

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO NA OPERAÇÃO CARRO-PIPA  
DO NORDESTE BRASILEIRO COM A CONSTRUÇÃO DE  
NOVAS ESTAÇÕES DE ÁGUA**

**DANIELA RODRÍGUEZ ORTIZ**

**ORIENTADOR: REINALDO CRISPINIANO GARCIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**PUBLICAÇÃO: T.DM-004/2021**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO NA OPERAÇÃO CARRO-PIPA DO  
NORDESTE BRASILEIRO COM A CONSTRUÇÃO DE NOVAS  
ESTAÇÕES DE ÁGUA**

**DANIELA RODRÍGUEZ ORTIZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.**

**APROVADA POR:**

---

**Professor Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia – PPTG/UnB  
(Orientador)**

---

**Professor Sérgio Ronaldo Granemann – PPGT/UnB  
(Examinador Interno)**

---

**Professor José Vicente Caixeta Filho – ESALQ/USP  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 3 de dezembro de 2021.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RODRÍGUEZ, DANIELA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO NA OPERAÇÃO CARRO-PIPA DO NORDESTE BRASILEIRO COM A CONSTRUÇÃO DE NOVAS ESTAÇÕES DE ÁGUA. Brasília, 2021

xii, 129p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes,2021).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Modelo de otimização

2 – Estações de tratamento de água

3 –Operação Carro-Pipa

4 –Nordeste Brasileiro

I – ENC/FT/UnB

II – Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Rodríguez, O. D. (2021). Modelo de otimização na Operação Carro-Pipa do Nordeste Brasileiro com a construção de novas estações de água. Publicação T.DM-004/2021. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniela Rodríguez Ortiz

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELO DE OTIMIZAÇÃO NA OPERAÇÃO CARRO-PIPA DO NORDESTE BRASILEIRO COM A CONSTRUÇÃO DE NOVAS ESTAÇÕES DE ÁGUA. Brasília, 2021.

GRAU: Mestre/2021.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Daniela Rodríguez Ortiz

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, sejam dadas toda honra e glória.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro, agradeço a Deus por sempre me acompanhar em cada desafio da minha vida e me dar a saúde e força para finalizar meu mestrado, apesar da contingência.

Em segundo lugar, aos meus pais, por apoiarem meus sonhos, me acompanharem e me ajudarem no meu processo de aprendizagem.

Agradeço, também, aos meus colegas da turma, em especial ao Jefferson, a Mariana, a Rauenya e a Amanda, por me ajudarem e me apoiarem em muitos momentos e pelo acolhimento desde o primeiro dia.

Agradeço a ajuda e apoio da Roberta e do Danilo, que me auxiliaram muitas vezes no que eu precisava.

Agradeço, também, a meu orientador, o Professor Reinaldo Crispiniano Garcia, pela paciência e disposição de sempre para conseguir concluir minha tese da melhor maneira.

Agradeço a secretaria do PPGT, em especial a Camila, por sempre me ajudar na gestão e prestação dos serviços desde minha chegada ao país.

Agradeço, também, ao professor Alan Ricardo da Silva por me ajudar e me acolher na minha chegada ao Brasil e me explicar tudo relacionado com o Programa.

Por fim, agradeço ao Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) pelo fornecimento das bases de dados necessárias para conseguir realizar o levantamento e geoprocessamento dos dados.

## RESUMO

A escassez de água potável é um significativo problema mundial em áreas carentes, a incluir o nordeste brasileiro. Este problema afeta milhares de pessoas em diferentes estados do Brasil, de modo que o governo brasileiro criou o programa Operação Carro-Pipa (OCP) para a distribuição de água potável, que atinge aproximadamente 500 municípios e 1,7 milhões de pessoas, porém, sua operação requer um desembolso anual aproximado de R\$ 1,2 bilhões.

O presente trabalho busca, assim, propor um modelo de otimização para reduzir os custos de transporte e operação por meio da construção de novas Estações de Tratamento de Água (ETAs) para 8 estados do Nordeste, sendo estes Alagoas, Sergipe, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí, Pernambuco e Bahia. As maiores economias para 7 destes estados foram obtidas com a construção de duas ETAs de porte grande, e para o estado da Bahia, a maior economia foi obtida com construção de duas ETAs de pequeno porte. Tais economias variam de 9,87% para 31,21% para cada um destes estados. Além disso, o retorno em meses mais rápido corresponde a ETAs de pequeno porte que variam de 1 mês a 35 meses. Estes resultados demonstram a robustez do modelo desenvolvido, além dos impactos favoráveis tanto econômicos quanto sociais para a comunidade.

**Palavras-chave:** Problema de localização; Estações de tratamento de água; Operação Carro Pipa; Problema de transporte; Sistema de Informação Geográfica-SIG.

## ABSTRACT

The scarcity of potable water is an important global problem in poor areas, including the Brazilian Northeast. This problem affects thousands of people in different states, so the Brazilian government created the program called Operation Car-Pipa (OCP) for the distribution of drinking water. The OCP program reaches approximately 500 municipalities and 1.7 million people, but its operation requires an annual budget of approximately R\$ 1.2 billion.

Therefore, the present work seeks to propose an optimization model to reduce transport and operation costs through the construction of new water treatment plants (WTP) for 8 states in the Brazilian Northeast, these being Alagoas, Sergipe, Ceará, Rio Grande North, Paraíba, Piauí, Pernambuco and Bahia. The largest savings for 7 of these states were obtained building two WTPs with the largest capacities. Although for the Brazilian state of Bahia, the largest savings were obtained building two WTPs with the lowest capacities. These savings vary from 9,87% to 31,21% for each of these states. Moreover, the fastest return in months corresponds to small WTPs, varying from 1 month to 35 months. Therefore, these results demonstrate the robustness of the developed model besides the favorable economic and social impacts for the community.

**Keywords:** Localization problem; Water Treatment Station; Water Trunk Operation; Transportation Problem; Geographic Information System-GIS.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.2.1 Objetivo Geral .....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 JUSTIFICATIVA .....	4
1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA .....	5
1.4.1 Revisão da literatura e identificação dos métodos de localização de armazéns .....	6
1.4.2 Definição do problema e coleta de dados .....	6
1.4.3 Análise SIG e modelo matemático .....	6
1.4.4 Avaliação dos resultados .....	7
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
2.1 DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO BRASIL .....	9
2.2 NORDESTE BRASILEIRO .....	13
2.2.1 Alagoas .....	13
2.2.2 Sergipe .....	14
2.2.3 Rio Grande do Norte .....	14
2.2.4 Ceará .....	15
2.2.5 Paraíba .....	15
2.2.6 Pernambuco .....	16
2.2.7 Piauí .....	16
2.2.8 Bahia .....	16
2.3. O POLÍGONO DA SECA .....	17
2.3.1 Operação Carro-Pipa .....	21
2.4. PESQUISA OPERACIONAL .....	23
2.4.1. Problema de Transporte .....	25
2.4.2. Problemas de Roteirização de Veículos .....	26
2.5. Teoria da Localização de Instalações .....	27
2.5.1. Sistemas de Informação Geográfica na Localização de Instalações .....	29

2.5.2. Localização de Armazéns.....	30
2.5.2.1. Localização de armazéns de água.....	31
2.6. ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (PLANTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA).....	32
3. MÉTODOS E MATERIAIS.....	36
3.1 GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS .....	36
3.2 BANCO DE DADOS .....	37
3.2.1. Base de dados do CENAD .....	37
3.2.1.1 Sistema de Coordenadas Geográficas.....	39
3.2.1.2 Sistema de Coordenadas Planas .....	40
3.2.2. Malha Municipal do IBGE.....	41
3.3.3. Malha Viária.....	42
3.3. TRATAMENTO DOS DADOS .....	43
3.5 GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS NO ARCGIS.....	44
3.5.1. Geoprocessamento para Alagoas .....	45
3.5.2. Geoprocessamento para Sergipe .....	48
3.5.3. Geoprocessamento para Paraíba.....	51
3.5.4. Geoprocessamento para Ceará .....	53
3.5.5. Geoprocessamento para Piauí .....	56
3.5.6. Geoprocessamento para Rio Grande do Norte.....	59
3.5.7. Geoprocessamento para Bahia .....	62
3.5.8. Geoprocessamento para Pernambuco.....	65
3.6. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	67
3.7. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS .....	69
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	71
4.1 ANÁLISES DE RESULTADOS POR ESTADO .....	71
4.1.1. Análise para o estado de Alagoas.....	71
4.1.2 Análise para o estado de Sergipe.....	72
4.1.3 Análise para o estado do Ceará .....	73
4.1.4 Análise para o estado do Rio Grande do Norte.....	74
4.1.5 Análise para o estado da Paraíba.....	75

4.1.6 Análise para o estado do Piauí .....	76
4.1.7 Análise para o estado da Bahia .....	77
4.1.8 Análise para o estado do Pernambuco.....	78
4.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE CONSTRUÇÃO DAS NOVAS ETAS .....	79
4.2.1. Análise de viabilidade econômica para o estado de Alagoas.....	81
4.2.2. Análise de viabilidade econômica para o estado de Sergipe.....	82
4.2.3. Análise de viabilidade econômica para o estado do Ceará .....	83
4.2.4. Análise de viabilidade econômica para o estado de Rio Grande do Norte .....	84
4.2.5. Análise de viabilidade econômica para o estado da Paraíba.....	85
4.2.6. Análise de viabilidade econômica para o estado de Piauí.....	86
4.2.7. Análise de viabilidade econômica para o estado de Pernambuco.....	87
4.2.8. Análise de viabilidade econômica para o estado da Bahia.....	88
5. CONCLUSÕES .....	90
5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	90
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS.....	102
APÊNDICE B- ARTIGOS RELACIONADOS COM LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS DE ÁGUA NA <i>WEB OF SCIENCE E NA SCOPUS</i> .....	105
APÊNDICE C – MODELAGEM UTILIZADA NO MATLAB .....	107
APÊNDICE D: PROCESSAMENTO DOS DADOS EM ARGIS. ....	115

