [51]; [56]; [55]; [57]
Área irrigada	[7]; [14]; [18]; [19]; [22]; [30]; [32]; [45]; [52]; [54]	Extensão da rede de abastecimento	[2]; [4]; [3]; [5]; [24]; [25]
Energia	[1]; [5]; [15]; [21]; [28]; [45]; [49]; [55]; [56]	População atendida	[8]; [12]; [16]; [24]; [31]
Volume de água para uso residencial	[10]; [37]; [38]; [46]; [48]; [51]; [56]	Receita total	[15]; [34]; [36]; [43]; [45]
OPEX	[4]; [3]; [6]; [34]; [39]; [57]	Nº de conexões	[12]; [20]; [25]; [33]; [42]
Fertilizantes	[11]; [13]; [14]; [22]; [30]; [32]	Esgoto tratado	[8]; [16]; [26]; [57]
Tratamento de águas residuais	[5]; [17]; [21]; [28]; [49]	Qualidade da água	[9]; [12]; [25]; [39]
Investimentos	[26]; [44]; [47]; [54]	Área atendida	[6]; [34]; [47]
Total de ativos	[33]; [37]; [47]; [48]	Sólidos em suspensão (SS)	[17]; [28]; [49]
Extensão da rede de abastecimento	[16]; [39]; [42]	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	[17]; [38]; [49]
Extensão da rede esgoto	[12]; [16]; [57]	Carbono Orgânico Dissolvido (COD)	[27]; [28]; [57]
Despesas operacionais	[2]; [8]; [20]	Nº de propriedades atendidas	[4]; [3]
Sementes	[11]; [13]	Gastos com reparação	[3]; [4];
Precipitação	[13]; [24]	População residente	[6]; [42]
Uso de pesticidas	[14]; [22]	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	[17]; [27]
Perdas de água	[15]; [54]	NH ₄ -N retirado	[38]; [57]
Pegada hídrica	[41]; [40]	Confiabilidade do sistema	[9]; [21]
Volume de água para uso industrial	[37]; [43]	Consumo anual de água	[1]; [9]

Tabela 7 - Sistematização das variáveis recorrentes na literatura.

Fonte: Elaborado a partir de Lambert, D.K.; Dichev, D. (1993) [1]; Cubbin, J.; Tzanidakis, G. (1998) [2]; Thanassoulis, E. (2000, a) [3]; Thanassoulis, E. (2000, b) [4]; Anwandter, L. Ozuna, T. Jr. (2002) [5]; Thanassoulis, E. (2002) [6]; Díaz, J.A.R.; Poyato, E.C.; Luque, R.L. (2004) [7]; Tupper, H.C.; Resende, M. (2004) [8]; Woodbury,

K.; Dollery, B. (2004) [9]; Hu, J.-L., Wang, S.-C., Yeh, F.-Y. (2006) [10]; Malana, N.M., Malano, H.M. (2006) [11]; Sánchez, I.M.G. (2006) [12]; Lilienfeld, A.; Asmild, M. (2007) [13]; Speelman, S. *et al.* (2008) [14]; Alsharif, K. *et al.* (2008) [15]; Tadeo, A.J.P.; Fernández, F.J.S.; Gómez, F.G. (2008) [16]; Sancho, F.H.; Garrido, R.S. (2009) [17]; Frija, A. *et al.* (2009) [18]; Yilmaz, B., Yurdusev, M.A., Harmancioglu, N.B. (2009) [19]; Norton Jr., J.W., Weber Jr., W.J. (2009) [20]; Byrnes *et al.* (2009) [21]; Speelman, S. *et al.* (2009) [22]; Valiñas, M.A.G.; Muñoz, M.A. (2009) [24]; Rubio, M.A.G.; Gómez, F.G., Guardiola, J. (2010) [25]; Ma, J.; Zheng, C.-Y. (2011) [26]; Khalil, S. (2011) [27]; Garrido, R.S.; Senante, M.M.; Sancho, F.H. (2011) [28]; Manjunatha, A. V. *et al.* (2011) [30]; Romano, G.; Guerrini, A. (2011) [31]; Frija, A. *et al.* (2011) [32]; Abbott, M., Cohen, B., Wang, W.C. (2012) [33]; Phadnis, S.S.; Kulshrestha, M. (2012) [34]; Raju, K.S.; Kumar, D.N. (2013) [35]; Sambu, D.K.; Tarhule, A. (2013) [36]; Zhao, C. *et al.* (2013) [37]; Bian, Y., Yan, S., Xu, H. (2014) [38]; Ananda, J. (2014) [39]; Sun, C., *et al.* (2014) [40]; Zhao, L., Sun, C., Zheng, D. (2014) [41]; See, K. F. (2014) [42]; Azad, M.A.S.; Ancev, T.; Sancho, F.H. (2015) [43]; Wang, G. *et al.* (2015) [44]; Gadanakis, Y. *et al.* (2015) [45]; Shi, T. *et al.* (2015) [46]; Zhi, Z.; Ying, H.; Guijun, Z. (2015) [47]; Satoh, E. (2015) [48]; Castellet, L.; Senante, M.M. (2015) [49]; Deng, G., Li, L., Song, Y. (2016) [51]; Ren, C. *et al.* (2016) [52]; Mu, L. *et al.* (2016) [54]; He *et al.* (2016) [55]; Yang, W.-C; Lee, Y.-M.; Hu, J.-L. (2016) [56]; Wu, G. *et al.* (2016) [57].

Além do esquema proposto pela Tabela 5, foram identificadas algumas variáveis usadas uma única vez. Para os *inputs*, elenca-se: Número de estações de tratamento (TADEO; FERNÁNDEZ; GÓMEZ, 2008); Uso conjunto dos recursos hídricos e Índice de conservação ambiental (RAJU; KUMAR, 2013); Taxa de consumo da água (SAMBU; TARHULE, 2013); DQO (ZHAO *et al.*, 2013); PIB per capita (SEE, 2014); e Vazão de esgoto (XIANG; CHEN; LIAN, 2016).

Dentre os *outputs* utilizados uma única vez, salienta-se: Unidades de tratamento primário e secundário (ANWANDTER; OZUMA, 2002); Extensão da rede de esgotos (THANASSOULIS, 2002); Consumo de água per capita (MA; ZHENG, 2011); Perdas de água (ABBOTT; COHEN; WANG, 2012); e Quantidade de nitrogênio, fósforo (CASTELLET; SENANTE, 2015) e dióxido de enxofre (YANG; LEE; HU, 2016).

Em consonância com a literatura e com os objetivos da prestadora de serviço de água e esgoto do Estado do RN, foram selecionadas as seguintes variáveis: (1) *Inputs*: despesas de exploração (DEX); (2) *Outputs*: população atendida e volume faturado; e (3) *Carry-over*: perdas de água (indesejado);. A Tabela 6 apresenta a descrição das variáveis adotadas.

A escolha da variável de despesas de exploração (DEX) foi realizada devido a sua relevância para a companhia, uma vez que um dos seus objetivos principais é operar de forma sadia, financeiramente falando. Portanto, garantir eficiência dessa variável significa perpetuar a atividade da empresa.

Os *outputs* eleitos para este estudo, população atendida e volume faturado, visam retratar o nível de serviço do sistema de abastecimento de água no âmbito estadual. Estas variáveis estão diretamente ligadas ao sucesso da companhia em cumprir a sua missão e alcançar a sua visão: obter reconhecimento pela eficiência na prestação e expansão dos sistemas de abastecimento.

Por último, a variável de perdas de água foi definida como *carry-over* mediante um alinhamento com a gestão da CAERN, pois a alta administração da companhia acredita que as perdas de água influenciam fortemente o resultado negativo. Essa variável representa um impacto negativo considerável na operação da companhia e foi eleita como o principal fonte de captação de possíveis melhorias para o sistema de abastecimento.

Para considerar a atualização dos valores financeiros, foi feita uma conversão monetária com base no Índice Geral de Preços-Disponibilidade Interna (IGP-DI) da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Neste caso, os valores das despesas de exploração foram atualizados para o último ano da análise, ou seja, 2015.

	Variáveis	Unidade	Descrição
Inputs	Despesas de exploração	R\$/Ano	Valor anual das despesas realizadas para a exploração dos serviços, compreendendo Despesas com Pessoal, Produtos Químicos, Energia Elétrica, Serviços de Terceiros, Água Importada, Esgoto Exportado, Despesas Fiscais ou Tributárias computadas na DEX, além de Outras Despesas de Exploração. Código SNIS: FN015.
	População atendida	Unidade	Valor da população total atendida com abastecimento de água pelo prestador de serviços, no último dia do ano de referência. Código SNIS: AG001.
Outputs	Volume faturado	1000 m ³ /Ano	Volume anual de água debitado ao total de economias (medidas e não medidas), para fins de faturamento. Código SNIS: AG011.
Carry-over	Perdas	1000 m ³ /Ano	Volume de água perdido na rede (não consumido), calculado como: volume de água produzido + volume de água tratada importado – volume de água consumido – volume de serviço. Código SNIS: IN049 (apenas numerador).

Tabela 8 - Variáveis adotadas neste estudo.

As variáveis selecionadas aparecem entre as mais utilizadas na literatura e foram fundamentadas no estudo de Carvalho e Sampaio (2015). Assim, o modelo tratado nesta pesquisa visa avançar um dos modelos abordados pelos autores, mais especificamente o modelo DEA II, de forma a acrescentar a ótica de *links* indesejados entre os períodos.

A Tabela 7 apresenta as estatísticas descritivas para os dados das variáveis adotadas nesta pesquisa. As tabela traz informações anuais e de todo o período como um todo, ou seja, de 2010 a 2015. É interessante destacar que em 2015 as despesas de exploração aumentaram 17,10% quanto comparadas ao ano de 2010, o que reflete, em certo ponto, o esforço da companhia em aumentar a qualidade do sistema de abastecimento.

Variável	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Despesas de exploração (R\$/Ano)	2010	2.488.171	10.896.387	37.126	122.556.595
	2011	2.600.577	12.529.074	59.099	142.522.554
	2012	2.581.974	11.852.839	139.134	133.537.134
	2013	2.618.453	11.848.454	95.904	131.696.653
	2014	2.953.650	12.850.895	116.320	142.242.265
	2015	3.001.511	13.330.510	161.824	146.683.135
	2010-2015	2.707.389	12.207.822	37.126	146.683.135
População atendida (Unid.)	2010	14.709	65.550	368	721.191
	2011	15.231	67.413	341	735.836
	2012	17.050	70.970	574	772.694
	2013	17.627	74.514	962	809.455
	2014	17.896	75.205	450	816.724
	2015	17.361	76.068	417	825.384
	2010-2015	16.646	71.523	341	825.384
Volume faturado (1000 m³/Ano)	2010	756	3.646	14	40.814
	2011	806	3.797	12	42.061
	2012	843	3.884	26	43.149
	2013	877	4.088	27	45.160
	2014	902	4.159	9	45.800
	2015	834	3.882	20	42.584
	2010-2015	837	3.901	9	45.800
Perdas de água (1000 m³/Ano)	2010	980	4.203	22	45.827
	2011	1.012	4.202	10	44.679
	2012	976	4.408	2	47.720
	2013	965	4.298	11	45.884
	2014	926	4.609	5	50.382
	2015	826	4.276	8	46.498
	2010-2015	947	4.322	2	50.382

Tabela 9 - Estatística descritiva para os dados das variáveis adotadas.

4.5. INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada, exclusivamente, por meio de consultas ao Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). Este sistema é amplamente utilizado em pesquisas realizadas no âmbito nacional, conforme Carvalho e Sampaio (2015), por exemplo.

O SNIS é o sistema de informação mais relevante do setor de saneamento brasileiro. Além das informações e indicadores sobre a prestação de serviços de água e esgoto, possui informações ligadas ao manejo de resíduos sólidos urbanos e drenagem e manejo de águas

pluviais urbanas. As informações são cedidas anualmente pelas prestadoras de serviço de água, esgotos, resíduos sólidos urbanos e águas pluviais urbanas.

Este sistema está vinculado à Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades. Criado em 1996, tem como objetivo tornar público os dados de abastecimento e saneamento de todos os municípios brasileiros, além de fomentar o conhecimento nessa área. A busca no sistema SNIS foi realizada na base da série histórica e a pesquisa captou os dados desagregados por município.

Algumas informações sobre a sistemática do abastecimento urbano do Estado foram obtidas mediante contato direto com a Companhia de Água e Esgotos do Rio Grande do Norte. O convite para participação na pesquisa foi realizado por meio do envio de um ofício à direção da CAERN. O contato direto com a companhia foi de grande importância para que o ambiente, as características e as restrições em que esta atua fossem conhecidos.

4.6. DESCRIÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a etapa de definição das variáveis e das unidades de decisão que serão estudadas, é necessário que o método de para geração de resultados seja definido. O modelo dinâmico da Análise Envoltória de Dados foi escolhido como ferramenta para mediar o alcance do objetivo central desta pesquisa, uma vez que os sistemas de abastecimentos são investimentos de longo prazo e uma análise intertemporal é mais adequada. Pretende-se, mediante aplicação da técnica, mensurar a eficiência dos sistemas de abastecimento de água dos municípios e nas mesorregiões do Estado do RN no período de forte estiagem, compreendido entre os anos de 2010 e 2015.

Ainda que tenha sido amplamente usado nas mais diversas áreas, o DDEA ainda não possui uma quantidade significativa de aplicações na área de recursos hídricos. O único trabalho que aborda tais temáticas encontrado na busca bibliográfica desta dissertação foi idealizado por Pointon e Matthews (2016). Os autores apresentaram e compararam tanto a eficiência dinâmica quanto a eficiência estática das companhias de água e esgoto da Inglaterra e País de Gales. Ainda que não tenha sido encontrado na busca bibliográfica realizado nas bases, o trabalho de Barbosa, Lima e Brusca (2016) deve ser considerado, embora aborde uma perspectiva distinta da que está sendo tratada neste trabalho.

Para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado, utilizou-se a modelagem proposta por Tone e Tsutsui (2010) como método para avaliação de desempenho anual e global da amostra. As medidas de folgas também são abordadas na modelagem dos autores citados acima, portanto, garantindo maior robustez da ferramenta.

Destaca-se que as variáveis *carry-overs* podem ser classificadas em 4 categorias: (1) Desejável (bom); (2) Indesejável (ruim); (3) Discricionário (livre); e (4) não discricionário (fixo). A tabela 8 apresenta as principais diferença entre os tipos de *links* do modelo de Tone e Tsutsui (2010). Já Pointon e Matthews (2016) enfocam a importância da determinação das variáveis intermediárias e afirmam que o seu uso inadequado é um dos maiores contribuintes na mensuração leviana da eficiência.

Tipo do <i>carry-over</i>	Descrição
Desejável	São variáveis desejáveis para o modelo (<i>good</i>), tratadas como output e cujo valor deve ser superior aos valores observados. Sua escassez é tratada como ineficiência.
Indesejável	São variáveis indesejáveis para o modelo (<i>bad</i>), tratadas como inputs e devem ter o seu valor inferior aos valores observados. Seu excesso é tratado como ineficiência.
Discricionário	Podem ser livremente manuseados, de forma que seus valores podem aumentar ou diminuir quando comparados aos valores observados.
Não discricionário	Estão além do controle das DMUs. Seus valores são fixados de acordo com o valor observado.

Tabela 10 - Classificação das variáveis *carry-overs*.

O método proposto pelos autores citados é indicado para problemas dinâmicos cujos retornos de escala sejam variáveis, como é o caso dos problemas relacionados aos recursos hídricos. Outro ponto relevante na escolha da modelagem foi a possibilidade de se trabalhar com *links* indesejáveis, uma vez que o *carry-over* adotado foi a variável de perdas de água.