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Dados da Operação Carro-Pipa do Governo Federal .....	22
<b>Tabela 2:</b> Custos aproximados de construção de uma planta de tratamento de água para uma capacidade de 100 MGD .....	35
<b>Tabela 3:</b> Exemplos das matrizes fornecidas pelo CENAD .....	38
<b>Tabela 4:</b> Número de PAs e MAN dos 8 estados da pesquisa.....	39
<b>Tabela 5:</b> Exemplo de coordenadas geográficas X e Y para localização das PAs.....	40
<b>Tabela 6:</b> Resumo por estado da distância atual em quilômetros, a distância otimizada e a economia (%).....	44
<b>Tabela 7:</b> Resumo dos cenários para cada estado da pesquisa .....	70
<b>Tabela 8:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários do estado de Alagoas .....	72
<b>Tabela 9:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado de Sergipe .....	73
<b>Tabela 10:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado de Ceará.....	74
<b>Tabela 11:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado de Rio Grande do Norte .....	75
<b>Tabela 12:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado da Paraíba .....	76
<b>Tabela 13:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado de Piauí.....	77
<b>Tabela 14:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado da Bahia.....	78
<b>Tabela 15:</b> Custo otimizado (Km) e economia percentual para os três cenários para o estado de Pernambuco .....	79
<b>Tabela 16:</b> Resumo de produção requerida (em milhões de litros de água) e custo de construção da ETA (em reais).....	81
<b>Tabela 17:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Alagoas.....	81
<b>Tabela 18:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Sergipe .....	82
<b>Tabela 19:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado do Ceará .....	84
<b>Tabela 20:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Rio grande do Norte .....	85
<b>Tabela 21:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado da Paraíba.....	86
<b>Tabela 22:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Piauí .....	87
<b>Tabela 23:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado do Pernambuco ....	88
<b>Tabela 24:</b> Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado da Bahia .....	89

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa Polígono da Seca.....	2
<b>Figura 2:</b> Metodologia do trabalho.....	5
<b>Figura 3:</b> Regiões Hidrográficas Brasileiras.....	10
<b>Figura 4:</b> Distribuição de água no Brasil.....	12
<b>Figura 5:</b> Delimitação do Polígono da Seca ou Semiárido.....	18
<b>Figura 6:</b> Monitoramento de Secas entre os anos de 2016 e 2018. ....	19
<b>Figura 7:</b> Seca no Brasil entre os anos 2015 e 2017 e número de pessoas afetadas por região geográfica. ....	20
<b>Figura 8:</b> Evolução do Volume do Reservatório no Nordeste Brasileiro.....	21
<b>Figura 9:</b> Exemplo da Operação Carro-Pipa .....	23
<b>Figura 10:</b> Exemplo de um problema de Transporte.....	26
<b>Figura 11:</b> Processo de uma planta de tratamento de água convencional .....	33
<b>Figura 12:</b> Exemplos de Custos de construção de plantas de tratamento de água de mar avançadas.....	34
<b>Figura 13:</b> Malha Municipal dos estados da pesquisa no Nordeste Brasileiro.....	41
<b>Figura 14:</b> Malha Rodoviária do Nordeste Brasileiro. ....	43
<b>Figura 15:</b> PAs localizados e mapa de calor com as zonas de maior ganho para o estado de Alagoas. ....	46
<b>Figura 16:</b> Mapa com a localização das novas ETAs.....	47
<b>Figura 17:</b> Matriz de origem-destino de Alagoas desde as novas ETAs para as PAs já existentes. ....	48
<b>Figura 18:</b> PAs localizados e mapa de calor com as zonas de maior ganho para o estado de Sergipe.....	49
<b>Figura 19:</b> Mapa com a localização das novas ETAs para o estado de Sergipe .....	50
<b>Figura 20:</b> Matriz de origem-destino de Sergipe desde as novas ETAs para as PAs já existentes. ....	50
<b>Figura 21:</b> Localização das PAs e identificação das zonas de maior ganho para o estado da Paraíba .....	51
<b>Figura 22:</b> Mapa com a localização das novas ETAs para o estado da Paraíba.....	52
<b>Figura 23:</b> Matriz origem-destino da Paraíba desde as novas ETAs até as PAs já existentes. ....	53
<b>Figura 24:</b> Localização das PAs e mapa de calor do estado de Ceará.....	54
<b>Figura 25:</b> Mapa com a localização das novas ETAs para o estado do Ceará .....	55
<b>Figura 26:</b> Matriz origem-destino do Ceará desde as novas ETAs até as PAs já existentes.....	56
<b>Figura 27:</b> Localização das PAs e mapa de calor do estado do Piauí. ....	57
<b>Figura 28:</b> Mapa com a localização das novas ETAs para o estado do Ceará .....	58
<b>Figura 29:</b> Matriz origem-destino do Piauí desde as novas ETAs até as PAs já existentes.....	59
<b>Figura 30:</b> Localização das PAs e mapa de calor do estado do Rio Grande do Norte .....	60
<b>Figura 31:</b> Mapa com a localização das novas ETAs do estado do Rio Grande do Norte.....	61
<b>Figura 32:</b> Matriz origem-destino do Rio Grande do Norte desde as novas ETAs até as PAs já existentes. ....	62

<b>Figura 33:</b> Localização das PAs e mapa de calor do estado da Bahia.....	63
<b>Figura 34:</b> Mapa com a localização das novas ETAs da Bahia.....	64
<b>Figura 35:</b> Matriz origem-destino da Bahia desde as novas ETAs até as PAs já existentes.....	64
<b>Figura 36:</b> Localização das PAs e mapa de calor do estado de Pernambuco.....	65
<b>Figura 37:</b> Mapa com a localização das novas ETAs do estado de Pernambuco.....	66
<b>Figura 38:</b> Matriz origem-destino de Pernambuco desde as novas ETAs até as PAs já existentes. .....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

<b>AACEi</b>	<i>Association for the advancement of Cost Engineering</i>
<b>AHP</b>	Análise multicritério
<b>AL</b>	Alagoas
<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<b>ANP</b>	Processo Analítico de Rede
<b>BA</b>	Bahia
<b>CE</b>	Ceará
<b>CENAD</b>	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
<b>CCI</b>	Índice de Custo de Construção
<b>DHS</b>	Departamento de Higiene e Saúde
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>GPS</b>	Sistemas de Posicionamento Global
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>MAN</b>	Manancial
<b>MDR</b>	Ministério do Desenvolvimento Regional
<b>MED</b>	Destilação de efeitos múltiplos
<b>MGD</b>	<i>Millions of Gallons per Day</i>
<b>MSF</b>	Multi-estágio flash / <i>Multi Flash Destillation</i>
<b>MVC</b>	Compressão Mecânica de Vapor
<b>OCP</b>	Operação Carro-Pipa
<b>PA</b>	Prefeitura Administrativa
<b>PAD</b>	Programa Água Doce
<b>PE</b>	Pernambuco
<b>PI</b>	Piauí
<b>PB</b>	Paraíba
<b>PO</b>	Pesquisa Operacional

<b>PCV</b>	Problema do Caixeiro-Viajante
<b>QFD</b>	Desdobramento de Função Qualidade
<b>RN</b>	Rio Grande do Norte
<b>RO</b>	Osmose Reversa
<b>SE</b>	Sergipe
<b>SEDEC</b>	Secretaria Nacional de Defesa Civil
<b>SIG</b>	Sistema de Informação Geográfica
<b>UTM</b>	<i>Universal Transverse Mercator</i>

# 1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas sociais mundiais mais significativos é a escassez de água em regiões carentes, e, também, um dos problemas mais representativos no nordeste do Brasil, que afeta boa parte da população há décadas pela ausência de chuva, altas temperaturas e insuficiência de rios, e provoca problemas na economia, na saúde e na sustentabilidade da região. Os estados mais populosos, tais como Bahia, Pernambuco e Ceará, sofrem a consequência do problema, as migrações devido à seca provocada pela ausência de chuva ao longo do ano em épocas específicas. E esta falta de chuva atinge a agricultura, o que ocasiona a pobreza e a fome na região (GASPAR, 2009; PENA, 2020).

O programa da Operação Carro-Pipa (OCP) foi criado, então, para distribuir água potável em vários estados do nordeste do Brasil, a fim de mitigar a escassez de água e a estiagem na região. Tal operação é realizada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e Ministério da Defesa (MD), com a execução do Exército Brasileiro, e beneficia aproximadamente 500 municípios e 1,7 milhões de pessoas (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2019).

Devido a esta problemática, um modelo de otimização foi implementado para solucionar o problema de distribuição de água e roteirização da OCP, o que reduziu os custos operacionais. Observou-se que as economias poderiam ser ainda maiores, caso fossem construídas novas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

O presente trabalho possui o objetivo de propor um novo modelo de otimização para diminuir os custos do programa da OCP, adicionando novas ETAs, e utilizará as bases de dados fornecidas pelo CENAD (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres), a aplicar aos 8 estados do Nordeste, sendo Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. O levantamento das bases de dados foi realizado pelo CENAD, e além de usar a base viária do *Diva-Gis* e a malha municipal fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi utilizado os *softwares ArcGIS* e *MATLAB* para o processamento e tratamento dos dados.

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O nordeste brasileiro apresenta épocas emergenciais de seca ao longo do ano, devido a estiagens e ao esgotamento dos mananciais nos diferentes estados. Desse modo, milhões de pessoas sofrem com a causa da ausência de água e chuva, conhecido como o polígono da seca, representado na figura 1.