Sendo assim, considerado n DMUs ($j = 1, \dots, n$), em períodos T ($t = 1, \dots, T$). Em cada período, as DMUs possuem m inputs ($i = 1, \dots, m$), p inputs não discricionários ($i = 1, \dots, p$), s outputs ($i = 1, \dots, s$) e r outputs não discricionários ($i = 1, \dots, r$).

Além disso, X_{ijt} ($i = 1, \dots, m$), X_{ijt}^{fix} ($i = 1, \dots, p$), Y_{ijt} ($i = 1, \dots, s$) e Y_{ijt}^{fix} ($i = 1, \dots, r$) representam respectivamente os valores dos insumos discricionários, insumos não discricionários, resultados não discricionários e resultados discricionários da DMU j no período t . A eficiência global θ_0^* do modelo dinâmico baseado em folgas para DMU_o ($o = 1, \dots, n$), de Tone e Tsutsui (2010), é dado pela Equação 6:

$$\theta_0^* = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T w^t \left[1 - \frac{1}{m + nbad} \left(\sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_{it}^-}{X_{iot}} + \sum_{i=1}^{nbad} \frac{S_{it}^{bad}}{Z_{iot}^{bad}} \right) \right] \quad (\text{Equação 6})$$

Sob as restrições:

- A continuidade dos *carry-overs* entre os períodos t e $t + 1$ e o símbolo α representam a posição dos *links* desejável (Z^{good}), indesejável (Z^{bad}), livres (Z^{free}) e fixos (Z^{fix}).

$$\sum_{j=1}^n Z_{ijt}^\alpha \lambda_j^t = \sum_{j=1}^n Z_{ijt}^\alpha \lambda_j^{t+1} \quad (\forall i; t = 1, \dots, T-1) \quad (\text{Equação 7})$$

- Expressões de produção

$$X_{iot} = \sum_{j=1}^n X_{ijt} \lambda_j^t + s_{it}^-, \quad (i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T) \quad (\text{Equação 8})$$

$$X_{iot}^{fix} = \sum_{j=1}^n X_{ijt}^{fix} \lambda_j^t, \quad (i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T)$$

$$Y_{iot} = \sum_{j=1}^n Y_{ijt} \lambda_j^t - s_{it}^+, \quad (i = 1, \dots, s; t = 1, \dots, T)$$

$$Y_{iot}^{fix} = \sum_{j=1}^n Y_{ijt}^{fix} \lambda_j^t, \quad (i = 1, \dots, r; t = 1, \dots, T)$$

$$Z_{iot}^{good} = \sum_{j=1}^n Z_{ijt}^{good} \lambda_j^t - s_{it}^{good}, \quad (i = 1, \dots, ngood; t = 1, \dots, T)$$

$$Z_{iot}^{bad} = \sum_{j=1}^n Z_{ijt}^{bad} \lambda_j^t + s_{it}^{bad}, \quad (i = 1, \dots, nbad; t = 1, \dots, T)$$

$$Z_{iot}^{free} = \sum_{j=1}^n Z_{ijt}^{free} \lambda_j^t + s_{it}^{free}, \quad (i = 1, \dots, nfree; t = 1, \dots, T)$$

$$Z_{iot}^{fix} = \sum_{j=1}^n Z_{ijt}^{fix} \lambda_j^t, \quad (i = 1, \dots, nfix; t = 1, \dots, T)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^t = 1, \quad (t = 1, \dots, T)$$

$$\lambda_j^t \geq 0, s_{it}^- \geq 0; s_{it}^+ \geq 0; s_{it}^{good} \geq 0; s_{it}^{bad} \geq 0 \text{ e } s_{it}^{free}: free (\forall i, t)$$

Onde s_{it}^- ; s_{it}^+ ; s_{it}^{good} ; s_{it}^{bad} e s_{it}^{free} são variáveis que indicam, respectivamente, excesso de entrada, insuficiência da produção, insuficiência do link, excesso de link e desvio de link. Os valores de w^t e w_i^- são os pesos do período t e $input$ i . Se todos os pesos forem iguais, logo, $w^t = 1 (\forall t)$ e $w_i^- = 1 (\forall i)$. Neste estudo, foram considerados pesos iguais para todos os anos.

Sabendo-se que a eficiência global do modelo é dada pela Equação 6 e considerando $(\{\lambda_0^{t*}\}, \{s_{0t}^{-*}\}, \{s_{0t}^{+*}\}, \{s_{0t}^{good*}\}, \{s_{0t}^{bad*}\}, \{s_{0t}^{free*}\})$. A eficiência por período pode calculada conforme a Equação 9:

$$\theta_{0t}^* = 1 - \frac{1}{m + nbad} \left(\sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_{i0t}^{-*}}{X_{i0t}} + \sum_{i=1}^{nbad} \frac{S_{i0t}^{bad*}}{Z_{i0t}^{bad}} \right), (t = 1, \dots, T) \quad (\text{Equação 9})$$

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos pelo procedimento metodológico adotado estão descritos neste capítulo. O alcance dos escores de eficiência e demais informações tratadas a seguir foram balizadas pelos objetivos específicos, determinados na seção 1.3 deste trabalho. A estrutura deste capítulo é ilustrada pela Figura 15:

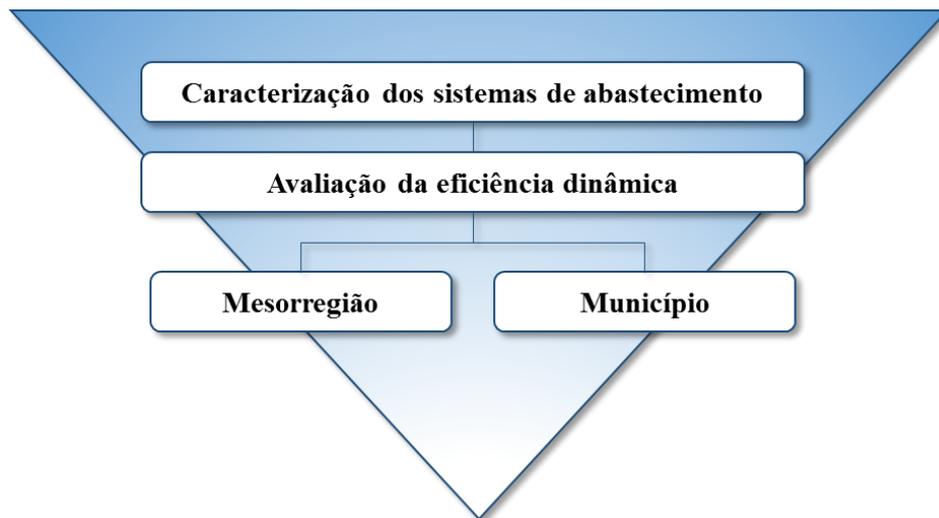


Figura 21 - Estrutura da fase de resultados.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DO RN

Para que os resultados encontrados nesta pesquisa sejam mais facilmente entendidos, é interessante que os componentes de um sistema de abastecimento de água, ainda que de forma genérica, sejam conhecidos. Portanto, a Figura 16 ilustra, de forma geral, como as etapas do abastecimento consideradas no cálculo das eficiências são ordenadas:

Sabendo-se que a gestão das perdas é o ponto focal de todo sistema de abastecimento e que a construção de um balanço de águas é uma ferramenta indispensável, Miranda (2002) enfoca a importância de se conhecer o funcionamento dos sistemas e explica as etapas comuns à maioria deles.

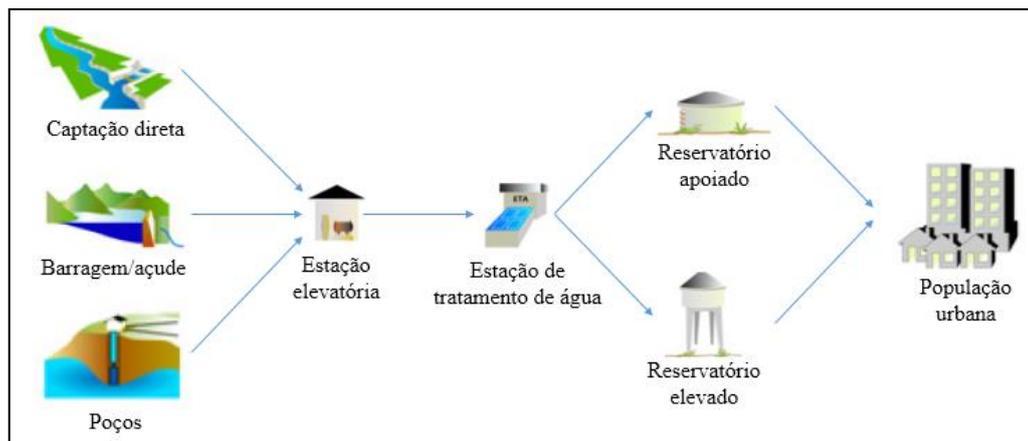


Figura 22 - Sistema de abastecimento genérico.

A primeira etapa, conforme ilustrado na Figura 16, diz respeito à captação de água. A captação representa a retirada do volume de água de um manancial. O foco principal da captação é garantir que a quantidade desejada seja alcançada e que os parâmetros de qualidade sejam aceitáveis. Esta etapa pode ocorrer quando o volume é retirado diretamente do curso natural, de construções como barragens e açudes ou dos lençóis, por meio de poços.

Após a primeira etapa, citada acima, os volumes captados passam pela estação elevatória. O objetivo desta etapa do sistema é de adicionar energia à água transportada devido às reduções de energia associadas às perdas, quando se refere ao transporte de fluidos. Uma estação elevatória possui, geralmente, um sistema composto instalações e conjuntos motor-bomba. A presença de estações elevatórias pode ser notada entre as etapas de adução e distribuição ou mesmo entre a adução e um reservatório.

As estações de tratamento são responsáveis por todo processo de tornar potável a água captada. O tratamento engloba tanto a retirada ou redução de substâncias como de sólidos em suspensão. O processo de tratamento pode ser dividido, de uma forma simplificada, em 4 macroprocessos: (1) Coagulação; (2) Decantação; (3) Filtração e (4) Desinfecção.

A água captada e tratada segue para a etapa de reservação. Os reservatórios são considerados o “pulmão” dos sistemas de abastecimento, uma vez que garantem a continuidade da disponibilidade de água na rede. Como apresentado na Figura 16, há duas formas mais comuns de reservatórios: os apoiados e os elevados. Os reservatórios apoiados se encontram no nível do terreno e possuem grande capacidade de armazenamento, já os reservatórios elevados são construídos acima do nível do terreno e são indicados quando uma pressão mínima se faz necessária para que a distribuição da água aconteça.

Antes de chegar à população urbana, a água armazenada nos reservatórios passa pela rede de distribuição. A rede de distribuição tem a função de manter o *link* entre os reservatórios e os consumidores finais e, portanto, garantir que o consumo seja possível.

5.2. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DINÂMICA.

Nesta etapa da pesquisa, serão apresentados os níveis de eficiência dos sistemas de abastecimento de água do Estado do Rio Grande do Norte, obtidos a partir da aplicação modelo dinâmico de Tone e Tsutsui (2010).

Para a realização da análise proposta foi utilizada uma seleção de 137 municípios norte-rio-grandenses. O número de municípios considerados neste estudo foi balizado pela disponibilidade de dados no Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, considerando o corte temporal de 2010 a 2015, além de considerar as orientações dadas por Cooper; Seiford e Tone (2007), na seção 2.2.1 desta dissertação. A inexistência dos dados necessários, em qualquer um dos períodos adotados, foi o critério de exclusão de cidades deste estudo.

A Figura 17 apresenta o modelo dinâmico utilizado neste trabalho e como as variáveis de decisão se interligam entre os períodos. O *input* único do modelo diz respeito às despesas de exploração, os *outputs* representam o número de clientes atendidos e o volume de água faturado. As divisões temporais são indicadas pelo *carry-over bad* perdas de água. É importante destacar o uso das perdas de água como principal variável para captar possíveis melhorias no sistema de abastecimento de água das cidades.

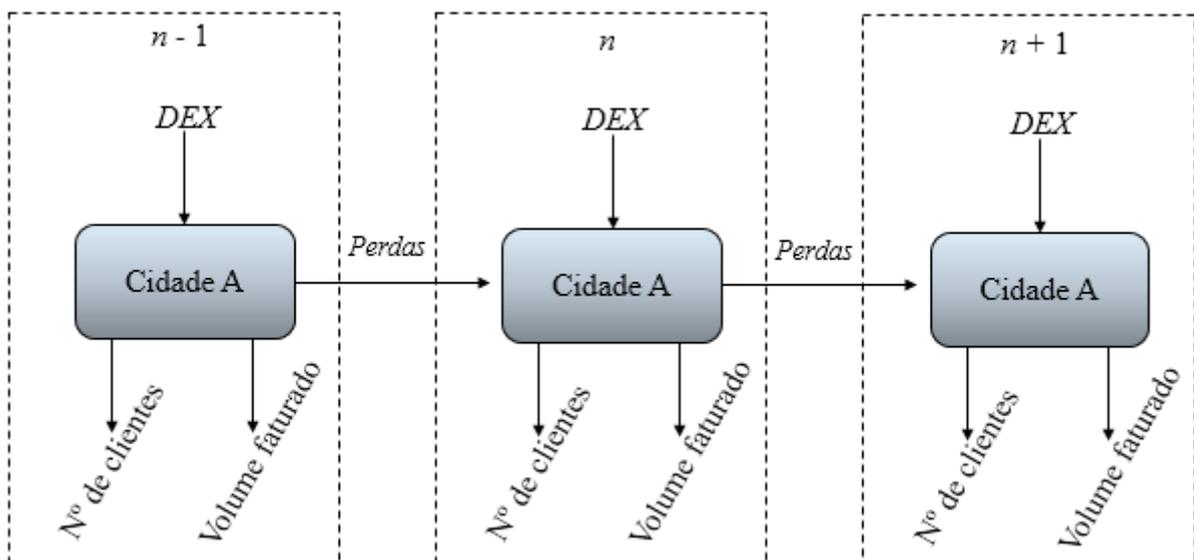


Figura 23 - Ilustração do modelo da pesquisa.

Em atendimento ao objetivo: Realizar uma modelagem dinâmica da Análise Envoltória de Dados, o modelo dinâmico de Tone e Tsutsui (2010) é o mais adequado para esta pesquisa, pois a característica de retornos variáveis de escala é observada em problemas na área de recursos hídricos. Além disso, esta pesquisa adotou a orientação aos *inputs*, uma vez que a literatura a aponta como mais adequada, em se tratando da gestão de recursos hídricos, pois os estudos buscam refletir a realidade e possuem o objetivo de minimizar o consumo de água (LILIENFELD e ASMILD, 2007; Speelman *et al.*, 2009; GADANAKIS *et al.*, 2015). As seções a seguir irão apresentar os resultados obtidos.

5.2.1. Eficiência dos sistemas de abastecimento de água norte-riograndenses.

A avaliação da eficiência, proposta no quinto objetivo desta pesquisa, foi realizada pelo modelo DSBM, de Tone e Tsutsui (2010), com retornos variáveis de escala e orientado aos *inputs*. O enfoque dado foi, precisamente, aos sistemas de abastecimento de água, conforme ilustrado pela Figura 17. Os resultados e as respectivas observações serão pontuados abaixo.

O uso do modelo dinâmico permitiu o cálculo dos escores de eficiência global e anual. O corte temporal engloba os anos de 2010 a 2015. Os escores de eficiência, sejam globais ou anuais, variam, obrigatoriamente, entre 0 e 1. Logo, as DMUs cujos valores de eficiência foram igual a 1, são consideradas eficientes. Por outro lado, a DMU é considerada ineficiente quando o valor do seu escore se aproxima de 0.