**Figura 1:** Mapa Polígono da Seca

**Fonte:** IBGE,2020; CODEVASF, 2020.

Medidas favoráveis foram adotadas para a população afetada que estava em situações de emergência e com escassez de água nas regiões mais vulneráveis, criando-se, então, o programa de Operação Carro-Pipa (OCP). Entretanto, deve-se mencionar que ainda existem regiões e municípios que não contam com uma adequada distribuição de água, por exemplo, os estados já mencionados.

Este trabalho propõe um modelo de otimização para a Operação Carro-Pipa, a considerar novas ETAs localizadas de maneira estratégica para o adequado fornecimento de água para os pontos de entrega chamados de Prefeituras Administrativas (PAs). O modelo objetiva melhorar as condições econômicas e sociais da comunidade, assim como a diminuição dos custos da operação. Desta forma, consideram-se as seguintes questões de investigação para os 8 estados selecionados do Nordeste:

- i. Onde e quantas ETAs localizar para otimizar a OCP e reduzir os custos de transporte das mesmas?
- ii. Qual é a capacidade ótima das novas ETAs?
- iii. Qual é o custo-benefício ao construir novas ETAs?

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta seção descreve o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um modelo de otimização para a distribuição de água em 8 estados do Nordeste, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, mediante Operação de Carro-Pipa (OCP) e adicionando novas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a situação atual da distribuição de água pela OCP no Nordeste.
- Propor um modelo de otimização da Operação Carro-Pipa nos 8 estados supracitados, considerando novos pontos de coleta.
- Identificar a ótima localização das novas ETAs e suas capacidades.
- Realizar uma análise de custo-benefício ao construir novas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A escassez de água no nordeste do Brasil é um dos problemas mais relevantes devido à estiagem em épocas de secas, o que dificulta a distribuição de água na maioria dos estados e municípios que precisam de água potável ao longo do ano. Anualmente, cerca de 39 milhões de pessoas têm sido afetadas pela seca nesta região, e desde o ano de 2012, a Operação Carro-Pipa atende aproximadamente 500 municípios e 1,7 milhões de pessoas anualmente. No entanto, a operação continua sendo insuficiente em alguns estados da região devido, principalmente, ao esgotamento dos mananciais e a inadequada formulação de rotas dentro do programa (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2019).

Portanto, é necessário analisar e propor um novo modelo de otimização da OCP, sendo considerada a construção de novas ETAs para a distribuição de água nos 8 estados nordestinos, uma vez que o objetivo é minimizar os custos operacionais anuais e obter um melhor fornecimento de água potável nas regiões mais carentes.

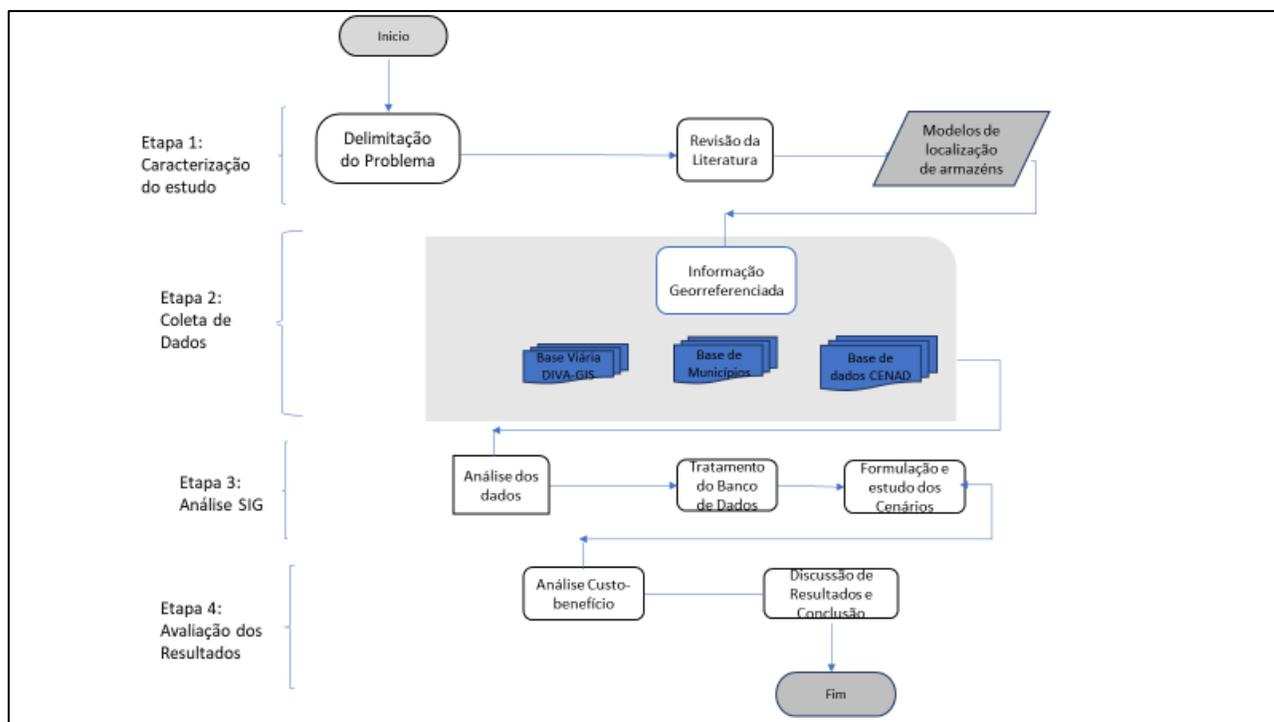
É importante adicionar que a OCP é uma operação complexa. Por exemplo, já houve meses em que o número total de mananciais disponíveis para captação de água foi de aproximadamente 2.500 e o número de PAs de 44 mil. Este problema resulta em determinar qual destes 2.500 mananciais devem entregar água para cada uma das 44 mil Prefeituras Administrativas, levando em conta a minimização da distância de entrega, a capacidade dos mananciais e as demandas das PAs.

Devido a dinâmica do clima, podem ocorrer chuvas em algum mês, e o número de PAs que requerem água varia de mês a mês. Além disso, devido ao possível aumento de estiagem, pode acontecer que algum manancial não seja capaz de fornecer água no próximo mês. Estas particularidades da OCP demonstram os elevados esforços econômicos e sociais demandados, como o da força militar que é responsável pela operacionalização da Operação Carro-Pipa, que dificulta o cumprimento dos objetivos da operação e sua eficiência.

Este trabalho é de vital importância, já que atualmente a Operação Carro-Pipa está tendo problemas não apenas de roteirização e transporte, mas também de falta de mananciais para o fornecimento de água potável aos municípios. Esta é a razão pela qual é necessário localizar novas ETAs com a finalidade de facilitar a operação do programa, e, Adicionalmente, o trabalho tem impactos favoráveis tanto econômicos quanto sociais, pois há uma melhora na saúde das comunidades afetadas pela diminuição de doenças causadas, devido ao atual fornecimento inadequado da qualidade de água.

#### 1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos da presente dissertação, são propostas as seguintes etapas, como observa-se na figura 2 e que serão descritas nas seções seguintes:



**Figura 2:** Metodologia do trabalho

**Fonte:** Elaboração própria.

#### **1.4.1 Revisão da literatura e identificação dos métodos de localização de armazéns**

Nesta etapa, levantou-se o estado da arte da distribuição de água no nordeste do Brasil e uma contextualização dos principais problemas em virtude das épocas de secas e estiagens de água na região. Além disso, foram utilizadas as bases da *Web Of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* para identificar os trabalhos mais representativos sobre métodos de localização de pontos de coleta e de distribuição em geral, para um adequado embasamento das informações sobre a pesquisa.

O objetivo desta etapa foi conhecer a situação atual e desafios do Nordeste com relação a distribuição de água, assim como identificar os métodos mais representativos ao momento de localizar, por exemplo, armazéns em geral. Objetiva-se, também, contextualizar alguns termos que serão mencionados no trabalho.

#### **1.4.2 Definição do problema e coleta de dados**

Foi realizada a coleta de dados segundo o problema definido para os 8 estados a serem analisados, e os dados para cada estado foram levantados segundo as bases de dados fornecidas pelo Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) e pelos projetos anteriormente desenvolvidos pela área de Pesquisa Operacional do departamento de Engenharia de Produção da Universidade de Brasília – UnB.

Além disso, foram obtidas as bases de dados da base viária do software *Diva-GIS* e a malha municipal fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O objetivo principal desta etapa foi realizar o levantamento de informações georreferenciadas necessárias para o tratamento dos dados e solução do problema da pesquisa.

#### **1.4.3 Análise SIG e modelo matemático**

A partir da etapa anterior, foram analisados e tratados os dados, segundo os objetivos propostos, e utilizadas as bases de dados e ferramentas dos *softwares* de *ArcGIS* e *MATLAB* para a localização e otimização das operações, respectivamente. Para a localização das novas ETAs, utilizou-se a ferramenta de *Heat Map* ou *mapas de calor*, os quais identificaram as regiões com

maior ganho, em termos de distância percorrida, e, depois, calcularam-se as distâncias (em metros) desde as novas ETAs adicionadas às Prefeituras Administrativas já existentes.

Uma modelagem matemática foi assim desenvolvida, baseada em programação linear inteira, com suas variáveis e restrições específicas, rodando o modelo no *software* MATLAB.

O objetivo final desta etapa foi utilizar a análise de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para identificar a ótima localização das novas Estações de Tratamento de Água e calcular as distâncias desde os novos pontos até as PAs existentes, conhecido como matriz de origem-destino. Finalmente, após o tratamento de dados, definiu-se os cenários a serem considerados para implementação no MATLAB.

Em particular, os cenários a serem analisados permitem a construção de ETAs em duas localidades, chamadas neste trabalho de localidades 1 e 2. As ETAs a serem construídas terão pequeno, médio e grande porte com capacidades para fornecer, respectivamente, 9, 45 ou 78 milhões de litros de água ao mês. O cenário 1 considerará a construção de uma ETA com capacidade de pequeno, médio ou grande porte na localidade 1. De modo semelhante, o cenário 2 permitirá a construção dessas três ETAs com diferentes capacidades, uma por vez, na localidade 2. Já o cenário 3, permitirá a construção de duas ETAs com a mesma capacidade de pequeno, médio ou grande porte, sendo uma na localidade 1 e outra na localidade 2.

#### **1.4.4 Avaliação dos resultados**

Nesta última etapa da metodologia, foi realizada uma análise dos resultados, assim como uma análise de custo-benefício para cada um dos cenários definidos. Uma discussão dos resultados e as conclusões finais da pesquisa também são apresentadas.

### **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O Capítulo I contextualiza a problemática, aborda o tema principal da dissertação, assim como os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a metodologia da pesquisa. O Capítulo II, apresenta um referencial teórico sobre a distribuição da água no nordeste do Brasil, bem como o contexto geral da situação de seca e estiagem nos 8 estados.

Os modelos de localização de armazéns e o contexto geral da construção de novas estações de água ou plantas de tratamento de água também são apresentadas.

Por sua vez, o Capítulo III aborda os métodos e materiais utilizados na pesquisa, tal como o modelo de otimização desenvolvido, os programas de *software* utilizados e o geoprocessamento dos dados a partir de um banco de dados criado para alcançar os objetivos. O Capítulo IV apresenta as análises de resultados para cada um dos estados, bem como a análise de viabilidade econômica ao aplicar o modelo proposto com a construção de novas Estações de Tratamento de Água. Por fim, o Capítulo V apresenta as conclusões da pesquisa e recomendações para estudos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentados os dados relevantes da distribuição de água no Brasil e características gerais do Nordeste. Como também os problemas mais relevantes encontrados sobre localização de armazéns e de Estações de Tratamento de Água necessários para o desenvolvimento do trabalho.

### **2.1 DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO BRASIL**

O sistema de distribuição de água é um conjunto de tubulações, conexões e bombas hidráulicas com o objetivo de distribuir água desde as estações de água até os domicílios. No entanto, este sistema de abastecimento é ineficiente no Brasil por diferentes razões, que inclui a perda de água, a construção de reservatórios em áreas irregulares e a má distribuição dos recursos hídricos no Brasil (HAMÚ *et al.*, 2006; EOS, 2017).

O Brasil é conhecido por ser um país com boa quantidade de água, cerca de 12% da água doce disponível no mundo, o que o torna a maior potência hídrica do planeta graças a três bacias principais, a Amazônica, o São Francisco e o Paraná. Porém, sua distribuição de água não é equilibrada em razão de algumas regiões terem maiores reservas de água do que outras. Por exemplo, o Norte tem aproximadamente 80% da quantidade de água, mas tal região só contém 5% da população do país (ANA, 2020; JADE, 2018).

Ainda, o Brasil conta com 12 regiões hidrográficas, conhecidas como bacias, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas próximas, com características similares como mostra a figura 3.



**Figura 3:** Regiões Hidrográficas Brasileiras

**Fonte:** ANA, 2005.

A partir da figura acima, observa-se que a região hidrográfica Amazônica contém 80% da água do país, porém, devido à sua pequena densidade demográfica, muito pouco da região hidrográfica é usada. Por outro lado, o semiárido brasileiro contém 24 milhões de habitantes que carecem de água por períodos críticos de prolongadas estiagens, e este problema é antigo, pois o nordeste do Brasil sempre teve uma demanda grande de água. A região é banhada pelas regiões hidrográficas do Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste, Parnaíba, São Francisco e Tocantins.

Apesar disso, aproximadamente 1,46 milhões de habitantes encontravam-se com necessidade de abastecimento de água em 132 cidades do semiárido nordestino no ano de 2016. Dentro dos principais fatores que contribuem para a problemática da localidade, encontram-se os baixos índices e irregularidades de chuvas, a disponibilidade de águas subterrâneas é deficiente, as altas temperaturas durante todo o ano, a forte insolação e altas taxas de evapotranspiração (JADE, 2020).

A região norte do país contém uma grande quantidade de água, numa área de baixa densidade e pouca demanda, e a água desta região provém de três regiões hidrográficas que são do

Tocantins, do Atlântico Norte e da Amazônica. Além disso, a referida região conta com outras fontes hídricas e com um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo (JADE, 2020).

Por sua vez, o Sudeste é banhado pelas regiões hidrográficas do Paraná e Atlântico Sudeste, sendo considerada uma região com elevada concentração urbana de aproximadamente 80 milhões de pessoas, o que necessita de novos mananciais para abastecimento ao consumir as maiores quantidades de água do país. Deste modo, cidades como São Paulo e Rio de Janeiro consomem, de forma respectiva, 188 e 253 litros de água por dia (JADE, 2020).

O Sul é banhado pelas regiões hidrográficas do Atlântico Sul, Uruguai, Paraná e Atlântico Sudeste e seus principais problemas em relação a gestão hídrica são a qualidade da água, o aproveitamento hidroelétrico, as cheias e a irrigação. Em particular, 56% dos municípios desta região são abastecidos somente por mananciais subterrâneos, principalmente pelas fontes aquíferas de Serra Geral, Bauru Caiuá e Guarani (JADE, 2020).

A região Centro-Oeste é abastecida por cinco regiões hidrográficas, que são Tocantins, Paraná, Amazônica, Paraguai e São Francisco, e os principais desafios são o saneamento ambiental, o abastecimento urbano, a qualidade da água e o desmatamento.

A figura 4 evidencia o mencionado anteriormente, segundo a distribuição da água no Brasil em termos de densidade demográfica e concentração dos recursos hídricos do país. Analisando a figura em questão, observa-se a dispersão na distribuição de água em algumas regiões. Deste modo, o Nordeste possui a menor quantidade de água do país, fazendo com que apresente crises de abastecimento de água em diferentes épocas do ano (EOS, 2017). A seguir serão descritos os estados que fazem parte do Nordeste do Brasil e que participam da OCP.

Região	Densidade demografica (Hab/km2)	Concentração dos Recursos Hídricos do país
Norte	4,12	68,5%
Nordeste	34,15	3,3%
Centro-Oeste	8,75	15,7%
Sudeste	86,92	6%
Sul	48,58	6,5%

**Figura 4:** Distribuição de água no Brasil

**Fonte:** Elaboração própria com informações da EOS, 2017.

Por outro lado, o Governo Federal e as empresas privadas, anteriormente, retiravam água dos córregos, rios, regiões alagadiças, lagos, represas ou de águas subterrâneas para uso geral, tendo como prioridade a água para o consumo humano. Atualmente, as fontes responsáveis pelo abastecimento de água são chamadas de mananciais e deve haver uma adequada gestão destas fontes para serem protegidas por leis, tais como a Lei nº 2.314/1954, que considera o saneamento e a proteção ambiental, e a Lei nº 6.229/1975, responsável por promover a qualidade de água por meio de normas e padrões de potabilidade de água para o consumo humano. Além disso, há a Portaria nº 36 GM/MS, da qual surgiu o conceito de Vigilância da Qualidade da Água e o sistema de abastecimento de água para o consumo humano. Este sistema é comandado, principalmente, pela Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental (CGVAM), órgão responsável pelo desenvolvimento e implementação do Programa Nacional de Vigilância na Saúde Ambiental relacionada com a qualidade da água, especificamente para o consumo humano (HAMÚ *et al.*, 2006; FORMAGGIA & GARCIA, 2021; GUZMÁN *et al.*, 2015).

É importante mencionar, ainda, o papel da água na saúde física, mental e social das comunidades, pois sem acesso à água tratada, nem com um adequado saneamento ambiental, ocasiona doenças e uma má qualidade de vida. Nas populações mais vulneráveis, devido ao consumo de água contaminada e falta de acesso ao saneamento ambiental, existem os problemas mais graves de saúde, pois estima-se que mais de 10 milhões de pessoas morrem a cada ano com doenças de ingestão, sendo mais comum em crianças de 5 anos. Especificamente no Brasil,

segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 15 mil pessoas morrem anualmente e outras 350 mil são internadas devido ao deficiente saneamento ambiental do país, já que cerca de 35 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada, sendo a região Norte e Nordeste as mais afetadas. Doenças como a diarreia é a segunda maior causa de mortalidade, especialmente em crianças da mesma faixa etária (HAMÚ *et al.*, 2006; LEMOS, 2020).

## **2.2 NORDESTE BRASILEIRO**

O nordeste brasileiro possui uma área aproximada de 1.561.177,80  $Km^2$ , dos quais 962.857,30  $Km^2$  encontram-se dentro do polígono das secas ou semiárido, o que representa 53% do total do território brasileiro. O Nordeste destaca-se por ser um grande produtor de alimentos e fornecedor de recursos naturais, sendo uma das regiões mais populosas com aproximadamente 53 milhões de habitantes (IBGE, 2011). Além disso, incluem-se entre as principais atividades econômicas e de desenvolvimento desta região brasileira, a prestação de serviços, agricultura e a pecuária (MACÊDO *et al.*, 2018). Entretanto, um dos problemas mais relevantes da região são as secas e os períodos de estiagens. No ano de 2017, o Brasil apresentou grandes secas que afetaram aproximadamente 38 milhões de pessoas, das quais 80% moravam nesta região (ANA, 2018).

O nordeste do país compõe-se por nove estados, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. É uma região que apresenta clima entre bosque e semideserto com áreas úmidas e secas, e como já mencionado, a escassez de água se dá como um dos problemas mais representativos da população (GASPAR, 2009).

A precipitação desta região brasileira, segundo a classificação de *Koppen*, varia entre 150 e 1.350 mm, e sua temperatura média varia entre a mínima de 15°C e a máxima de 40°C (DA SILVA *et al.*, 2017).