As estatísticas descritivas, referentes ao modelo deste estudo, são apresentadas na Tabela 9. Por meio da tabela, pode-se observar que a média global dos escores de eficiência é igual a 57,95%, o que representa um baixo nível de eficiência dos municípios em abastecer a população residente. As maiores médias de eficiência identificadas foram as dos anos 2013 e 2014, cujos valores são, respectivamente, 63,83% e 59,08%. Em todos os anos considerados, foram identificadas unidades eficientes.

Embora a média global das eficiências do ano de 2014 tenha sido superior aos demais anos considerados, exceto 2013, este ano apresentou também uma considerável eficiência mínima, 17,59%. Outro destaque em eficiência mínima foi o ano de 2015, que possui um escore igual a 16,89%.

Variável	Período	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Escores	2010	0,5673	0,2395	0,1881	1

de eficiência	2011	0,5774	0,2411	0,1886	1
	2012	0,5528	0,2272	0,2042	1
	2013	0,6383	0,2303	0,2837	1
	2014	0,5908	0,2428	0,1759	1
	2015	0,5506	0,2451	0,1689	1
	Overall	0,5795	0,2070	0,2315	1

Tabela 11 - Estatística descritiva dos resultados do modelo.

Diante do universo estudado, o método apontou que apenas 6% dos municípios, em se falando da análise global, são eficientes no abastecimento de água. Esse percentual diz respeito a 8 municípios, nomeadamente: Caicó, Natal, Nova Cruz, Parnamirim, São Miguel do Gostoso, Serra Negra do Norte, Touros e Venha-Ver.

Dentre as 10 cidades mais populosas do Estado, 7 fazem parte da seleção deste estudo e apresentaram escores de eficiência superiores aos da grande maioria dos municípios. Logo, é possível inferir que as cidades mais populosas tendem a possuir um sistema de abastecimento mais eficiente. Esta constatação corrobora com os resultados encontrados por Alsharif *et al.* (2008), Sánchez (2006), Kulshrestha e Vishwakarma (2013) e Guerrini *et al.* (2015a) que apontam o tamanho da cidade ou a densidade populacional como influência positiva sobre a eficiência.

Os períodos que apresentaram as maiores quantidades de municípios eficientes foram 2013 e 2014, com um total de 18% das cidades. Para o ano de 2013, além das cidades que foram eficientes no escore global, obtiveram a máxima eficiência: Nísia Floresta, Currais Novos, Areia Branca, São José do Mipibu, Upanema, Ipueira, Serrinha dos Pintos, Viçosa, Coronel João Pessoa, Várzea, Encanto, Poço Branco, São Fernando, Coronel Ezequiel, Caiçara do Rio do Vento e Campo Grande.

Na mesma perspectiva, no ano de 2014 as cidades com eficiência máxima foram: Nísia Floresta, Currais Novos, Areia Branca, Jardim de Angicos, Olho D'Água do Borges, São José do Mipibu, Vila Flor, Upanema, Ipueira, Jundiá, Serrinha dos Pintos, Viçosa, Várzea e Caiçara do Rio do Vento e Campo Grande.

Outra informação interessante foi a observação do quantitativo de DMUs ineficientes. Na seleção adotada, 83 municípios (61%), apresentam escores globais abaixo 60%. Esta informação aponta um nível de produção consideravelmente baixo, o que representa, portanto, uma potencial capacidade de aumento no nível de eficiência, de acordo com a Tabela 10.

Nível do <i>score</i> de eficiência	% (<i>Overall</i>)	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	6%	12%	15%	11%	18%	18%	13%
0,900 – 0,999	4%	4%	1%	4%	5%	1%	2%
0,800 – 0,899	9%	4%	4%	2%	3%	4%	4%
0,700 – 0,799	10%	7%	7%	8%	10%	7%	5%
0,600 – 0,699	10%	12%	14%	7%	9%	12%	9%
0,500 – 0,599	20%	15%	12%	18%	21%	13%	15%
0,400 – 0,499	15%	11%	17%	20%	20%	20%	20%
0,300 – 0,399	20%	23%	20%	20%	12%	18%	18%
Abaixo de 0,299	5%	12%	10%	10%	2%	7%	13%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 12 - Níveis de eficiência das DMUs.

Graficamente, a Figura 18 ilustra os resultados desta pesquisa e a distribuição das cidades, com suas respectivas eficiências globais em todo o território estadual. Os valores das eficiências anuais, por cidade, estão disponíveis no Apêndice A.

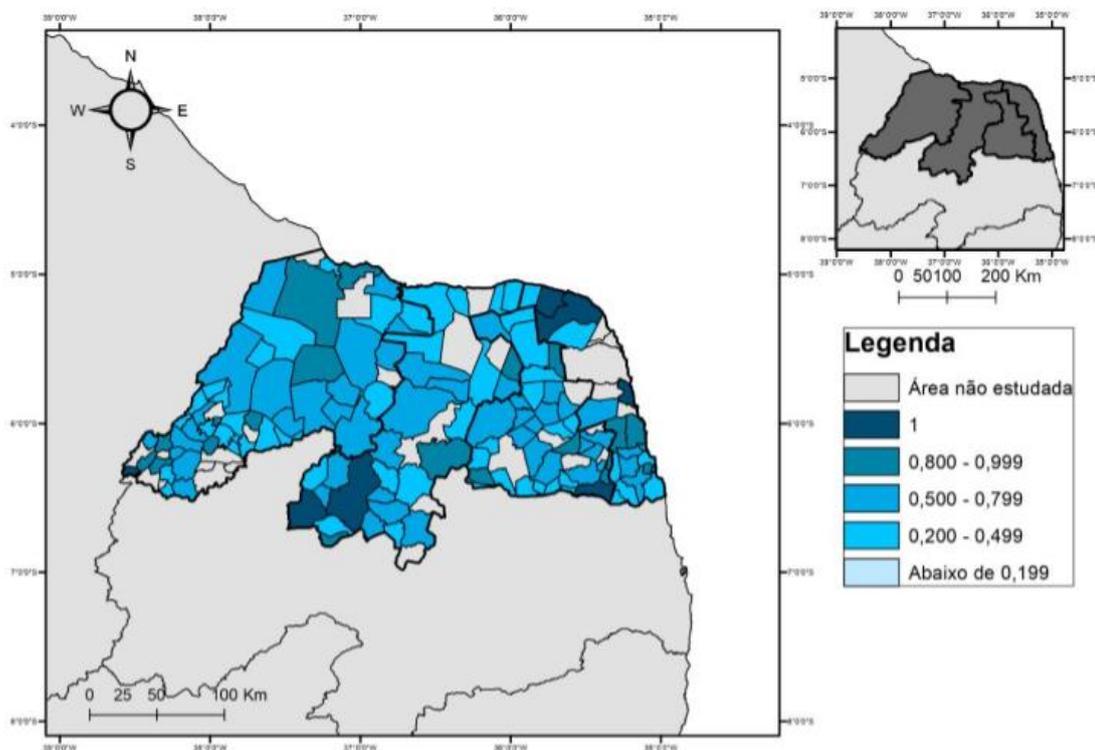


Figura 24 - Eficiência das cidades estudadas.

Alsharif *et al.* (2008) constataram que a idade do sistema de abastecimento possui forte associação com a eficiência de uma DMU. Devido a disponibilidade de dados, não foi possível averiguar tal afirmação, porém, em conformidade com o estudo de Alsharif *et al.* (2008), o

volume de água perdido foi determinante na construção do *ranking* de eficiência dos municípios selecionados.

As cidades de Caicó, Natal, Nova Cruz, Parnamirim, São Miguel do Gostoso, Serra Negra do Norte, Touros e Venha-Ver apresentaram projeção do índice de perdas igual a zero. Esta projeção não diz respeito ao volume real de perdas, uma vez que a análise é realizada por meio da eficiência relativa, ou seja, considera o universo estudado. Outras cidades deixaram de obter eficiência máxima *overall* por aumentos sutis do nível de perdas de água, por exemplo, Currais Novos. Conforme a Tabela 11, é possível identificar potenciais municípios eficientes, caso as perdas sejam, em alguns casos, minimamente controladas. As grandezas expressas nas próximas tabelas desta seção representam percentuais.

Município	Overall	Ranking	Melhorias em perdas					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nísia Floresta	0,9645	9	0	0	0	0	0	0
Currais Novos	0,9592	10	-0,25	0	0	0	0	0
Mossoró	0,9571	11	0	0	0	-9,92	-8,44	0
Areia Branca	0,9066	12	-18,92	-22,2	-6,32	0	0	0
Jardim de Angicos	0,9040	13	0	0	-20,4	0	0	-44,45
Olho D'Água do Borges	0,8973	14	0	0	0	0	-0,01	-73,79
São José de Mipibu	0,8884	15	-44,01	-44,98	0	0	0	0
Vila Flor	0,8870	16	0	0	-51,49	-49,64	0	0
Upanema	0,8519	17	0	-26,89	0	0	0	0
Ipueira	0,8494	18	-26,44	-43,99	0	0	0	-49,19
Jundiá	0,8354	19	-2,65	-69,92	-57,68	-0,06	0	0
Serrinha dos Pintos	0,8352	20	-46,39	-62,97	0	0	0	-20,33
Viçosa	0,8341	21	-18,48	-22,79	0	0	0	-48,17
Coronel João Pessoa	0,8236	22	-10,2	-48,92	-25,36	0	-20,89	-41,04
Várzea	0,8226	23	-13,45	-64,76	0	0	0	0
Riacho de Santana	0,8102	24	-35,77	-61,32	-42,47	-4,79	0	0
Encanto	0,8068	25	0	0	0	0	-88,09	-72,65
Poço Branco	0,8017	26	-63,5	0	0	0	-27,86	-32,81

Tabela 13 - Metas de melhoria em perdas de água para municípios potencialmente eficientes.

Nesta mesma perspectiva, destaca-se a grande quantidade de perdas de água nos municípios que apresentaram os maiores índices de ineficiência. Os municípios de Lucrécia, Tibau e Riachuelo possuem volumes críticos de perdas de água e ocuparam as últimas posições no *ranking*.

Os resultados apontam que no último ano adotado nesta análise seria necessário a redução de mais de 90% do volume de perda nos municípios de Bento Fernandes, Severiano Melo, Felipe Guerra, Pureza, Serra de São Bento, Tibau do sul e Carnaubais, sendo este último o índice de

redução mais alarmante (95,14%). Por meio da Tabela 12, é possível observar as metas de redução de perdas das cidades mais ineficientes.

Município	Overall	Ranking	Melhoria em perdas					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015
Pendências	0,3638	118	-70,45	-74,55	-82,58	-82,54	-92,16	-91,17
Japi	0,3608	119	-77,78	-80,08	-77,87	-69,37	-89,79	-66,46
Lajes Pintadas	0,3577	120	-73,03	-78,62	-82,84	-49,03	-86,94	-60,68
Patu	0,3560	121	-63,27	-83,31	-78,49	-4,89	-94,68	-89,57
Governador Dix-Sept Rosado	0,3511	122	-76,84	-78,47	-78,63	-74,29	-88,38	-85,47
Caiçara do Norte	0,3392	123	-84,81	-88,59	-80,4	-81,45	-85,21	-89,86
Martins	0,3386	124	-70,26	-72,87	-65,04	-51,27	-83,73	-83,71
Bento Fernandes	0,3303	125	-86,85	-88,26	-81,43	-87,52	-85,99	-91,51
Itaú	0,3272	126	-79,12	-82,83	-84,02	-87,11	-91,46	-88,78
Serra de São Bento	0,3217	127	-81,46	-87,12	-86,73	-82,37	-94,61	-93,77
Jaçanã	0,3134	128	-76,68	-82,4	-78,33	-42,31	-80,92	-49,3
Pureza	0,3072	129	-85,07	-89,49	-88,43	-90,96	-89,97	-93,46
Felipe Guerra	0,3048	130	-80,76	-87,01	-82,01	-89,97	-89,2	-92,45
São Rafael	0,2952	131	-78,4	-83,7	-81,76	-79,97	-82,04	-85,25
Severiano Melo	0,2836	132	-86,06	-86,99	-81,56	-85,04	-88,28	-92,21
Carnaubais	0,2747	133	-77,06	-87,7	-86,29	-89,91	-95,5	-95,14
Tibau do Sul	0,2701	134	-82,6	-89,22	-83,22	-77,12	-81,65	-94,14
Lucrécia	0,2680	135	-78,09	-86,31	-84,61	-84,63	-94,01	-90,15
Tibau	0,2478	136	-86,07	-90,87	-92,6	-86,2	-82,34	-85,1
Riachuelo	0,2315	137	-83,58	-81,69	-83,39	-74,88	-93,88	-90,16

Tabela 14 - Metas de melhoria em perdas de água para os municípios menos eficientes.

Assim como no estudo de Kulshrestha e Vishwakarma (2013), os resultados encontrados mostram que a variável de despesas de exploração é determinante na eficiência. Sob a mesma ótica, há a possibilidade de discutir sobre o quantitativo das despesas de exploração ao se analisar as DMUs com potencial para alcançar a fronteira de eficiência, ou seja, aquelas cujos escores encontram-se entre o intervalo de 0,999 e 0,800.

Embora os municípios apresentem potencial para alcançar a eficiência com a redução de insumos, alguns deles necessitam de uma quantidade de esforços notável, de acordo com a Tabela 13. Para alcançar a fronteira, as maiores médias de redução de DEX são das cidades de Upanema, Várzea e Poço Branco, 25,13%, 22,46% e 18,97%, respectivamente. A cidade de Poço Branco possui a maior meta de redução, referente ao ano de 2010 (63,62%). Em 2011, Upanema possui uma considerável meta de redução, cerca de 55,47%, seguida por Várzea, com 53,53% em 2012 e Riacho de Santana com 47,98% em 2014.

Município	Overall	Ranking	Melhoria em DEX					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nísia Floresta	0,9645	9	-39,53	0	0	0	0	-3,12
Currais Novos	0,9592	10	-25,83	-22,9	0	0	0	0
Mossoró	0,9571	11	0	0	0	-3,14	-3,87	-26,11
Areia Branca	0,9066	12	-8,67	-9,35	-46,57	0	0	0
Jardim de Angicos	0,9040	13	-21,89	0	-21,84	-6,53	0	0
Olho D'Água do Borges	0,8973	14	-24,81	0	-3,75	-9,15	0	-11,8
São José de Mipibu	0,8884	15	-26,36	0	-18,65	0	0	0
Vila Flor	0,8870	16	0	0	-3,11	-31,36	0	0
Upanema	0,8519	17	-47,8	-55,47	-47,54	0	0	0
Ipueira	0,8494	18	-14,34	0	-16,73	0	0	-29,99
Jundiá	0,8354	19	-16,31	-4,11	-32,5	-14,34	0	0
Serrinha dos Pintos	0,8352	20	-36,82	-19,01	-12,31	0	0	0
Viçosa	0,8341	21	-52,5	0	-39,51	0	0	-17,58
Coronel João Pessoa	0,8236	22	-4,11	0	-34,59	0	0	-26,62
Várzea	0,8226	23	-46	-35,23	-53,53	0	0	0
Riacho de Santana	0,8102	24	-17,57	0	-16,11	-1,76	-47,98	0
Encanto	0,8068	25	0	0	0	0	-39,57	-31,51
Poço Branco	0,8017	26	-63,62	-42,24	0	0	0	-7,98

Tabela 15 - Metas de melhoria em DEX para municípios potencialmente eficientes.

A Tabela 14 aponta os municípios menos eficientes de todo o ranking e as metas de redução das despesas de exploração. Assim como as perdas, a variável DEX tem grande impacto no desempenho dos sistemas de abastecimento de água dos municípios e, conseqüentemente, da CAERN. As maiores médias de metas para redução das despesas são das cidades de Riachuelo (69,10%), Jaçanã (69,01%), Tibau (63,24%), Martins (61,13%) e Lucrecia (60,10%).