### **2.2.1 Alagoas**

O estado de Alagoas (AL) faz divisa com o estado de Pernambuco ao norte, Sergipe ao sul e Bahia a oeste e Oceano Atlântico a leste. Tal estado é uma das menores unidades federativas do

Brasil, com uma área de 27.778 Km<sup>2</sup>, e onde vivem 3.337.357 pessoas, o que resulta em 112,33 habitantes por quilômetro quadrado.

O estado de Alagoas inclui 102 municípios, sendo sua economia movida, principalmente, pelo turismo, extrações e refino do petróleo. Além disso, algumas das suas atividades incluem a agricultura, destacando-se a cana de açúcar, o arroz, o feijão, o milho e a mandioca (PENA, 2020; IBGE, 2020). Devido ao seu clima, o estado tem épocas de secas severas e extremas, o que afeta em mais de 75% o seu território e a sua população (CEMADEN, 2017).

### **2.2.2 Sergipe**

O estado de Sergipe (SE) é o com menor extensão do Brasil, 21.918 Km<sup>2</sup>, e limita-se com os estados da Bahia e de Alagoas. Sua capital é Aracajú, que conta com 75 municípios e uma população de 2.068.017 (IBGE, 2010).

Dentro de suas principais atividades econômicas, encontram-se o cultivo de cana de açúcar seguido de atividades industriais, tais como a exploração de petróleo e o gás natural. Porém, um dos problemas sociais mais relevantes é o saneamento ambiental, porque aproximadamente 40% da população deste estado não possui tal serviço (CAMPOS, 2020).

### **2.2.3 Rio Grande do Norte**

Por sua vez, o Rio Grande do Norte (RN) tem como capital a cidade de Natal e conta com aproximadamente 3 milhões de habitantes. Possui 167 municípios e é banhado pelo Oceano Atlântico ao norte e a leste, faz divisa com o Ceará a oeste e com a Paraíba ao sul. O RN tem uma extensão de 52.800 Km<sup>2</sup>, sendo considerado um estado de tamanho médio (SETUR, 2020).

Este estado é atraente pelas suas praias, tais como Pipa, Genipabu e Maracajá, montanhas e sertão, e também pelos seus recursos naturais como o petróleo e minérios, sendo ainda famoso por ser um grande exportador de frutas e camarão. Finalmente, sua culinária é uma das mais atrativas

para os visitantes, sendo rica em frutos do mar, carne do sol, feijão verde e macaxeira (SETUR, 2020).

#### **2.2.4 Ceará**

O estado do Ceará (CE) tem uma área total de 148.886,308 Km<sup>2</sup>, sua capital é Fortaleza e faz divisa com o estado de Pernambuco ao sul, com o Rio Grande do Norte e a Paraíba ao leste, com o Piauí a oeste. O estado possui 573 quilômetros de praias, sendo considerado o quarto maior estado do Nordeste, e contém 184 municípios e 20 microrregiões administrativas, destacando-se Fortaleza e Cariri (CEARA TRANSPARENTE, 2020).

Este estado conta com 8.452.381 de habitantes e é tido como um dos destinos mais atraentes pelos turistas devido à sua culinária, em que se destacam a lagosta, frutos do mar e o baião de dois (IBGE, 2010). O clima do Ceará é tropical, e dentro dos principais problemas, encontram-se a escassez de água, ao sofrer historicamente por secas, assim como a desigualdade social (CAMPOS, 2020).

#### **2.2.5 Paraíba**

A Paraíba (PB) limita-se com o estado de Rio Grande do Norte ao norte, com o Oceano Atlântico a leste e com os estados de Pernambuco ao sul e Ceará a oeste. Conta com uma área de 56.467,242 Km<sup>2</sup> e com uma população de 4.039.277 de habitantes. Tem como capital a cidade de João Pessoa, possui 223 municípios e um clima tropical úmido (IBGE, 2020).

A economia do estado da Paraíba baseia-se na agricultura, que inclui a cana de açúcar, o abacaxi e a mandioca, na indústria, pecuária e turismo (SÓ GEOGRAFIA, 2020). Em particular, o ponto mais a leste de América do Sul encontra-se neste estado, que é a Ponta do Seixas, situada no Cabo Branco, em João Pessoa.

### **2.2.6 Pernambuco**

O estado de Pernambuco (PE) tem 98.311 Km<sup>2</sup> e é banhado pelo Oceano Atlântico a leste, faz divisa com o estado de Paraíba, Ceará, Alagoas, Bahia e Piauí. Além disso, possui 185 municípios com uma população de 8.796.032 de habitantes e tem como capital a cidade de Recife. Pernambuco possui tanto paisagens como praias belíssimas, como as de Porto de Galinha e Serrambi. Há neste estado uma vegetação diversificada com manguezais e cerrados e uma forte presença de rios e, dentre eles, o mais importante é o Rio São Francisco que contribui com a distribuição de água para todo o estado (GOVERNO DO ESTADO, 2020).

### **2.2.7 Piauí**

O Piauí (PI) possui uma área de 251.755,485 Km<sup>2</sup> e conta com 224 municípios. Faz divisa com o estado de Ceará ao nordeste, com o de Pernambuco a sudeste, ao sul com o da Bahia e ao norte com o Oceano Atlântico (RIBEIRO, 2003; IBGE, 2020).

Este estado tem uma população estimada de 3.281.480 de habitantes. As suas atividades econômicas mais relevantes são a agropecuária, com produtos como milho e soja, o rebanho bovino e a criação de aves, assim como a indústria de alimentos, os minerais não metálicos, além da construção civil. PI apresenta um clima tropical com algumas estações de chuva e secas, e conta com uma vegetação litorânea composta por manguezais, cerrados e palmeiras (RIBERIO, 2003; IBGE, 2020).

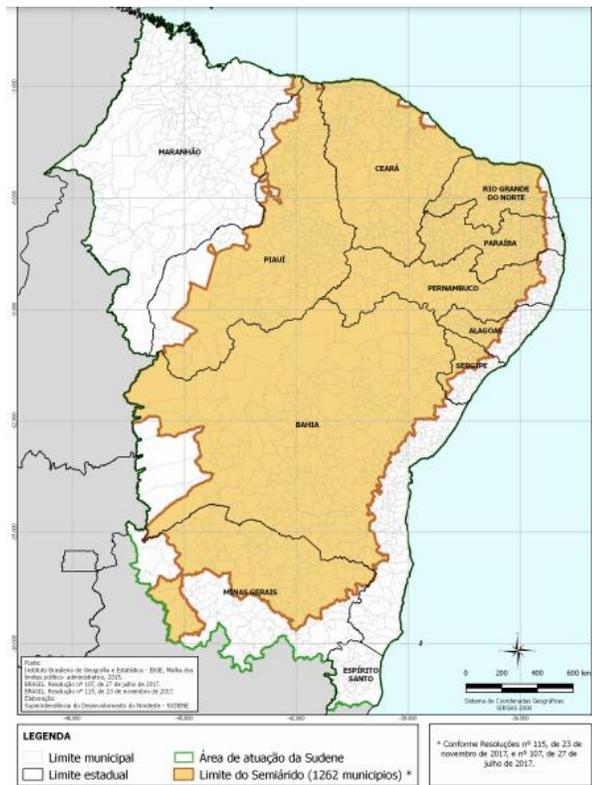
### **2.2.8 Bahia**

Já a Bahia (BA), faz divisa com os estados de Pernambuco e Piauí ao norte, com Goiás e Espírito Santo a sudeste, com Tocantins a oeste, com Minas Gerais ao sul, e com os estados de Sergipe e Alagoas a nordeste. Sua capital é Salvador, conta com uma área territorial de 564.760,427 Km<sup>2</sup> e possui 417 municípios, com uma população estimada de 15 milhões de habitantes (GUITARRARA, 2020; IBGE, 2020).

A região do vale do São Francisco do estado da Bahia é marcada por dois grandes planaltos de grandes altitudes apresentando um clima seco de poucas chuvas, típico do semiárido nordestino. No resto do estado, o clima é tropical com chuvas regulares. A economia da Bahia baseia-se na agropecuária com produtos como a soja, a cana de açúcar, o cacau e a carne bovina, além da indústria com produtos químicos, petroquímicos e agroindustriais, e o turismo com as suas belas praias e centros históricos (GUITARRARA, 2020).

### **2.3. O POLÍGONO DA SECA**

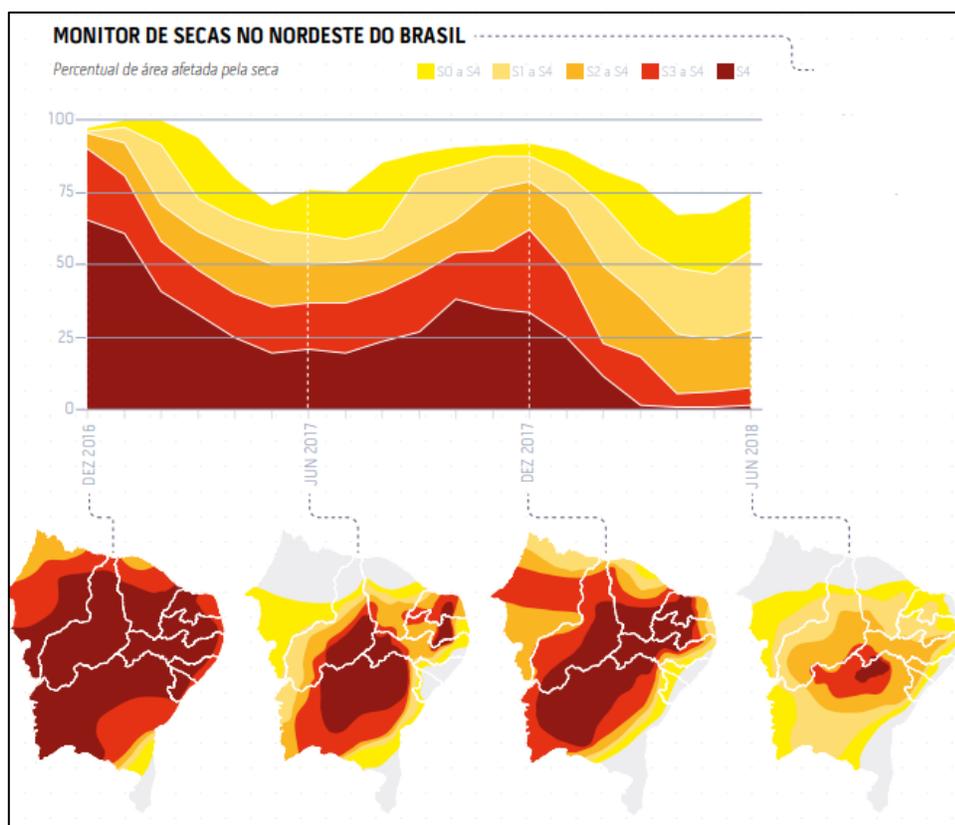
O polígono da seca tem oficialmente uma extensão de 974.150 Km<sup>2</sup> e compreende os estados de Piauí, Ceará, Alagoas, Bahia, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe. O referido polígono é caracterizado pelo clima semiárido, pelas chuvas concentradas entre fevereiro e maio, pela vegetação de caatinga e pela existência de secas, sendo este um dos fatores mais desafiantes para o desenvolvimento humano e econômico da região. A figura 5, mostra a delimitação atual do polígono (SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 2017; BARDINE, 2020; CARMUÇA *et al.*, 2016).



**Figura 5:** Delimitação do Polígono da Seca ou Semiárido

**Fonte:** SUDENE, 2017.

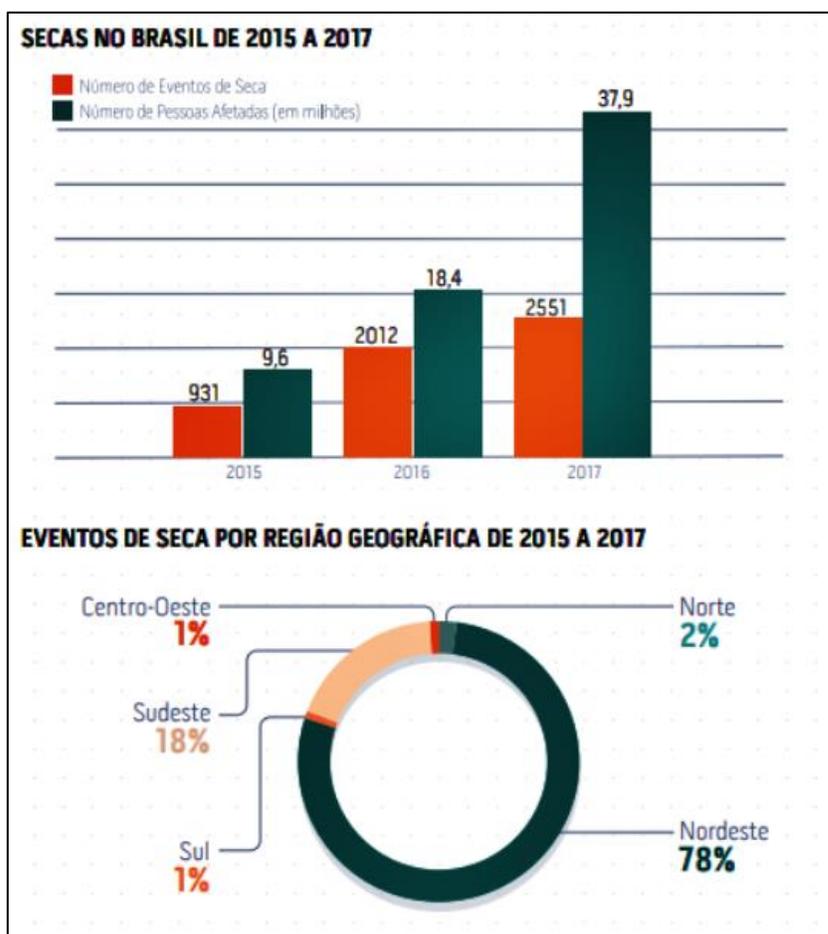
O monitor de secas é um indicador que mostra a severidade, evolução espaço-temporal e tipo de impacto (curto ou longo prazo) de um evento numa área específica. O comportamento da situação da seca no Nordeste é apresentado na figura 6, onde no mês de dezembro dos anos 2016 e 2017 houve um dos maiores agravamentos da seca. Contudo, o ano de 2018 apresentou uma diminuição em eventos críticos na maioria dos estados. Em particular, os estados da Bahia, Ceará e Paraíba apresentaram falta de abastecimento de água e esgotamento dos mananciais, e isso gerou uma situação emergencial que foi controlada por meio da Operação Carro-Pipa (ANA, 2018).



**Figura 6:** Monitoramento de Secas entre os anos de 2016 e 2018

**Fonte:** Informe Anual da ANA 2010

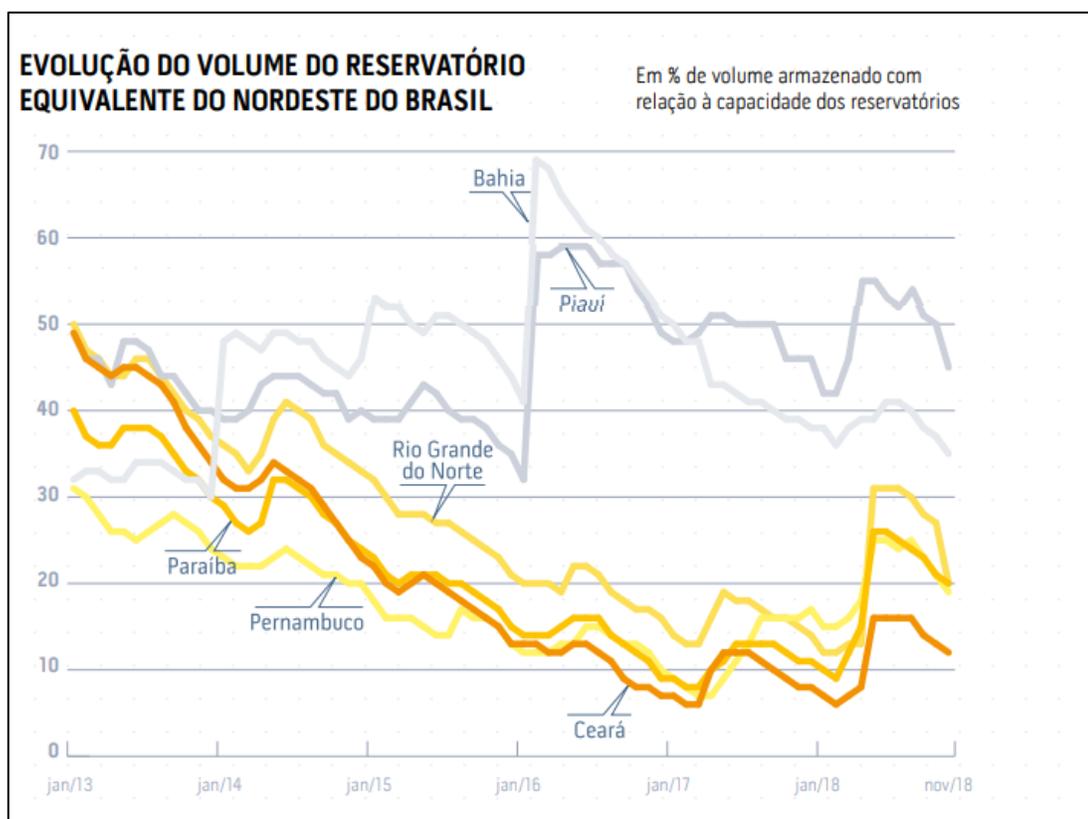
No ano de 2017, o Brasil apresentou secas e estiagens relevantes que afetou, aproximadamente, 39 milhões de pessoas em todo o Brasil, sendo que 80% delas viviam no Nordeste, principalmente na Bahia, no Ceará e em Pernambuco. A figura 7 apresenta o número de afetados e de eventos da seca no Brasil entre os anos de 2015 e 2017. Observa-se que 2017 foi o ano que apresentou mais eventos de seca, e a região do nordeste a mais afetada, com 78% do total de eventos ocorridos.



**Figura 7:** Seca no Brasil entre os anos 2015 e 2017 e número de pessoas afetadas por região geográfica

Fonte: ANA, 2018.

Por sua vez, na figura 8 é possível observar que para o ano de 2017 houve um aumento do volume armazenado nos reservatórios do Nordeste, porém, nesse ano, especificamente, teve um déficit de 0,6% no armazenado do Reservatório Equivalente, que faz as contagens dos volumes armazenados com capacidade acima de 10 milhões de m<sup>3</sup>, para os estados BA, CE, PB, PE, PI e RN (ANA, 2018).



**Figura 8:** Evolução do Volume do Reservatório no nordeste brasileiro

**Fonte:** ANA, 2018.

### 2.3.1 Operação Carro-Pipa

A alocação de água é um processo especial hídrico para abastecimento de água em épocas de estiagens intensas ou secas em momentos de emergência, de acordo com os reservatórios ou sistemas hídricos nas diferentes regiões do Brasil. Entre 2014 e 2017, foram consolidadas 35 alocações de água pela Agência Nacional de Águas (ANA) em parceria com diferentes órgãos estaduais, operadores e usuários de recursos hídricos.