No ano de 2010, as cidades de Riachuelo, Martins e Jaçanã deveriam ter reduzido 78,81%, 77,18% e 76,45%, respectivamente, sendo as maiores reduções de toda a série. Nos anos consecutivos, as maiores metas de redução são: (1) 2011: Tibau do Sul possui (73,05%); (2) 2012: Jaçanã (71,79%); (3) 2013: Riachuelo (68,13%); (4) 2014: Patu (70,13%) e (5) 2015: Governador Dix-Sept Rosado: (76,65%).

Município	Overall	Ranking	Melhoria em DEX					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015
Pendências	0,3638	118	-61,46	-34,12	-47,38	-37,37	-35,83	-53,83
Japi	0,3608	119	-53,87	-56,27	-59,31	-49,84	-41,29	-45,07
Lajes Pintadas	0,3577	120	-59,93	-50,91	-63,43	-53,40	-55,43	-56,52
Patu	0,3560	121	-71,24	-66,81	-23,82	-49,98	-70,13	-76,65
Governador Dix-Sept Rosado	0,3511	122	-68,83	-59,56	-51,79	-55,05	-22,44	-38,92
Caiçara do Norte	0,3392	123	-61,59	-41,96	-43,52	-43,59	-38,69	-53,28
Martins	0,3386	124	-77,18	-70,92	-63,27	-55,14	-41,05	-59,22

Bento Fernandes	0,3303	125	-50,10	-49,23	-42,22	-51,42	-46,28	-42,80
Itaú	0,3272	126	-49,29	-45,76	-42,32	-42,67	-52,96	-61,01
Serra de São Bento	0,3217	127	-51,62	-59,93	-57,01	-36,54	-37,28	-45,51
Jaçanã	0,3134	128	-76,45	-69,76	-71,79	-63,26	-63,12	-69,67
Pureza	0,3072	129	-67,19	-63,78	-40,92	-36,52	-30,87	-54,74
Felipe Guerra	0,3048	130	-43,50	-33,95	-69,75	-45,77	-55,18	-64,66
São Rafael	0,2952	131	-67,72	-66,19	-50,32	-50,71	-51,71	-67,93
Severiano Melo	0,2836	132	-65,33	-56,41	-44,53	-49,98	-53,19	-70,02
Carnaubais	0,2747	133	-65,41	-52,58	-55,16	-51,73	-55,90	-58,01
Tibau do Sul	0,2701	134	-64,21	-73,05	-69,22	-58,11	-44,68	-58,61
Lucrécia	0,2680	135	-55,70	-50,37	-63,99	-54,91	-62,41	-73,21
Tibau	0,2478	136	-71,06	-66,95	-66,56	-57,05	-53,77	-64,03
Riachuelo	0,2315	137	-78,81	-72,28	-68,76	-68,13	-59,84	-66,78

Tabela 16 - Metas de melhoria em DEX para os municípios menos eficientes.

5.2.2. Eficiência no abastecimento das mesorregiões do RN

Nesta etapa da pesquisa, será realizada uma análise agrupada da eficiência dos sistemas de abastecimento de água dos municípios potiguares, conforme sua respectiva disposição geográfica e, assim, pode-se discutir o desempenho a nível de mesorregião. A ideia central é observar se as subdivisões do Estado e os agrupamentos de municípios que apresentam similaridades econômicas e sociais apontam certo padrão no desempenho dos sistemas de abastecimento, conforme feito por Shi *et al.* (2015) e Ren *et al.* (2016).

Os resultados apontam que nenhuma das quatro mesorregiões do Estado são eficientes durante o período estudado. Conforme a Figura 19, observa-se que as eficiências médias das mesorregiões foram baixas em toda a série histórica. Esta informação permite observar que a sustentabilidade do atual sistema de abastecimento está comprometida, sobretudo devido ao grande volume de perdas.

Frente a crise hídrica do Estado que se perpetua até os dias atuais, é inadmissível que o sistema de abastecimento seja tão ineficiente. Ainda que de forma sutil, o ano de 2013 obteve médias de escores maiores que os demais. Em todos os anos estudados, as eficiências médias foram inferiores a 70%.

A mesorregião Central Potiguar apresentou tanto um desempenho global quanto anual superior às demais, seguida pelas mesorregiões Agreste e Leste Potiguar. A mesorregião Oeste Potiguar, mais extensa e subdividida do Estado, apresentou o menor desempenho na eficiência global e anual. Este baixo desempenho pode ser explicado pela extensão territorial da mesorregião oeste, pois, conforme Guerrini *et al.* (2015a), a densidade populacional influencia positivamente os escores de eficiência.

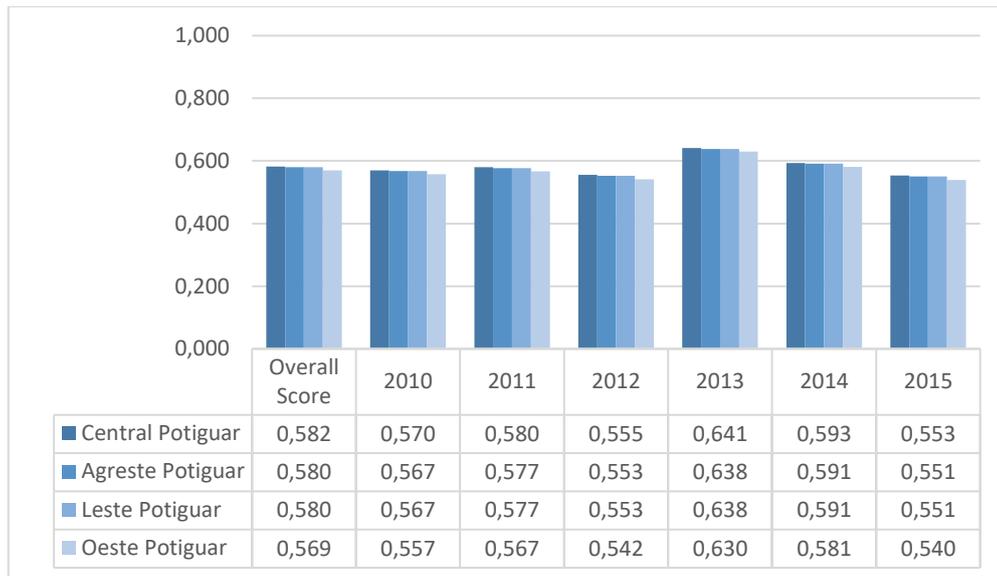


Figura 25 - Média dos escores das mesorregiões no período estudado.

5.2.2.1. Oeste Potiguar

A Mesorregião do Oeste Potiguar abrange a maior parte território e é a segunda mais populosa do Estado do Rio grande do Norte. É constituída por 62 municípios, em sete microrregiões, dentre os quais 49 foram abordados neste estudo.

A Tabela 15 indica os níveis de eficiência e suas respectivas representações na seleção estudada. Apenas 6% das cidades desta região possuem escores globais elevados, sendo a cidade de Venha-Ver a única totalmente eficiente no abastecimento de água. A grande parcela dos municípios (68%) possui eficiência inferior a 69,99%.

Nível do score de eficiência	Overall	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	2%	8%	10%	6%	16%	16%	10%
0,900 - 0,999	4%	2%	0%	4%	6%	2%	2%
0,800 - 0,899	14%	4%	4%	2%	6%	6%	6%
0,700 - 0,799	10%	10%	8%	10%	10%	8%	8%
0,600 - 0,699	10%	14%	14%	10%	8%	6%	8%
0,500 - 0,599	18%	14%	16%	16%	18%	6%	16%
0,400 - 0,499	14%	14%	16%	14%	18%	22%	14%
0,300 - 0,399	16%	18%	18%	27%	12%	20%	12%
Abaixo de 0,299	10%	14%	12%	10%	4%	12%	22%
Total	100%						

Tabela 17 - Níveis de eficiência da mesorregião Oeste.

De acordo com a Figura 20, além de Venha-Ver, os municípios de Mossoró e Areia Branca também obtiveram destaque, mesmo não apresentando índices de eficiência de 100%. Em contrapartida, as cidades de Grossos, Rodolfo Fernandes, Pendências, Patu, Governador *Dix-Sept* Rosado, Martins, Itaú, Felipe Guerra, São Rafael, Severiano Melo, Carnaubais, Lucrecia e Tibau apresentaram eficiências alarmantes (inferior a 40%).

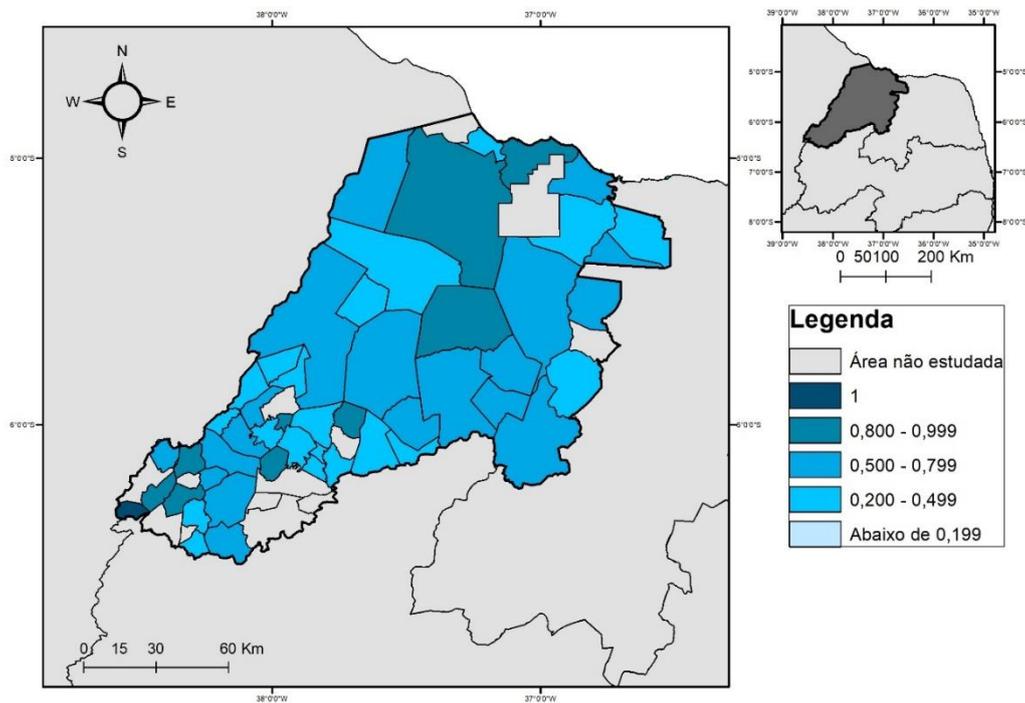


Figura 26 - Eficiência da mesorregião oeste.

5.2.2.2. Central Potiguar

A mesorregião central é a menos populosa do Estado, embora seja a segunda maior, no que se refere à extensão do território. Esta região é composta por 37 cidades, agrupadas em cinco microrregiões, dentre as quais 28 foram abarcadas nesta pesquisa.

Embora a eficiência global média continue baixa, 39% das DMUs apresentam escores superiores a 70%, conforme a Tabela 16. Os anos de 2013 e 2014 apresentaram aumento no número de DMUs eficientes, porém este aumento não perdurou. A partir de 2010, observou-se uma tendência de crescimento do número de DMUs com eficiência superior a 70% até o ano de 2013. Após esse intervalo, uma parcela considerável das DMUs apresentam eficiência inferior a 59,9%.

Nível do <i>score</i> de eficiência	<i>Overall</i>	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	7%	11%	18%	18%	21%	21%	11%
0,900 - 0,999	7%	11%	4%	7%	11%	0%	0%
0,800 - 0,899	4%	7%	7%	4%	0%	4%	4%
0,700 - 0,799	21%	7%	7%	7%	11%	4%	4%
0,600 - 0,699	7%	14%	14%	7%	7%	11%	18%
0,500 - 0,599	14%	0%	4%	4%	18%	25%	4%
0,400 - 0,499	11%	14%	21%	21%	14%	14%	25%
0,300 - 0,399	29%	21%	25%	25%	18%	21%	25%
Abaixo de 0,299	0%	14%	0%	7%	0%	0%	11%
Total de DMUs	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 18 - Níveis de eficiência da mesorregião Central.

Como ilustrado na Figura 21, as cidades de Caicó e Serra Negra do Norte, que representam 7% da parcela estudada na mesorregião central, ambas localizadas na microrregião Seridó Ocidental, foram as únicas integralmente eficientes.

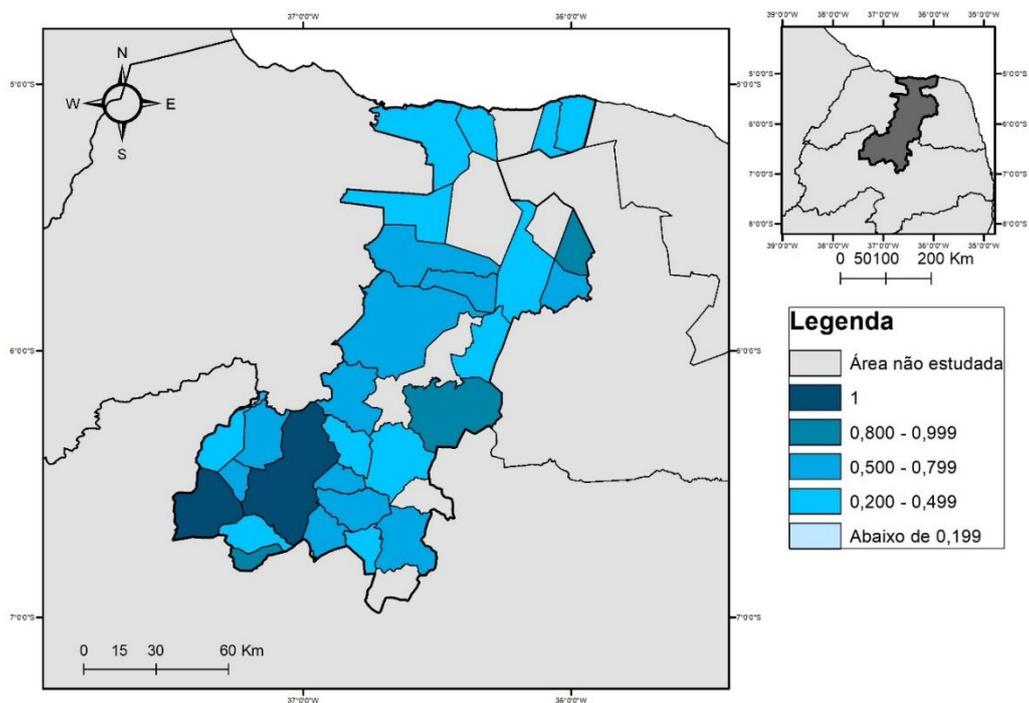


Figura 27 - Eficiência da mesorregião central.

5.2.2.3. Agreste Potiguar

Neste estudo, a mesorregião Agreste foi incluída quase que integralmente. Dos 43 municípios que a compõe, agrupados em 3 microrregiões, 40 foram selecionados. Apenas 3% das DMUs do agreste foram eficientes. A grande maioria dos municípios, 87% deles, obtiveram desempenho mediano, com escores abaixo de 69,9%, de acordo com a Tabela 17. Os Anos de 2012 e 2015 foram os mais críticos para a mesorregião do agreste. Nesses anos, o somatório das DMUs cujos escores são inferiores a 70% chegando a 89% e 86%, respectivamente.