As atividades das OCP's buscam distribuir água potável para as populações rurais e urbanas em situação de emergência ou estado de calamidade pública. A partir de 2012, o programa foi implementado pelo Governo Federal e seu objetivo é o abastecimento de água potável para consumo humano nas regiões do semiárido brasileiro. Esta operação é comandada pelo Ministério

do Desenvolvimento Regional (MDR), representado pela Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC) e pelo Ministério da Defesa/Exército (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2020).

Todos os meses, a Operação Carro-Pipa, em épocas de estiagens e seca, atende aproximadamente 1,7 milhões de pessoas em cerca de 500 municípios do Nordeste, além de haver um gasto de R\$ 7,5 milhões de reais pelo Exército brasileiro devido a participação de 950 militares da Força Terrestre presentes na operação. Segundo Gustavo Canuto, o trabalho e operação que realizam os militares tem sido muito importante e realizada com excelência durante 20 anos, mas ressaltou também que a operação precisa de mudanças e novas iniciativas, tais como ter “mananciais mais próximos, instalações de sistemas de dessalinização e reformulação da operação” (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2019).

A OCP atende a população rural na sua maioria, no ano de 2017 abasteceu 848 municípios, o que resultou em um desembolso de 872 milhões de reais.

A tabela 1, apresenta um resumo da Operação Carro-Pipa, entre os anos de 2015 e 2017, correspondente aos municípios atendidos, ao número de carros-pipa, a população atendida e ao valor gasto em milhões de reais.

**Tabela 1:** Dados da Operação Carro-Pipa do governo Federal

OPERAÇÃO CARRO-PIPA DO GOVERNO FEDERAL			
	2015	2016	2017
Municípios Atendidos	797	812	848
Carros-Pipa em Operação	6.733	6.788	6.683
População Atendida (em milhões)	3,75	3,59	3,25
<b>Valor total Descentralizado (em milhões)</b>	<b>921,38</b>	<b>1.030,73</b>	<b>872,24</b>

**Fonte:** Informe Anual da ANA, 2018.

Para o ano de 2019, a Operação Carro-Pipa atendeu cerca de 2 milhões de pessoas em 657 cidades do Nordeste. Dentro dos municípios afetados e abastecidos pela operação, encontram-se: Bahia (173 municípios), Ceará (122 municípios), Minas Gerais (41 municípios), Paraíba (130 municípios), Pernambuco (82 municípios), Piauí e Rio Grande do Norte (84 municípios cada um) e Sergipe (2 municípios). A operação contou com 4.361 carros-pipa monitorados, porém, o MDR

e o Exército têm trabalhado em melhorias contínuas para a operação, tendo como prioridade sempre as famílias do sertão e o aumento da eficiência da operação.

Este aumento da eficiência envolve tanto a captação da água quanto a sua distribuição, havendo uma economia de R\$ 175,3 milhões ao ano, o que representa uma redução de 22% para o ano de 2019, quando comparado ao ano de 2018 (GOVERNO DO BRASIL, 2019; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

Uma das estratégias sugeridas pelo MDR para desafogar a OCP foi a ampliação e operacionalização do Programa Água Doce (PAD), o qual busca estabelecer uma política pública permanente para o consumo de água potável. O Programa considera dados técnicos, ambientais e sociais para uma melhor gestão do sistema de dessalinização, em especial em zonas rurais do semiárido, pois ao ampliar a instalação destes sistemas, muitas famílias seriam beneficiadas (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019). A figura 9 apresenta alguns exemplos da Operação Carro-Pipa e de seu funcionamento.



**Figura 9:** Exemplo da Operação Carro-Pipa

**Fonte:** Diário do Nordeste e Jornal Tribuna do Norte.

## 2.4. PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO), vem da origem militar desde a II Guerra Mundial e envolve a pesquisa científica das propriedades das operações e a gestão prática da organização para obter

soluções ou conclusões positivas para uma adequada tomada de decisão. Dentro das aplicações da PO, encontram-se os problemas de transporte, dos quais envolvem como transportar mercadorias de forma otimizada em relação com a distribuição de *comodities* desde uma origem (centro de fornecimento) a um destino (lugar de recepção), objetivando minimizar os custos totais de distribuição (HILLIER & LIEBERMAN, 2013).

Segundo Mahto (2012), a pesquisa operacional é a disciplina centrada em aplicação da informação tecnológica para a tomada de decisão que representa o ótimo estudo de alocação de recursos em diferentes aplicações das áreas do conhecimento. O objetivo principal é obter bases racionais para tomar decisões, pretendendo entender e estruturar situações complexas para prever um sistema de comportamento e poder realizar melhorias dentro do sistema. Geralmente, utiliza modelos matemáticos de sistemas organizacionais relacionado com pessoas, máquinas ou procedimentos. Apesar de haver diferentes definições de PO, estas definições são bem semelhantes, pois a Pesquisa Operacional objetiva otimizar ou melhorar os sistemas estudados, modelando-os.

Para a Enciclopédia Britânica, a PO é a aplicação de métodos científicos para a gestão e a administração do sistema militar, governamental, comercial e industrial, sendo utilizada, também, para maximizar a utilidade de recursos e a tomada de decisão entre várias alternativas e selecionar a melhor delas. A PO pode, ainda, ser definida como um método científico que fornece a quantidade básica de tomada de decisão para o departamento executivo das operações que estão sob seu controle (MOARSE & KIMBAL, 1949).

Diferentes problemas têm sido modelados e analisados pela Pesquisa Operacional. Destaca-se, por exemplo, os modelos de problemas de localização de instalações (*facility location problem*) que iniciou com a teoria da localização de Alfred Weber em 1909, que aplicava técnicas baseadas na Pesquisa Operacional, análise estatística, econômica e sistemas científicos, objetivando resolver esses problemas (MELO et al., 2008; TURKOGLU & GENEVOIS, 2019). Portanto, o objetivo é determinar a localização mais eficiente de um conjunto de instalações para minimizar ou maximizar os objetivos, a depender de uma demanda específica e restrições dadas, que incluem, por exemplo, a localização de armazéns da cadeia de suprimentos, a localização de materiais perigosos, a localização de estações ferroviárias, entre outros (HALE & MOBERG, 2003).

A PO, para modelar os problemas, dentro dessas técnicas, pode citar a Programação Linear (PL), a Programação não Linear, a teoria de filas, entre outras. Em particular, a PL envolve maximizar ou minimizar uma função objetiva sujeita a restrições, em que tanto a função objetivo quanto as restrições são funções lineares. Além disso, a Programação Linear tem sido aplicada em vários problemas de transporte.

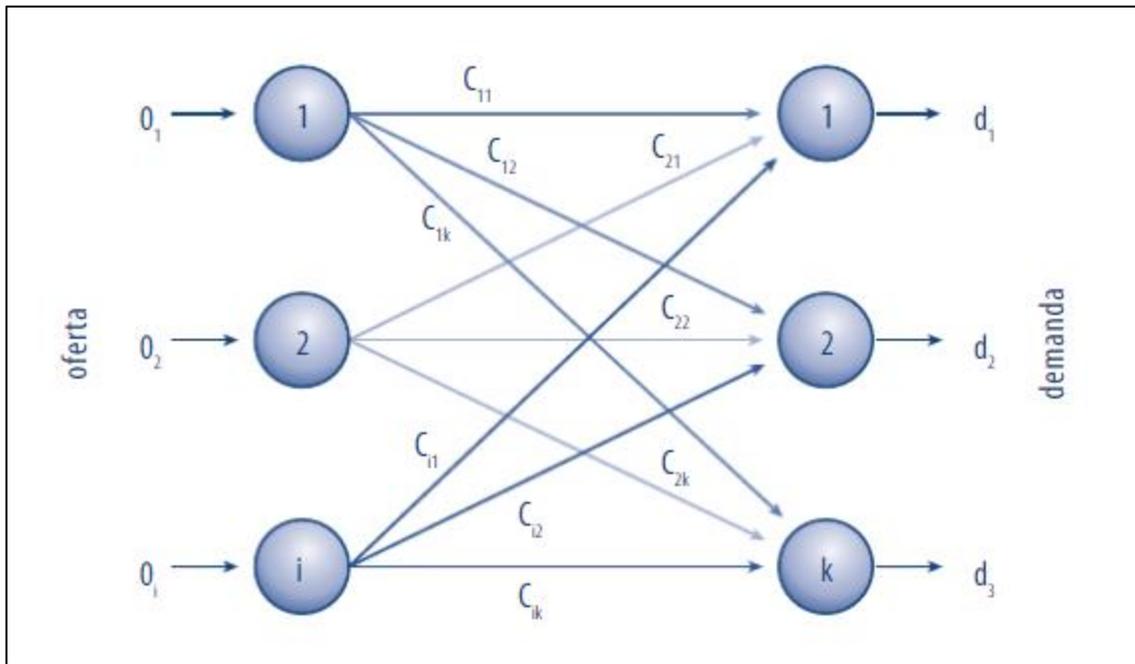
#### **2.4.1. Problema de Transporte**

Dentro das aplicações da Programação Linear, encontram-se os problemas de transporte, os quais envolvem como transportar mercadorias de forma otimizada em relação com a distribuição de *comodities* desde uma origem (centro de fornecimento) a um destino (lugar de recepção), com o objetivo de minimizar os custos totais de distribuição. Ressalta-se que cada origem conta com uma quantidade específica de unidades de oferta a serem distribuídas a cada destino, pois cada destino possui uma certa quantidade de demanda (HILLIER & LIEBERMAN, 2013).

Segundo Moya (1998), este tipo de problema consiste em transportar um bem desde várias origens ou centros de oferta para vários destinos ou centros de demanda, e esses bens podem ser produtos terminados ou matérias-primas, por exemplo. Em geral, a designação das quantidades da mercadoria para cada um dos destinos não é uma restrição, portanto, cada um dos destinos poderia receber tudo, uma parte ou nada de um centro de abastecimento, desde que no final a demanda dos destinos ou centros de consumo sejam satisfeitos.