Nível do <i>score</i> de eficiência	<i>Overall</i>	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	3%	10%	10%	5%	10%	8%	8%
0,900 - 0,999	0%	3%	0%	0%	3%	0%	3%
0,800 - 0,899	8%	3%	0%	0%	0%	3%	0%
0,700 - 0,799	5%	5%	8%	8%	13%	5%	5%
0,600 - 0,699	13%	10%	18%	5%	10%	20%	10%
0,500 - 0,599	33%	23%	15%	28%	30%	15%	25%
0,400 - 0,499	18%	5%	20%	30%	28%	25%	28%
0,300 - 0,399	20%	35%	18%	13%	5%	15%	18%
Abaixo de 0,299	3%	8%	13%	13%	3%	10%	5%
Total de DMUs	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 19 - Níveis de eficiência da mesorregião Agreste.

A Figura 22 aponta, graficamente, quais os destaques positivos e negativos do sistema de abastecimento de água do agreste potiguar. Exceto o município de Nova Cruz, que foi totalmente eficiente, nenhuma cidade obteve nível de eficiência satisfatório.

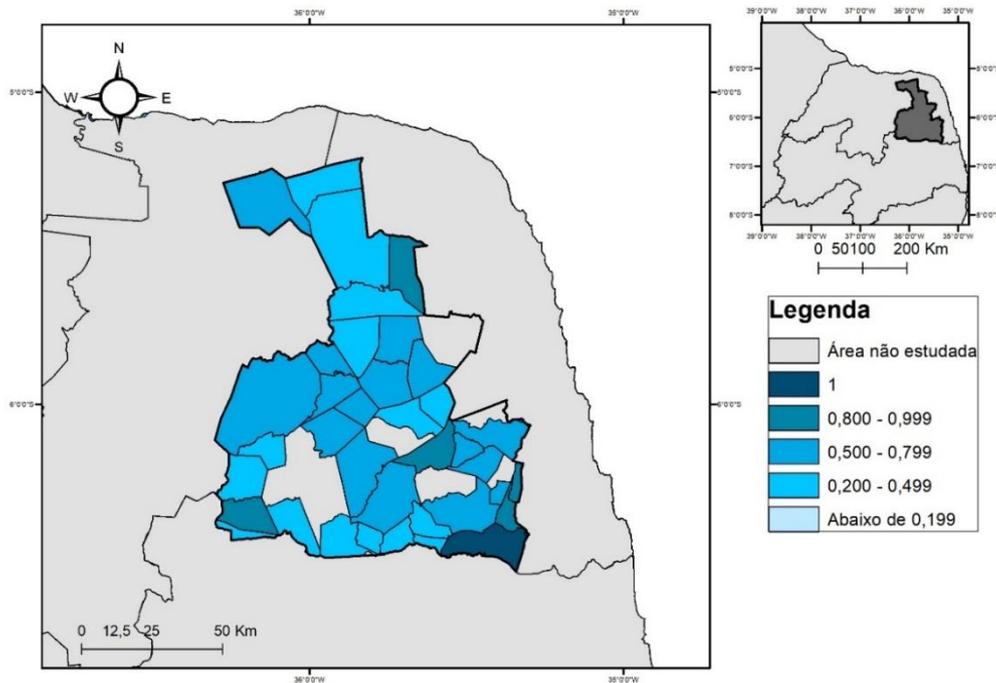


Figura 28 - Eficiência da mesorregião agreste.

5.2.2.4. Leste Potiguar

A mesorregião leste do Estado do Rio Grande do Norte é considerada a mais importante dentre as demais, uma vez que a capital do estado a compõe. Além de Natal, outros 24 municípios foram o Leste Potiguar, dos quais 20 foram englobados nesta pesquisa. Embora o número de municípios e abrangência geográfica sejam menores do que as demais mesorregiões, o Leste Potiguar é a mais populosa.

Outro detalhe interessante foi a constatação de que nesta mesorregião a eficiência do abastecimento de água é superior às demais. Na avaliação global, 20% dos municípios foram eficientes. Na maioria dos casos (40%), as DMUs apresentam escores acima de 70%. É possível identificar a evolução da mesorregião Leste por meio da Tabela 18.

Nível do score de eficiência	Overall	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	20%	25%	30%	25%	30%	35%	35%
0,900 - 0,999	5%	0%	5%	5%	0%	5%	5%
0,800 - 0,899	10%	5%	5%	5%	5%	0%	5%
0,700 - 0,799	5%	5%	5%	5%	5%	10%	0%
0,600 - 0,699	10%	10%	5%	0%	10%	10%	0%
0,500 - 0,599	10%	20%	10%	25%	15%	10%	10%
0,400 - 0,499	20%	10%	5%	10%	15%	15%	15%

0,300 - 0,399	15%	10%	20%	15%	20%	15%	20%
Abaixo de 0,299	5%	15%	15%	10%	0%	0%	10%
Total de DMUs	100%						

Tabela 20 - Níveis de eficiência da mesorregião Leste.

Conforme a Figura 23, pode-se observar que os municípios de Natal, Parnamirim, São Miguel do Gostoso e Touros foram os destaques desta região, seguidos por Nízia Floresta que obteve escore igual a 100% nos anos de 2011 a 2014, mesmo não sendo globalmente eficiente.

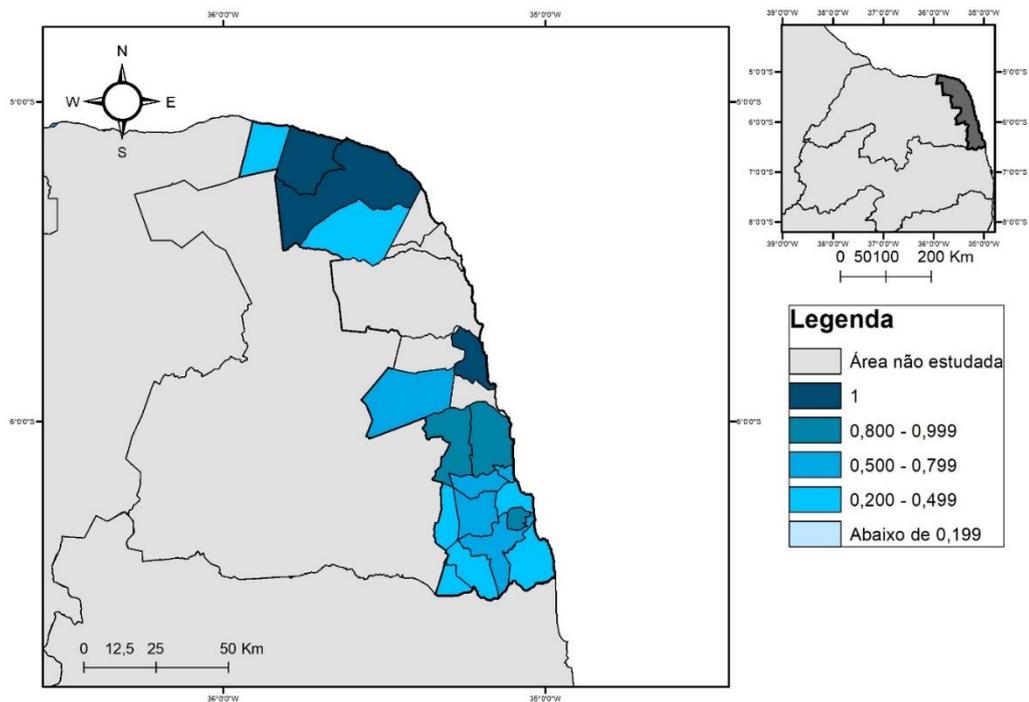


Figura 29 - Eficiência da mesorregião leste.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem como finalidade estruturar as informações obtidas e finalizar o ciclo desta pesquisa. Serão inferidas as conclusões, as propostas para trabalhos futuros e as principais limitações encontradas durante a realização deste trabalho.

6.1. CONCLUSÃO

Embora a água seja o recurso natural mais abundante do planeta, a escassez e os problemas de gestão dos recursos hídricos são uma realidade mundial. Na região nordeste, a falta de água tem impactado fortemente a vida da população, sobretudo nos anos que sucedem 2010.

A gestão eficiente dos recursos e das fontes de ineficiência são fundamentais para garantia do uso da água. Sendo assim, o presente estudo se propôs a identificar a eficiência dos sistemas de abastecimento de água do Estado do Rio Grande do Norte e quantificar as principais fontes de ineficiências, por meio do modelo dinâmico da Análise Envoltória de Dados, no horizonte de 2010 a 2015.

Para a estruturação desta pesquisa e alcance dos resultados, foi necessário a criação de todo um alicerce teórico. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica sistemática para captar a intersecção entre os temas idealizados: estudos na área de recursos hídricos com o auxílio da Análise Envoltória de Dados. Nesta etapa, observou-se uma vasta aplicação do método na área, porém não foi possível identificar grande representatividade dos modelos avançados, sobretudo no âmbito nacional.

Durante a revisão bibliográfica não foi identificada nenhuma aplicação do modelo idealizado por Tone e Tsutsui (2010) em problemáticas ligadas à gestão dos recursos hídricos. Assim, este trabalho contribui para o enriquecimento da literatura, uma vez que abordou de forma pioneira no Brasil o modelo dinâmico de Tone e Tsutsui (2010) no estudo dos sistemas de abastecimento de água urbano.

Em conformidade com o alcance dos objetivos específicos, foi necessário a caracterização, ainda que genérica, dos sistemas de abastecimento de água do RN. Embora não se tenha abordado as especificidades de cada cidade, foi possível elencar, na seção 4.1 deste trabalho, as etapas que compõe os sistemas de abastecimento e ilustrar o fluxo que a água percorre desde a sua captação até a sua chegada às residências e consumidores finais.

As variáveis consideradas neste estudo foram determinadas com o objetivo de retratar a realidade do Estado. Sendo assim, houve um alinhamento com as expectativas da companhia de abastecimento. Todo o processo foi balizado por estudos identificados na revisão da literatura que possuem o mesmo escopo ou objetivo semelhante ao desta pesquisa.

Após o entendimento da sistemática do abastecimento e finalizada a etapa de coleta de dados, foi utilizado o modelo dinâmico baseado em folgas da Análise Envoltória de Dados. Este método permitiu a construção do *ranking* dos 137 municípios considerados neste estudo, dentro de um horizonte temporal de 6 anos (2010-2015). O modelo utilizado possui retornos variáveis de escala, com orientação aos insumos.

Ao término deste estudo, identificou-se que os sistemas de abastecimento de água do Rio Grande do Norte operam, em sua grande maioria, sob condições alarmantes de ineficiência. A média global dos escores de eficiência é igual a 57,95%, o que representa um baixo nível de serviço da companhia em suprir as necessidades da população residente. Na seleção adotada, 83 municípios (61%) apresentam escores globais abaixo 60%.

Os municípios de Caicó, Natal, Nova Cruz, Parnamirim, São Miguel do Gostoso, Serra Negra do Norte, Touros e Venha-Ver foram os únicos que apresentaram índice de eficiência máximo, no que se refere à análise global. Estas cidades representam apenas 6% da seleção e diante desta representatividade baixa é possível vislumbrar uma grande oportunidade de melhoria.

Em consonância com os estudos de Alsharif et al. (2008), Sánchez (2006), Kulshrestha e Vishwakarma (2013) e Guerrini et al. (2015a), que constataram que cidades mais populosas e/ou maiores em extensão territorial tendem a possuir um sistema de abastecimento mais eficiente, percebeu-se que 7 das 10 cidades mais populosas do estado obtiveram desempenhos superiores aos da grande maioria.

A principal fonte de ineficiência do abastecimento de água do Estado, comprovada neste estudo, é a variável de perdas, corroborando com os relatos apresentados pela administração da companhia. Esta informação também está de acordo com a literatura, uma vez que Alsharif (2008) aponta as perdas como principal ofensor do desempenho dos sistemas. A variável de despesas de exploração também foi apontada como ofensora e o seu potencial para influenciar no nível de eficiência não pode ser desconsiderado.

Conforme os estudos de Shi *et al.* (2015) e Ren *et al.* (2016) foi realizada uma análise agrupada dos municípios baseada na sua respectiva disposição geográfica. Os resultados apontam que nenhuma das quatro mesorregiões do Estado são eficientes durante o corte temporal estabelecido.

O desvio nos desempenhos globais de cada uma das mesorregiões foi bastante pequeno. A mesorregião Central Potiguar apresentou tanto um desempenho global quanto anual superior às demais, seguida pelas mesorregiões Agreste e Leste Potiguar. A mesorregião Oeste Potiguar, mais extensa e subdividida do Estado, apresentou o menor desempenho na eficiência global e anual. Este baixo desempenho pode ser explicado pela extensão territorial desta mesorregião, pois, conforme Guerrini et al. (2015b), a densidade populacional influencia positivamente os escores de eficiência.

Portanto, a pesquisa apresentou resultados satisfatórios e o objetivo central de construir um panorama estadual da situação dos sistemas de abastecimento foi alcançado. Destaca-se a validade do modelo DSBM da DEA em aplicações ligadas à gestão da água, pois o grau de riqueza em detalhes possibilita o vislumbre de possíveis melhorias cujas efetivações representam grande potencial de aumentar a eficiência da companhia de abastecimento.

Por fim, conclui-se que o trabalho contribui com análises que permitem fundamentar um modelo gestão focado no gerenciamento efetivo das cidades com índices de perdas de água mais críticos. Além disso, uma política de revisão das despesas públicas também pode ser elaborada com o intuito de alinhar a operação da companhia aos custos ideias.

6.2. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O principal fator que restringiu a execução deste trabalho foi a comunicação falha entre a companhia de abastecimento e o pesquisador. Informações suplementares acerca dos procedimentos e de variáveis não disponíveis no SNIS fizeram com que alguns dos municípios atendidos pela CAERN fossem excluídos do estudo. Além disso, a falta de comunicação também afetou negativamente o aprofundamento das discussões e tornou difícil a especificação dos fatores que potencializam e minimizam a eficiência dos sistemas de abastecimento.

Outro limitador desta pesquisa foi o banco de dados do SNIS, pois a indisponibilidade de dados mais recentes impôs que o estudo se limitasse ao ano de 2015. Outra informação faltosa no sistema são os dados referentes à qualidade dos serviços. Esta informação foi mencionada pela administração da CAERN como relevante para a problemática estudada.

6.3. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, espera-se que esta pesquisa fomente nos pesquisadores o desejo de desenvolver novas trabalhos na ótica de otimização dos recursos hídricos, dado o cenário de crise vivido em todo o mundo, sobretudo na região semiárida do nordeste brasileiro.

Portanto, como *insights* para novos trabalhos, sugere-se que variáveis como qualidade da água entregue ou mesmo a densidade populacional do município sejam incluídas, dada a relevância observada. Em oportunidades futuras, a expansão do universo estudado, com a inclusão dos municípios excluídos por falta de informação, deve ser considerada. Outra vertente possível seria a elaboração de uma análise em vários estágios, com o objetivo de representar as etapas do abastecimento ilustradas na Figura 16.

Outra oportunidade de aprofundar as análises e validar o modelo DSBM em problemas ligados aos recursos hídricos é expandir esta pesquisa às outras regiões do país. Nesta perspectiva, seria possível constatar de forma holística a influência da disposição geográfica sobre os escores de eficiência.

Além disso, o uso de modelos mais avançados, como o dinâmico com estrutura em redes de Tone e Tsutsui (2014), é de grande importância, dado o maior grau de profundidade em análises e a capacidade de detalhamento dos processos do sistema estudado.

REFERÊNCIAS

- ABBOT M.; COHEN, B. Productivity and efficiency in the water industry. **Utilities Policy**, v. 17, p. 233-244, 2009.
- ABBOTT, M., COHEN, B., WANG, W.C. The performance of the urban water and wastewater sectors in Australia. **Utilities Policy**, v. 20, p. 52-63, 2012.
- AL-JAMAL, K. Climate change and water desalination in MENA - World Bank involvement. **Desalination and Water Treatment**, v. 3, p. 271-275, 2009.
- AL-ASSA'D, T; SAUER, J. The performance of water utilities in Jordan. **Water Science and Technology**, v. 62, p. 803-808, 2010.
- ALMEIDA, M. R. **A eficiência dos investimentos do programa de inovação tecnológica em pequena empresa (PIPE): Uma integração da Análise Envoltória de Dados e Índice Malmquist**. (Tese de doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.
- ALSHARIF, K. et al. Governance of water supply systems in the Palestinian Territories: A data envelopment analysis approach to the management of water resources. **Journal of Environmental Management**, v. 87, p. 80-94, 2008.
- ANANDA, J. Evaluating the performance of urban water utilities: Robust nonparametric approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 9, p. 431-439, 2014.
- ANANDA, J.; HAMPF, B. Measuring environmentally sensitive productivity growth: An application to the urban water sector. **Ecological Economics**, v. 116, p. 211–219, 2015.
- ANWANDTER, L.; OZUMA, T. Jr. Can public sector reforms improve the efficiency of public water utilities? **Environment and Development Economics**, p.687-700, 2002.
- AWERBUCH, L. Perspective and challenges for desalination. **Desalination**, v. 99, p. 191-194, 1994.
- AZAD, M.A.S.; Ancev, T.; Sancho, F.H. Efficient Water Use for Sustainable Irrigation Industry. **Water Resources Management**, v. 29, p. 1683-1696, 2015.
- BARBOSA, A.; LIMA, S.C.; BRUSCA, I. Governance and efficiency in the Brazilian water utilities: A dynamic analysis in the process of universal access. **Utilities Policy**, n. 43, p. 82-96, 2016.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984.
- BECERRA, S. et al. Everyday vulnerabilities and “social dispositions” in the Malian Sahel, an indication for evaluating future adaptability to water crises? **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 5, p. 1253-1265, 2016.

BHATTA, R. et al. Treatment of Wastewater by Ozone Produced in Dielectric Barrier Discharge. **Journal of Chemistry**, 2015.

BIAN, Y., YAN, S., XU, H. Efficiency evaluation for regional urban water use and wastewater decontamination systems in China: A DEA approach. **Agricultural Sciences in China**, v. 83, p. 15-23, 2014.

BRAGA, B.; KELMAN, J. Facing the challenge of extreme climate: The case of Metropolitan São Paulo. **Water Policy**, v. 18, p. 52-69, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 26.365, de 23 de Setembro de 2016. Declara Situação de Emergência nas áreas dos Municípios do Estado do Rio Grande do Norte, afetados por desastre natural climatológico por estiagem prolongada que provoca a redução sustentada das reservas hídricas existentes – COBRADE/1.4.1.2.0 – Seca, e dá outras providências.** Natal, RN, 2016.

BRASIL. Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. **Institui A Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Regulamenta O Inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal, e Altera O Art. 1º da Lei Nº 8.001, de 13 de Março de 1990, Que Modificou A Lei Nº 7.990, de 28 de Dezembro de 1989.** Brasília, DF, 1997.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Informativo sobre a Estiagem no Nordeste - nº 104.** Brasília, DF, 2017.

BRETTENNY, W.; SHARP, G. Efficiency evaluation of urban and rural municipal water service authorities in South Africa: A Data Envelopment Analysis approach. **Water SA**, v. 42, n. 1, 2016.

BYRNES, J. et al. The relative economic efficiency of urban water utilities in regional New South Wales and Victoria. **Resource and Energy Economics**, v. 32, p. 439-455, 2009.

CARVAJAL-ESCOBAR, Y. Environmental flow regime in the framework of integrated water resources management strategy. **Ecohydrology and Hydrobiology**, v. 8, p. 307-315, 2008.

CARVALHO, A.E.C.; SAMPAIO, L.M.B. Paths to universalize water and sewage services in Brazil: The role of regulatory authorities in promoting efficient service. **Utilities Policy**, v. 34, p. 1-10, 2015.

CASA NOVA, S.P.C. (2002). **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis.** Tese (Doutorado em Ciências Contábeis) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTELLET, L.; SENANTE, M.M. Efficiency assessment of wastewater treatment plants: A data envelopment analysis approach integrating technical, economic, and environmental issues. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 160-166, 2015.

CHANG, Y.-T. et al. Passenger facility charge vs. airport improvement program funds: A dynamic network DEA analysis for U.S. airport financing. **Transportation Research Part E**, v. 88, p. 76-93, 2016.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. **European Journal of Operational Research**, v. 1, p. 429-444, 1978.

- CHEBIL, A.; FRIJA, I.; BAHRI, W. Irrigation water efficiency in wheat production in Chbika (Tunisia): Parametric versus -onparametric Comparisons. **Agricultural Economics Review**, 2014.
- CHEN, S.; DAVIS, K. Climate-adaptive community water management for food security: Experiences from the UNDP community water initiative. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, v. 2, n. 1, p. 24-37, 2014.
- COELLI, T. et al. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2005.
- CONG et al. Hydrological trend analysis in the Yellow River basin using a distributed hydrological model. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, 2009.
- COOK, W. D.; ZHU, J. **Data Envelopment Analysis: A Handbook on the Modeling of Internal Structures and Networks**. Springer Science Business Media, New York, 2014.
- COOK, W.D.; SEIFORD, L.M. Data envelopment analysis (DEA): thirty years on. **European Journal of Operational Research**, v. 192, p. 1–17, 2009.
- COOPER, W.; SIEFORD, L.; TONE, K. **Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, Reference and DEA–Solver software**. Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2007.
- CRUZ *et al.* Measuring the efficiency of water utilities: a cross-national comparison between Portugal and Italy. **Water Policy**, n. 14, p. 841–853, 2012.
- CUBBIN, J.; TZANIDAKIS, G. Regression versus data envelopment analysis for efficiency measurement: an application to the England and Wales regulated water industry. **Utilities Policy**, v. 7, p. 75-85, 1998.
- DARMON, A. The makings of a water crisis. **Unesco sources**, n. 84, p. 12-13, 1996.
- DELLAPENNA, J.W. Population and water in the Middle East: The challenge and opportunity for law. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 7, n. 1, p. 72-110, 1997.
- DENG, G., LI, L., SONG, Y. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: Based on SBM-DEA model. **Ecological Indicators**, v. 69, p. 12-18, 2016.
- DÍAZ, J.A.R.; POYATO, E.C.; LUQUE, R.L. Application of data envelopment analysis to studies of irrigation efficiency in Andalusia. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 130, p. 175-183, 2004.
- DUDA, A.M.; EL-ASHRY, T. Addressing the global water and environment crises through integrated approaches to the management of land water and ecological resources. **Water International**, v. 25, n. 1, p. 115-126, 2000.
- DUNGLAS, J. Is technology capable of solving everything? **Houille Blanche**, n. 2, p. 12-13, 2000.
- DYSON, R. G. et al. Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 245–259, 2001.

EHSAN, G. Investigation of water supply systems in semi-arid regions of Iran: A case study of western part of Tehran Province. **Agris On-line Papers in Economics and Informatics**, v. 2, n. 3, p. 1435-1448, 2012.

FALKENMARK, M.; WIDSTRAND, C. Population and water resources: a delicate balance. **Population Bulletin**, v. 47, n. 3, p. 1-36, 1992.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. **Intertemporal Production Frontiers**. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S. **Intertemporal Production Frontiers**. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.

FARREL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 120, n. 3, p. 253–290, 1957.

FARRELL, M.J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 120, n. 3, Series A, p. 235–290, 1957.

FARUQUI, N.A. Responding to the water crisis in Pakistan. **International Journal of Water Resources Development**, v. 20, n. 2, p. 177-192, 2004.

FREDERIKSEN, H.D.; ASCE, F. Water crisis in developing world: misconceptions about solutions. **Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE**, v. 122, n. 2, p. 79-87, 1996.

FRIJA, A. et al. Irrigation pricing policies and its impact on agricultural inputs demand in Tunisia: A DEA-based methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2109-2118, 2011.

FRIJA, A. et al. Water use and technical efficiencies in horticultural greenhouses in Tunisia. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1509-1516, 2009a.

FRIJA, A. *et al.* Assessing the efficiency of irrigation water users Associations and its determinants: evidence from Tunisia. **Irrigation and Drainage**, v. 58, p. 538-550, 2009b.

GADANAKIS et al. Improving productivity and water use efficiency: A case study of farms in England. **Agricultural Water Management**, v. 160, p. 22-32, 2015.

GARMABDARI, R. et al. Labview based flow rate monitoring and measurement algorithm for rotary encoder. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 9, p. 66-75, 2014.

GARRIDO, R.S.; SENANTE, M.M.; SANCHO, F.H. How does seasonality affect water reuse possibilities? An efficiency and cost analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 125-131, 2011.

GOLANY, B. ROLL, Y. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

GONZÁLEZ-GÓMEZ *et al.* Outsourcing and Efficiency in the Management of Rural Water Services. **Water Resour Manage**, v. 27, p. 731–747, 2013.

- GREEN, P.A. et al. Freshwater ecosystem services supporting humans: Pivoting from water crisis to water solutions. **Global Environmental Change**, v. 34, p. 108-118, 2015.
- GRIMES, H.J. Responding to the 'water crisis': The complementary roles of water governance and the human right to water. **Journal of Water Law**, v. 20, p 119-128, 2009.
- GUERRINI, A. ROMANO, B. CAMPEDELLI, G. Factors affecting the performance of water utility companies. **Water utility companies**, v. 24, n. 6, p. 543-566 2011.
- GUERRINI, A. ROMANO, B. CAMPEDELLI, G. Economies of Scale, Scope, and Density in the Italian Water Sector: A Two-Stage Data Envelopment Analysis Approach. **Water Resour Manage**, 2013.
- GUERRINI, A. *et al.* The Effects of Operational and Environmental Variables on Efficiency of Danish Water and Wastewater Utilities. **Water**, v. 7, p. 3263-3282, 2015a.
- GUERRINI, A. et al. Measuring the efficiency of wastewater services through Data Envelopment Analysis. **Water Science & Technology**, v.17, 2015b.
- GUERRINI, A. *et al.* Cost Savings in Wastewater Treatment Processes: the Role of Environmental and Operational Drivers. **Water Resour Manage**, 2017.
- HAIDERA, M. Water scarcity and climate change adaptation for yemen's vulnerable communities. **Local Environment**, v. 16, n. 5, p. 473-488, 2011.
- HE, J. et al. An integrated data envelopment analysis and emergy-basedecological footprint methodology in evaluating sustainable development, a case study of Jiangsu Province, China. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 23-34, 2016.
- HU, J.; et al. Efficiency of Science and Technology Industrial Parks in China. **Journal of Management Research**, v. 10, n. 3, p. 151–166, 2010.
- HU, J.-L.; WANG, S.-C., YEH, F.-Y. Total-factor water efficiency of regions in China. **Resources Policy**, v. 31, p. 217-230, 2006.
- IMAMOĞLU, G.; KÖSE, Y.; DEMIRCI, E. Efficiency of water utilization in health institutions based on provinces. **Turk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi**, v. 74, p. 63-72, 2017.
- JI, Y.; CHEN, L.; SUN, R. Temporal and Spatial Variability of Water Supply Stress in the Haihe River Basin, Northern China. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 5, p. 999-1007, 2012.
- JÚNIOR, W.S. et al. Water: Drought, crisis and governance in Australia and Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 11, 2016.
- KAMARUDIN, N.; ISMAIL, W.R. Establishment of performance indicators for malaysian water utilities with the presence of undesirable output. **Jurnal Teknologi**, v. 78, p. 99-105, 2016.
- KAMARUDIN, N.; ISMAIL, W.R.; RAMLI, N.A. Malaysian water utilities performance with the presence of undesirable output: A directional distance function approach. **Jurnal Teknologi**, v. 78, p. 17–22, 2016.

KANG, X.; LOU, S.; XU, M. Research on the mechanism of water resource loss in east karst mountain area of Sichuan. **Desalination and Water Treatment**, v. 53, n. 2, p. 557-566, 2015.

KAO, C. Dynamic data envelopment analysis: A relational analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 227, n. 2, p. 325–330, 2013.

KAO, C. Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: A relational model. **European Journal of Operational Research**, v. 192, n. 3, p. 949–962, 2009.

KHALIL, S. Relative efficiency of decision making units producing both desirable and undesirable outputs: A case of textile processing units in Pakistan. **Pakistan Development Review**, v. 50, n. 4, p. 685-699, 2011.

KHALILI-DAMGHANI, K. et al. A dynamic multi-stage data envelopment analysis model with application to energy consumption in the cotton industry. **Energy Economics**, v. 51, p. 320-328, 2015.

KULSHRESTHA, M.; VISHWAKARMA, A. Efficiency evaluation of urban water supply services in an Indian state. **Water Policy**, v. 15, p. 134-152, 2013.

KWEH, Q.L. et al. Board independence, family control, and performance in Taiwanese listed semiconductor companies. **Hitotsubashi Journal of Economics**, v. 56, n. 1, p.93-115, 2015.

LAKI, S.L. Management of water resources of the Nile Basin. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 5, n. 4, p. 288-296, 1998.

LAMBERT, D.K.; DICHEV, D. Ownership and Sources of Inefficiency in the Provision of Water Services. **Water Resources Research**, v. 29, n. 6, p.1573-1578, 1993.

LANNIER, A.L.; PORCHERA, S. Efficiency in the public and private French water utilities: prospects for benchmarking. **Applied Economics**, v. 46, n. 5, p. 556-572, 2014.

LILIENFELD, A.; ASMILD, M. Estimation of excess water use in irrigated agriculture: A Data Envelopment Analysis approach. **Agricultural Water Management**, v. 94, p. 73-83, 2007.

LIU, J.S. et al. A survey of DEA applications. **Omega (United Kingdom)**, v. 41, n. 5, p. 893–902, 2013.

LO STORTO, C. A non parametric approach for measuring the operational efficiency of water service providers. **Applied Mechanics and Materials Vols**, v. 409-410, p. 108-113, 2013a.

LO STORTO, C. Are Public-Private Partnerships a Source of Greater Efficiency in Water Supply? Results of a Non-Parametric Performance Analysis Relating to the Italian Industry. **Water**, v. 5, p. 2058-2079, 2013b.

LO STORTO, C. Benchmarking operational efficiency in the integrated water service provision Does contract type matter? **Benchmarking operational efficiency**, v. 21, n. 6, 2014.

LOVELL, C. A. K. **Productions frontiers and productive efficiency. In The measurement of productive efficiency.** Techniques and applications. New York, Oxford: Oxford University Press, 1993.

LU et al. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). **Journal of Hydrology**, v. 481, p. 96-105, 2013.

MA, J.; ZHENG, C.-Y. Application of SEDEA to evaluation of degree of harmony between water resources and economic development. **Water Science and Engineering**, v. 4, p. 110-120, 2011.

MADANI, K. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? **Journal of Environmental Studies and Sciences**, v. 4, n. 4, p. 315-328, 2014.

MALANA, N.M.; MALANO, H.M. Benchmarking productive efficiency of selected wheat areas in Pakistan and India using data envelopment analysis. **Irrigation and Drainage**, v. 55, p. 383-394, 2006.

MANJUNATHA, A. V. *et al.* Impact of groundwater markets in India on water use efficiency: A data envelopment analysis approach. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2924-2929, 2011.

MANJUNATHA, A.V. *et al.* Impact of informal groundwater markets on efficiency of irrigated farms in India: a bootstrap data envelopment analysis approach. **Irrigation Science**, v. 34, p. 41-52, 2016.

MARIANO, E. B. **Crescimento econômico e desenvolvimento humano: uma análise mundial da eficiência social de Estado-Nação**. 2012. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

MARIANO, E.B. **Sistematização e Comparação de Técnicas, Modelos e Perspectivas não-paramétricas de análise de Eficiência Produtiva**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2008.

MARIZ, F.D.A.R.; ALMEIDA, M.R.; ALOISE, D. A review of Dynamic Data Envelopment Analysis: state of the art and applications. **International Transactions in Operational Research**, n. 0, p. 1-37, 2017.

MARQUES, A. C. **Revisão de tarifa do Sistema Elétrico Brasileiro com a aplicação do modelo de redes da Análise Envoltória de Dados – NDEA**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Natal, RN, 2016.

MBUVI, D.; DE WITTE, K.; PERELMAN, S. Urban water sector performance in Africa: A step-wise bias-corrected efficiency and effectiveness analysis. **Utilities Policy**, v. 22, p. 31-40, 2012.

MEZA, L.A. et al. Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica. **Investigação Operacional**, v. 27, p. 21-36, 2007.

MIRANDA, E. C. **Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água – Indicadores de Perdas e Metodologias para Análise de Confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2002.

MOHSEN, M.S.; JABER, J.O.; AFONSO, M.D. Desalination of brackish water by nanofiltration and reverse osmosis. **Desalination**, v. 157, p. 167, 2003.

MORALES, M.; HEANEY, J. Benchmarking Nonresidential Water Use Efficiency Using Parcel-Level Data. **J. Journal of Water Resources Planning and Management**, 2015.

MU, L. et al. Exploring Northwest China's agricultural water-saving strategy: Analysis of water use efficiency based on an SE-DEA model conducted in Xi'an, Shaanxi Province. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 5, p. 1106-1115, 2016.

NATARAJA, N. R.; JOHNSON, A. L. Guidelines for using variable selection techniques in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 215, n. 3, p. 662–669, 2011.

NJIRAINI, G.W; GUTHIGA, P.M. Are Small-Scale Irrigators Water Use Efficient? Evidence from Lake Naivasha Basin, Kenya. **Environmental Management**, v. 52, p. 1192–1201, 2013.

NORTON JR., J.W., Weber Jr., W.J. Water utility efficiency assessment using a data envelopment analysis procedure. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 15, p. 80-87, 2009.

NYATHIKALA S.A.; KULSHRESTHA, M. Performance and productivity measurement of urban water supply services in India. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 17, 2016.

PHADNIS, S.S.; KULSHRESTHA, M. Evaluation of irrigation efficiencies for water users' associations in a major irrigation project in India by DEA. **Benchmarking: An International Journal**, v. 19, n. 2, p. 193-218, 2012.

PICAZO-TADEO, A.J; GONZÁLEZ-GÓMEZ, F.; SÁEZ-FERNÁNDEZ, F.J. Accounting for operating environments in measuring water utilities managerial efficiency. **The Service Industries Journal**, v. 29, n.6, 2009.

PINTO, F.S.; SIMÕES, P.; MARQUES, R.C. Water services performance: do operational environment and quality factors count? **Urban Water Journal**, 2016.

POINTON, C.; MATTHEWS, K. Dynamic Efficiency in the English and Welsh Water and Sewerage Industry. **Omega**, v. 58, p. 86-96, 2016.

QIN, D. et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle. **Chinese Science Bulletin**, v. 59, n. 8, p. 810-820, 2014.

RAGAB, R.; PRUDHOMME, C. Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: Prospective and challenges for the 21st century. **Biosystems Engineering**, v. 81, n. 1, p. 3-34, 2002.

RAJU, K.S.; KUMAR, D.N. Fuzzy data envelopment analysis for performance evaluation of an irrigation system. **Irrigation and Drainage**, v. 62, p. 170-180, 2013.

REIS, J.C. et al. Avaliação de eficiência das ferrovias brasileiras: Uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e Representação Gráfica Bidimensional. **Revista Espacios**, v. 38, n. 4, p. 15, 2017.

REN *et al.* Spatial and temporal analyses of water resources use efficiency based on data envelope analysis and malmquist index: Case study in Gansu Province, China. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 12, 2016.

- REN, C.; LI, R.; GUO, P. Two-Stage DEA Analysis of Water Resource Use Efficiency. **Sustainability**, v. 9, 2017.
- RENZETTI, S.; DUPONT, D. Ownership and Performance of Water Utilities. **Greener management international**, 2003.
- RODRIGUES, M. V. S. *et al.* Multicriteria Method in Data Envelopment Analysis: an application to measure the performance of the instrument of charging for water in the State of Ceará basins. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, 2017.
- ROMANO, G.; GUERRINI, A. Measuring and comparing the efficiency of water utility companies: A data envelopment analysis approach. **Utilities Policy**, v. 19, p. 202-209, 2011.
- RUBIO, M.A.G.; GÓMEZ, F.G., GUARDIOLA, J. Performance and ownership in the governance of urban water. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer**, v. 163, p. 51-58, 2010.
- SAMBU, D.K.; TARHULE, A. Progress of water service providers in meeting millennium development goals in Kenya. **African Geographical Review**, v. 32, n. 2, p. 105-124, 2013.
- SANCHÉZ, I.M.G. Efficiency Measurement in Spanish Local Government: The Case of Municipal Water Services. **Review of Policy Research**, v. 23, n. 2, p. 355-371, 2006.
- SANCHO, F.H.; GARRIDO, R.S. Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach. **Desalination**, v. 249, p. 230-234, 2009.
- SANCHO, F.H.; SENANTE, M.M.; GARRIDO, R.S. Techno-economical efficiency and productivity change of wastewater treatment plants: the role of internal and external factors. **Journal Environmental Monitoring**, v. 13, p. 3448–3459, 2011.
- SATOH, E. Nontransferable water rights and technical inefficiency in the Japanese water supply industry. **Water Resources and Economics**, v. 11, p. 13-21.
- SCHIERMEIER, Q. The parched planet: Water on tap. **Nature**, v. 510, p. 326-328, 2014.
- SEE, K.F. Exploring and analysing sources of technical efficiency in water supply services: Some evidence from South east Asian public water utilities. **Water Resources and Economics**, v. 9, p. 23-44, 2014.
- SEE, K.F. Exploring and analyzing sources of technical efficiency in water supply services: Some evidence from Southeast Asian public water utilities. **Water Resources and Economics**, v. 9, p. 23–44, 2015.
- SEIFORD, L.M.; THRALL, R.M. Recent developments in DEA: The mathematical programming approach to frontier analysis. **Journal of Econometrics**, v. 46, p. 7-38, 1990.
- SEMARH - **Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Situação volumétrica dos reservatórios do RN.** Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/monitoramentovolumetrico>>. Acesso em 02 Abr. 2017.

SENANTE, M.M.; GARRIDO, R.S.; LAFUENTE, M. The role of environmental variables on the efficiency of water and sewerage companies: a case study of Chile. **Environ Sci Pollut Res**, 2015.

SENANTE, M.M.; GARRIDO, R.S. Performance of fully private and concessionary water and sewerage companies: a metafrontier approach. **Environmental Science and Pollution Research**, 2016a.

SENANTE, M.M. *et al.* Productivity growth of wastewater treatment plants – accounting for environmental impacts: a Malmquist- Luenberger index approach. **Urban Water Journal**, 2016b.

SENANTE, M.M.; DONOSO, G.; GARRIDO, R.S. Assessing the efficiency of Chilean water and sewerage companies accounting for uncertainty. **Environmental Science & Policy**, v. 61, p. 116–123, 2016.

SENANTE, M.M.; MAZIOTIS, A.; GARRIDO, R.S. Assessing the productivity change of water companies in England and Wales: A dynamic metafrontier approach. **Journal of Environmental Management**, V. 197, P. 1-9, 2017.

SENGUPTA, J. K. The Measurement of dynamic productive efficiency. **Bulletin of Economic Research**, v. 51, n. 2, 1999.

SENRA, L. F. A. C. et al. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. **Pesquisa Operacional**, v.27, n.2, p.191-207, 2007.

SHI, T. et al. Urban water resource utilization efficiency in China. **Chinese Geographical Science**, v. 25, n. 6, p. 684-697, 2015.

SINGH, M. R.; UPADHYAY, A.K.; MITTAL, V. Benchmarking of North Indian urban water utilities. **Benchmarking: An International Journal**, v. 18, n. 1, p. 86-106, 2011.

SINGH, M. R.; UPADHYAY, A.K.; MITTAL. Addressing Sustainability in Benchmarking Framework for Indian Urban Water Utilities. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 16, p. 81-92, 2010.

SINGH, M. R.; MITTAL, A.; UPADHYAY, A.K. Efficient water utilities: use of performance indicator system and data envelopment analysis. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 14.5, 2014.

SIVAKUMAR, B. Hydropsychology: The human side of water research. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 4, p. 719-732, 2009.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B. et al. Método multicritério para seleção de variáveis em modelos DEA, **Pesquisa Naval**, v. 15, pp. 55-66, 2002.

SÖDERBERG, M. Firm-level inefficiency and its determinants in the Swedish water and wastewater sector. **Applied Economics Letters**, v. 18, p. 1149–1153, 2011.

SPEELMAN et al. Estimating the impacts of water pricing on smallholder irrigators in North West Province, South Africa. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1560-1566, 2009.

SPEELMAN, S. et al. A measure for the efficiency of water use and its determinants, a case study of small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa. **Agricultural Systems**, v. 98, p. 31-39, 2008.

SPEELMAN, S.; D'HAESE, M.; D'HAESE, L. Simulation of efficiency impact of drainage water re-use: Case of small-scale vegetable growers in North West Province, South Africa. **Agrekon**, v. 50, 2011.

SUÁREZ-VARELO, M.; *et al.* Ownership and performance in water services revisited: Does private management really outperform public? **Water Resources Management**, 2017.

SUN et al. Water resource utilization efficiency and spatial spillover effects in China. **Journal of Geographical Sciences**, v. 24, n. 5, p. 771-788, 2014.

SWATUK, L. et al. Seeing "invisible water": Challenging conceptions of water for agriculture, food and human security. **Canadian Journal of Development Studies**, v. 36, n. 1, p. 24-37, 2015.

TADEO, A.J.P.; FERNÁNDEZ, F.J.S.; GÓMEZ, F.G. Does service quality matter in measuring the performance of water utilities?. **Utilities Policy**, v. 16, p. 30-38, 2008.

THANASSOULIS, E. Comparative performance measurement in regulation: the case of English and Welsh sewerage services. **Journal of the Operational Research Society**, v. 53, p.292-302, 2002.

THANASSOULIS, E. DEA and its use in the regulation of water companies. **European Journal of Operational Research**, v. 127, p. 1-13, 2000a.

THANASSOULIS, E. The use of data envelopment analysis in the regulation of UK water utilities: Water distribution. **European Journal of Operational Research**, v. 126, 436-453, 2000b.

TIELBÖRGER et al. The aesthetics of water and land: A promising concept for managing scarce water resources under climate change. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, p. 5323-5337, 2010.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Network DEA: A slacks-based measure approach. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 1, p. 243–252, 2009.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Dynamic DEA: A slacks-based measure approach. **Omega**, v. 38, n. 3-4, p. 145–156, 2010.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach. **Omega**. v. 42, p. 124–131, 2014.

TUPPER, H.C.; RESENDE, M. Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector: an empirical study. **Utilities Policy**, V. 12, p. 29-40, 2004.

VALIÑAS, M.A.G.; MUÑIZ, M.A. Is DEA useful in the regulation of water utilities? A dynamic efficiency evaluation (a dynamic efficiency evaluation of water utilities). **Applied Economics**, v. 39, n. 2, p. 245-252, 2009.

- VÁZQUEZ, V.M.O. *et al.* Use of the Data Envelopment Analysis (DEA) to evaluate the efficiency of irrigation in the modules of the irrigation of District No. 041, Rio Yaqui (Sonora, Mexico). *Análisis Envolvente de Datos (DEA) para evaluar eficiencia de Riego. Rev. FCA UNCUYO*, v. 49, p. 127-148, 2017.
- VEETTIL, P.C.; SPEELMAN, S.; HUYLENBROECK, G.V. Estimating the Impact of Water Pricing on Water Use Efficiency in Semi-arid Cropping System: An Application of Probabilistically Constrained Nonparametric Efficiency Analysis. *Water Resour Manage*, v. 27, p. 55–73, 2013.
- VERDIER, J.; VIOLLET, P.-L. Water Tensions in Europe and in the Mediterranean: Water crisis by 2050? *Houille Blanche*, n. 6, p. 102-107, 2015.
- VILANOVA, M. R. N.; FILHO, P.M.; BALESTIERI, J.A.P. Performance measurement and indicators for water supply management: Review and international cases. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 1-12, 2015.
- WALTER, M. *et al.* Quo vadis efficiency analysis of water distribution? A comparative literature review. *Utilities Policy*, v. 17, p. 225–232, 2009.
- WANG, X.-Y. Irrigation Water Use Efficiency of Farmers and Its Determinants: Evidence from a Survey in Northwestern China. *Agricultural Sciences in China*, v. 9, p. 1326-1337, 2010.
- WANG, G. *et al.* An integrated analysis of agricultural water-use efficiency: A case study in the Heihe River Basin in Northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 89, p. 3-9, 2015.
- WANG, X.-J. *et al.* A strategy to deal with water crisis under climate change for mainstream in the middle reaches of Yellow River. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 16, n. 5, p. 555-566, 2011.
- WANG, Y.; BIAN, Y.; XU, H. Water use efficiency and related pollutants' abatement costs of regional industrial systems in China: A slacks-based measure approach. *Journal of Cleaner Production*, 2015.
- WANG, Y. *et al.* data envelopment analysis of agricultural technical efficiency of Northwest Arid Areas in China. *Front. Agr. Sci. Eng.*, v. 4(2), p. 195–207, 2017.
- WARNER, R. Secular regime shifts global warming and Sydney's water supply. *Geographical Research*, v. 47, n. 3, p. 227-241, 2009.
- WATTO, M.A; MUGERA, A.W. Efficiency of irrigation water application in sugarcane cultivation in Pakistan. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, p. 1860–1867, 2015.
- WATTO, M.A; MUGERA, A.W. Wheat farming system performance and irrigation efficiency in Pakistan: a bootstrapped metafrontier approach. *International Transactions in Operational Research*, v. 0, p. 1–21, 2016.

WOODBURY, K.; DOLLERY, B. Efficiency Measurement in Australian Local Government: The Case of New South Wales Municipal Water Services. **Review of Policy Research**, v. 21, n. 5, p. 615-636, 2004.

WORTHINGTON, A.C. A review of frontier approaches to efficiency and productivity measurement in urban water utilities. **Urban Water Journal**, v. 11, n. 1, p. 55-73, 2014.

WU, G. et al. Evaluating the construction efficiencies of urban wastewater transportation and treatment capacity: Evidence from 70 megacities in China. **Resources, Conservation and Recycling**, 2016.

XIANG, Z.; CHEN, X.; LIAN, Y. Quantifying the Vulnerability of Surface Water Environment in Humid Areas Base on DEA Method. **Water Resources Management**, v. 30, n. 14, p. 5101-5112, 2016.

YANG, W.-C; LEE, Y.-M.; HU, J.-L. Urban sustainability assessment of Taiwan based on data envelopment analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 341-353, 2016.

YANG, W.; LI, L. Analysis of Total Factor Efficiency of Water Resource and Energy in China: A Study Based on DEA-SBM Model. **Sustainability**, v. 9, 2017.

YILMAZ, B., YURDUSEV, M.A., HARMANCIOGLU, N.B. The assessment of irrigation efficiency in Buyuk Menderes Basin. **Water Resources Management**, v. 23, p. 1081-1095, 2009.

YILMAZ, B.; HARMANCIOGLU, N.B. An Indicator Based Assessment for Water Resources Management in Gediz River Basin, Turkey. **Water Resources Management**, v. 24, n. 15, p. 4359-4379. 2010.

YING M. Relative Efficiency Evaluation on Water Resource Utilization. **Journal of Northeast Agricultural University**, v. 18, n. 3, P. 60-64, 2011.

YOU, Y.Q.; JIE, T. A study of the operation efficiency and cost performance indices of power-supply companies in China based on a dynamic network slacks-based measure model. **Omega**, v. 60, p.85-97, 2016.

YOU, S.; AN, S. The measurement and analysis of total-factor water efficiency in industry of China. **International Journal of Innovative**, v. 12, n. 3, 2016.

ZARGAN, J.; WAEZ-MOUSAVI, S.M. Water crisis in Iran: Its intensity, causes and confronting strategies. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 44, 2016.

ZHA Y. et al. Efficiency evaluation of Banks in China: A dynamic two-stage slacks-based measure approach. **Omega**, v. 60, p. 60-72, 2016.

ZHAO, C. et al. Water use efficiency of Jiangsu province based on the data envelopment analysis approach. **Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica**, v. 33, n. 5, p. 1636-1644, 2013.

ZHAO, L.; SUN, C.; ZHENG, D. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China. **Journal of Geographical Sciences**, v. 69, n. 1, p. 121-133, 2014.

ZHENG et al. Can China cope with its water crisis? - Perspectives from the North China Plain. **Ground Water**, v. 48, n. 3, p. 350-354, 2010.

ZHI, Z.; YING, H.; GUIJUN, Z. An analysis on spatial heterogeneity of optimum allocation efficiency in water-land resources. **Chemical Engineering Transactions**, v. 46, p. 559-564, 2015.

ZHOU, D.; ZHANG, Z.; SHI, M. Where is the future for a growing metropolis in North China under water resource constraints? **Sustainability Science**, v. 10, n. 1, p. 113-122, 2015.

APÊNDICE A – Resultados dos escores de Eficiência.

DMU	<i>Overall Score</i>	<i>Ranking</i>	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Caicó	1	1	1	1	1	1	1	1
Natal	1	1	1	1	1	1	1	1
Nova Cruz	1	1	1	1	1	1	1	1
Parnamirim	1	1	1	1	1	1	1	1
São Miguel do Gostoso	1	1	1	1	1	1	1	1
Serra Negra do Norte	1	1	1	1	1	1	1	1
Touros	1	1	1	1	1	1	1	1
Venha-Ver	1	1	1	1	1	1	1	0,9999
Nísia Floresta	0,9645	9	0,8024	1	1	1	1	0,9844
Currais Novos	0,9592	10	0,8696	0,8855	1	1	1	1
Mossoró	0,9571	11	1	1	1	0,9347	0,9384	0,8695
Areia Branca	0,9066	12	0,8621	0,8423	0,7355	1	1	1
Jardim de Angicos	0,904	13	0,8905	1	0,7888	0,9673	1	0,7777
Olho D'Água do Borges	0,8973	14	0,876	1	0,9813	0,9543	1	0,572
São José de Mipibu	0,8884	15	0,6482	0,7751	0,9068	1	1	1
Vila Flor	0,887	16	1	1	0,727	0,595	1	1
Upanema	0,8519	17	0,761	0,5882	0,7623	1	1	1
Ipueira	0,8494	18	0,7961	0,7801	0,9163	1	1	0,6041
Jundiá	0,8354	19	0,9052	0,6299	0,5491	0,928	1	1
Serrinha dos Pintos	0,8352	20	0,5839	0,5901	0,9385	1	1	0,8984
Viçosa	0,8341	21	0,6451	0,886	0,8024	1	1	0,6712
Coronel João Pessoa	0,8236	22	0,9284	0,7554	0,7002	1	0,8956	0,6617
Várzea	0,8226	23	0,7028	0,5001	0,7324	1	1	1
Riacho de Santana	0,8102	24	0,7333	0,6934	0,7071	0,9673	0,7601	1
Encanto	0,8068	25	1	1	1	1	0,3617	0,4792
Poço Branco	0,8017	26	0,3644	0,7888	1	1	0,8607	0,7961
Angicos	0,7876	27	0,9137	0,8188	0,6323	0,9414	0,8186	0,6006
São Fernando	0,7798	28	0,6848	0,7923	0,9699	1	0,5972	0,6345
Guamaré	0,7704	29	0,9326	1	1	0,7356	0,5243	0,43
Florânia	0,7494	30	1	1	1	0,5966	0,5491	0,3509
Açu	0,7435	31	0,6489	0,7598	0,6791	0,7812	0,837	0,7547
Goianinha	0,7303	32	0,6794	0,9846	0,8809	0,7295	0,6156	0,4917
Fernando Pedroza	0,7297	33	0,7734	0,6611	0,7432	0,9849	0,5889	0,6265
Timbaúba dos Batistas	0,7246	34	0,9349	0,9506	0,5797	0,7654	0,6067	0,5102
Coronel Ezequiel	0,7236	35	0,6735	0,6107	0,7473	1	0,6448	0,6651
Janduí	0,7166	36	1	1	0,5299	0,4766	0,4485	0,8444
Ielmo Marinho	0,7119	37	1	1	0,7222	0,4548	0,558	0,5361
Tenente Ananias	0,7112	38	0,3999	0,4557	0,5379	0,8735	1	1
Taboleiro Grande	0,7065	39	0,7855	0,7989	0,6755	0,636	0,5898	0,7531
Porto do Mangue	0,7036	40	0,7034	0,7132	0,5971	0,8054	0,6136	0,7888
São Paulo do Potengi	0,694	41	1	1	0,5937	0,7018	0,4955	0,3727
Santa Maria	0,6829	42	0,8181	0,7498	0,5332	0,7564	0,5348	0,7048
Caiçara do Rio do Vento	0,6739	43	0,2983	0,4941	0,8009	1	1	0,4503
Macaíba	0,6734	44	0,7186	0,8398	0,5252	0,6406	0,7742	0,5417
Santo Antônio	0,6674	45	1	1	0,5089	0,6253	0,4519	0,4186
Jucurutu	0,6511	46	0,6698	0,6081	0,54	0,8684	0,7551	0,4651
Campo Grande	0,6478	47	0,2792	0,3899	0,7108	1	1	0,5066
Doutor Severiano	0,6457	48	0,4407	0,4966	0,4602	0,6153	0,8612	1
Arês	0,641	49	0,5033	0,4744	0,5333	0,8818	0,9448	0,5085
Santana do Matos	0,6236	50	0,6627	0,6838	0,6618	0,6277	0,6225	0,483
Lagoa de Pedras	0,6234	51	0,5536	0,5256	0,6537	0,7382	0,6829	0,5867
Tangará	0,616	52	0,6328	0,5174	0,5441	0,6792	0,7686	0,5538
Paraú	0,6054	53	0,5573	0,597	0,6305	0,7645	0,429	0,6543
Baraúna	0,6003	54	0,5786	0,6386	0,4445	0,6599	0,7038	0,5766

Monte Alegre	0,5988	55	0,5768	0,4723	0,5232	0,7514	0,6676	0,6014
Senador Georgino Avelino	0,5939	56	0,5613	0,5944	0,5043	0,4108	0,6422	0,8505
Sítio Novo	0,5891	57	0,5084	0,6113	0,5811	0,7687	0,5123	0,553
Lagoa Salgada	0,5878	58	0,2987	0,387	0,5408	0,5789	0,7344	0,9872
Marcelino Vieira	0,5764	59	0,4494	0,4485	0,5544	0,7041	0,7034	0,5984
Rafael Fernandes	0,5732	60	0,5739	0,5647	0,5859	0,5387	0,4605	0,7156
Jandaíra	0,5716	61	0,5834	0,4923	0,4926	0,6606	0,5797	0,6211
Ipanguaçu	0,5691	62	0,6845	0,5486	0,6268	0,5854	0,4905	0,4786
Pau dos Ferros	0,5681	63	0,7299	0,6113	0,3916	0,5313	0,5279	0,6167
Parelhas	0,5651	64	0,6447	0,6677	0,4417	0,591	0,5578	0,4878
Alto do Rodrigues	0,5641	65	0,6578	0,6814	0,5203	0,5487	0,5817	0,3947
Ouro Branco	0,5635	66	0,4699	0,542	0,4524	0,5598	0,5069	0,8501
Barcelona	0,5598	67	0,6098	0,5835	0,6232	0,564	0,4709	0,5075
Passagem	0,5598	67	0,5556	0,5517	0,4681	0,4929	0,6481	0,6421
Triunfo Potiguar	0,5545	69	0,3569	0,6845	0,6773	0,7715	0,4367	0,4002
João Câmara	0,5514	70	0,6412	0,701	0,4174	0,5856	0,5991	0,3643
Ruy Barbosa	0,5497	71	0,577	0,62	0,4471	0,6311	0,5163	0,5066
São Pedro	0,5465	72	0,5401	0,6019	0,5112	0,5863	0,4887	0,5509
São José do Seridó	0,5388	73	0,397	0,4182	0,3903	0,7865	0,6093	0,6313
Caraúbas	0,5327	74	0,5517	0,5475	0,3924	0,627	0,6433	0,4343
Francisco Dantas	0,5306	75	0,6328	0,6083	0,559	0,4897	0,3494	0,5442
Jardim do Seridó	0,5277	76	0,6159	0,6404	0,4772	0,5953	0,5084	0,3288
Lagoa de Velhos	0,5246	77	0,5587	0,6029	0,4458	0,5771	0,4959	0,4674
São José do Campestre	0,5204	78	0,5324	0,5657	0,4193	0,569	0,6148	0,4214
Canguaretama	0,5165	79	0,5371	0,6169	0,4926	0,5752	0,5423	0,3347
Apodi	0,5104	80	0,6214	0,4979	0,3652	0,5742	0,6166	0,3873
São Tomé	0,5042	81	0,7897	0,6991	0,4133	0,4151	0,4125	0,2957
Serra Caiada	0,5024	82	0,3436	0,3644	0,5849	0,5427	0,6278	0,5509
Vera Cruz	0,486	83	0,3475	0,3086	0,4491	0,5891	0,631	0,5905
Baía Formosa	0,4849	84	0,3979	0,5162	0,5023	0,5474	0,5152	0,4302
Almino Afonso	0,4848	85	0,4908	0,4582	0,4254	0,5997	0,4268	0,5078
Espírito Santo	0,4819	86	0,2638	0,272	0,278	0,3443	0,7331	1
Pedro Velho	0,4784	87	0,5857	0,3499	0,5448	0,6439	0,3447	0,4011
Senador Elói de Souza	0,4784	87	0,4743	0,4113	0,5398	0,5321	0,3788	0,5342
José da Penha	0,4762	89	0,5685	0,5453	0,4201	0,5045	0,3567	0,462
Passa e Fica	0,4749	90	0,3939	0,3773	0,4845	0,5374	0,6156	0,4406
Cerro Corá	0,4602	91	0,2753	0,3056	0,3997	0,6004	0,7734	0,4066
Messias Targino	0,4573	92	0,5371	0,3895	0,2886	0,5079	0,4746	0,5461
Paraná	0,4417	93	0,4359	0,4368	0,3828	0,4575	0,4166	0,5206
Frutuoso Gomes	0,436	94	0,4648	0,5235	0,4964	0,471	0,3266	0,3339
Lagoa d Anta	0,4338	95	0,393	0,4205	0,4136	0,4556	0,4729	0,4469
Monte das Gameleiras	0,432	96	0,3575	0,4211	0,3821	0,5551	0,4608	0,4154
Ielmo Marinho	0,4212	97	0,478	0,4928	0,3001	0,4604	0,4148	0,3812
Umarizal	0,4167	98	0,4754	0,4747	0,3792	0,4368	0,4386	0,2956
Portalegre	0,4149	99	0,4012	0,3847	0,4643	0,5568	0,3392	0,3433
Taipu	0,4129	100	0,4473	0,3219	0,3983	0,4972	0,4531	0,3598
Cruzeta	0,4091	101	0,3566	0,4121	0,4488	0,4862	0,4356	0,3151
Parazinho	0,4083	102	0,3391	0,4673	0,4621	0,3696	0,4458	0,3659
Acari	0,402	103	0,3681	0,3773	0,3266	0,4928	0,4853	0,3618
Afonso Bezerra	0,396	104	0,2972	0,3713	0,4098	0,5643	0,3299	0,4034
Santana do Seridó	0,3918	105	0,4371	0,4806	0,2887	0,3532	0,3168	0,4746
Lajes	0,3886	106	0,3867	0,4485	0,3345	0,4324	0,4377	0,2919
São Bento do Trairí	0,3884	107	0,3895	0,4625	0,2994	0,5204	0,2903	0,3683
Bom Jesus	0,3865	108	0,3853	0,2799	0,3255	0,4304	0,3991	0,4987
Campo Redondo	0,3854	109	0,3138	0,2998	0,4882	0,4223	0,3119	0,4764
Grossos	0,3833	110	0,3233	0,3237	0,3393	0,4142	0,4886	0,4107
Rodolfo Fernandes	0,3813	111	0,3678	0,3586	0,3606	0,4362	0,3741	0,3904
Montanhas	0,3811	112	0,4011	0,38	0,332	0,4356	0,4338	0,3043

Pedra Grande	0,3806	113	0,3535	0,3893	0,4795	0,3308	0,4143	0,3162
Macau	0,3723	114	0,4751	0,3624	0,2489	0,3866	0,3962	0,3643
São Bento do Norte	0,3703	115	0,3357	0,339	0,3892	0,3925	0,4302	0,3354
São João do Sabugi	0,3702	116	0,3459	0,3656	0,4158	0,4144	0,3572	0,3222
Jardim de Piranhas	0,3673	117	0,4433	0,4748	0,333	0,376	0,36	0,2166
Pendências	0,3638	118	0,3405	0,4566	0,3502	0,4005	0,36	0,275
Japi	0,3608	119	0,3418	0,3182	0,3141	0,404	0,3446	0,4424
Lajes Pintadas	0,3577	120	0,3352	0,3524	0,2687	0,4878	0,2882	0,414
Patu	0,356	121	0,3274	0,2494	0,4884	0,7257	0,1759	0,1689
Governador Dix-Sept Rosado	0,3511	122	0,2717	0,3099	0,3479	0,3533	0,4459	0,378
Caiçara do Norte	0,3392	123	0,268	0,3473	0,3804	0,3748	0,3805	0,2843
Martins	0,3386	124	0,2628	0,281	0,3584	0,468	0,3761	0,2853
Bento Fernandes	0,3303	125	0,3153	0,3125	0,3817	0,3053	0,3387	0,3284
Itaú	0,3272	126	0,3579	0,3571	0,3683	0,3511	0,2779	0,251
Serra de São Bento	0,3217	127	0,3346	0,2648	0,2813	0,4055	0,3405	0,3036
Jaçanã	0,3134	128	0,2343	0,2392	0,2494	0,4722	0,2798	0,4052
Pureza	0,3072	129	0,2387	0,2336	0,3533	0,3626	0,3958	0,259
Felipe Guerra	0,3048	130	0,3787	0,3952	0,2412	0,3213	0,2781	0,2144
São Rafael	0,2952	131	0,2694	0,2505	0,3396	0,3466	0,3312	0,2341
Severiano Melo	0,2836	132	0,2431	0,283	0,3695	0,3249	0,2926	0,1888
Carnaubais	0,2747	133	0,2876	0,2986	0,2928	0,2918	0,243	0,2343
Tibau do Sul	0,2701	134	0,2659	0,1886	0,2378	0,3239	0,3683	0,2362
Lucrécia	0,268	135	0,331	0,3166	0,257	0,3023	0,2179	0,1832
Tibau	0,2478	136	0,2144	0,2109	0,2042	0,2837	0,3195	0,2543
Riachuelo	0,2315	137	0,1881	0,2302	0,2393	0,2849	0,2314	0,2153