Para resolver os problemas de transporte, diferentes algoritmos e procedimentos têm sido aplicado como o método simplex de Programação Linear inteira, caso o objetivo e as restrições sejam lineares e as variáveis inteiras. Este tipo de problema objetiva minimizar o custo de transporte total desde as origens aos destinos, ou minimizar a distância total percorrida das origens aos destinos, ou mesmo maximizar a contribuição total da utilidade ao transportar os produtos das origens aos destinos (MOYA, 1998).

A figura 10 mostra a forma geral de um problema de transporte, em que os nós representam as origens ou as fontes que geram a oferta ( $o$ ) e os outros são os destinos que geram a demanda ( $d$ ). Os arcos representam a possível rota entre os nós. Portanto, para este exemplo da figura 10, tem-se  $i$  fontes e  $k$  destinos, e o custo de enviar uma unidade pela rota  $(i, k)$  é representado por  $C_{ik}$ .



**Figura 10:** Exemplo de um problema de transporte.  
**Fonte:** Algoritmos especiais. MOCAYO, L. (2014). *El problema de Transporte*.

#### 2.4.2. Problemas de Roteirização de Veículos

Os problemas de roteirização de veículos ou *vehicle routing problems*, tem como objetivo principal desenhar o custo mínimo de um conjunto de rotas que servem diferentes locais, geograficamente dispersos de acordo com restrições específicas do problema. Desde o ano de 1959, vários trabalhos têm sido publicados sobre o tema, geralmente para análise do gerenciamento da distribuição. No entanto, na última década, foram desenvolvidos avanços tecnológicos significativos na solução de diferentes casos deste tipo de problema, incluindo sistemas de posicionamento global, identificação de rádio frequência e grande capacidade de processamento da informação, por exemplo (TORO *et al.*, 2016).

A classificação dos problemas de roteirização é extensa, embora destacam-se os problemas de localização de rotas que tentam resolver questões de localização de armazéns, definição e designação de rotas para os depósitos ou armazéns, simultaneamente. Diferentes técnicas foram implementadas para resolver os problemas de roteirização, como relaxamento *Lagrangiano* e algoritmos híbridos (Prins *et al.*, 2007; Escobar *et al.*, 2013).

Os problemas de roteirização geralmente estão fundamentados em três fatores, decisões, objetivos e restrições (PARTYKA & HALL, 2000). Com relação às decisões, lidam com a alocação de um grupo de clientes ou locais a visitar, segundo um conjunto de veículos e motoristas respectivos, envolvendo um programa de sequência de visitas do problema estudado; os objetivos e a roteirização, por sua vez, visam proporcionar um alto nível de serviço aos clientes ou público-alvo, mantendo os custos operacionais os mais baixos possíveis (NOVAES, 2007).

É importante nestes problemas considerar algumas restrições, como completar as rotas determinadas com os recursos disponíveis e cumprir com os termos de compromisso adotados com os clientes. Deve-se, ainda, respeitar não apenas os tempos acordados de entrega, mas também as restrições de trânsito, por exemplo, as velocidades máximas, os horários de entrega para carga e descarga, entre outras restrições.

Os problemas de roteirização estão classificados em dois ramos, que incluem a roteirização sem restrições e roteirização com restrições. O primeiro é conhecido desde 1989 como o problema do Caixeiro-Viajante (PCV), que visa determinar o número de locais ou cidades localizadas numa região a serem visitadas, considerando a sequência que minimize o percurso total. Este tipo de adversidade pode ser resolvido por meio de métodos, como o método de construção do roteiro e de melhora do roteiro. Já o segundo, envolve a maioria dos problemas de distribuição com restrições, que podem incluir condições de capacidade e tempo do veículo, sendo geralmente resolvido com a implementação de modelos matemáticos complexos. Entre os métodos mais simples para resolver os problemas de roteirização com restrições, estão os de Varredura e o de Clarke e Wright (NOVAES, 2007).

## **2.5. Teoria da Localização de Instalações**

A Teoria da Localização é uma área analítica atribuída nas suas origens, desde Alfred Weber, em 1909, e, posteriormente, a Pierre de Fermat, Evangelista Torricelli e Battista Cavallieri. Estes pesquisadores, de maneira independente, propuseram os problemas básicos da mediana espacial euclidiana, que se conhece como o problema de Weber (HALE & MOBERG, 2003). As disciplinas e aplicações práticas e acadêmicas são variadas e a teoria tem sido utilizada por geógrafos, planejadores urbanos, varejistas, engenheiros civis e industriais, entre outros.

Segundo Bassou *et al.* (2016), os problemas de localização de armazém, especificamente, surgiram desde os anos 1930 com Weber (1920), que propôs um modelo simples de armazém para minimizar a distância entre o armazém e os diferentes locais de entrega. Os primeiros trabalhos relacionados com os problemas de localização foram realizados por Goldman (1969) e O’Kelly (1987). Em particular, O’Kelly (1987) propôs uma formulação matemática para problemas de localização de  $p$ -mediana, que correspondia a  $n$  demanda de nós seguido da distância entre origem-destino requerido para um centro de distribuição ( $p$ ). O objetivo era minimizar o custo de transporte total (tempo ou distância, por exemplo) para servir um conjunto de fluxos da rede.

Após Weber, outros autores, tais como Martel & Vankatadri (1999), Ozsen *et al.* (2008), realizaram estudos sobre a localização de armazéns considerando economias de escala contínuas. Sharma & Berry (2007), propuseram problemas de localização de armazéns com capacidade simples, mas sem considerar os aspectos de custo mínimo de transporte e de construção do armazém a ser localizado. Michael & Van Henterynck (2004), apresentaram um modelo de algoritmo para localização de armazéns sem capacidade, ao passo que Colson & Dorigo (2004) realizaram um estudo sobre sistemas de apoio à seleção de armazém público com o fim de que os usuários conseguissem explorar uma base de dados com informações de localização de armazéns num determinado país. Posteriormente, outros autores como Tzeng & Chen (1999) propuseram um modelo de abordagem multi-objetiva enquanto Hidaka & Okano (1997) um modelo baseado na simulação chamado de *Ballon Search* para localização de armazém sem capacidade nas economias de escalas. Parvoti (2006), desenvolveu, ainda, um modelo para localização de armazém baseado no desdobramento da função de qualidade (QFD), análise multicritério (AHP) e processo analítico de rede (ANP), que contribuíram para identificar a localização ótima para instalações (SINGH *et al.*, 2018).

Dentro dos modelos mais comuns para os problemas de localização de instalações, encontram-se os modelos determinísticos lineares simples, de estágio único, produto único, sem capacidade e modelos probabilísticos não lineares que incluem diferentes abordagens baseados em programação matemática (KLOSE & DREXL, 2003). Estes problemas têm sido resolvidos com a ajuda de *softwares*, tais como *CPLEX*, *C++*, *ArGis* e *Matlab*, a utilizar diferentes linguagens de programação (TURKOGU & GENEVOIS, 2019). Segundo Melo *et al.* (2008), para obter uma

ótima localização de instalações, é preciso considerar a cadeia logística como um todo, levando em conta as áreas de compras, produção, estoque, distribuição e roteamento.

### **2.5.1. Sistemas de Informação Geográfica na Localização de Instalações**

Segundo Longley *et al.* (2005), o Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um sistema de informação particular de gestão de base de dados que utiliza tanto dados geográficos espaciais quanto informação de atributos não espaciais. Geralmente, o SIG trabalha junto com sistemas de *hardware* e *software* para a tomada de decisão mediante aquisição, gestão, manipulação e análise da informação georreferenciada (CHURCH & MURRAY, 2009).

Desta forma, as funcionalidades do SIG são diversas, porém podem suportar modelos e análises de localização em diferentes áreas e contextos. No entanto, a sua aplicabilidade tem sido geralmente simples sem darem a devida importância que o SIG merece, pois pode ser utilizada para análise e modelagem nas diferentes áreas do conhecimento.

Em geral, o SIG contribuiu na teoria de localização por intermédio do acesso da informação espacial, entre as quais encontram-se a extração de coordenadas de pontos e os atributos associados à localização geográfica. Por exemplo, autores como Bender *et al.* (2002) e Murawski & Church (2009) utilizaram o SIG exportando a informação de atributos e coordenadas do próprio SIG para desenvolver um modelo de localização. O SIG também tem sido aplicado para resolver problemas de otimização baseado na construção de redes para identificar e resolver os problemas de otimização. Recentemente, autores como Murray & Tong (2007) desenvolveram um enfoque baseado no Sistema de Informação Geográfica para identificar um conjunto finito de instalações associado a um problema de cobertura de espaço contínuo para modelá-lo e resolvê-lo com programação inteira.

Dentro dos estudos recentes utilizando SIG para localização de instalações, encontram-se os de Sultana & Kumar (2012) e Delivand *et al.* (2015), que utilizaram uma análise espacial por meio do *ArcGIS* a fim de otimizar a cadeia logística aplicando ferramentas de roteirização, análise de serviço de área, instalação mais próxima, análise de localização e de origem-destino. Especificamente, estes autores utilizaram um modelo da análise de rede para localizar plantas de energia de biomassa aplicando o problema de *p-mediana* para minimizar a distância de transporte

ponderada pela demanda. Por sua vez, Jayarathna *et al.* (2020) aplicaram o SIG para identificar a localização ótima de plantas de energia de biomassa a considerar tanto a rede viária quanto a disponibilidade espacial de biomassa na cidade de Queensland, localizada na Austrália. Não obstante, Durmaz & Bilgen (2020) utilizaram o SIG, especificamente o software *QGIS*, para determinar não apenas o número ideal, mas também a localização e o tamanho das instalações de biogás para uma cadeia de abastecimento de aves na Turquia.

No Brasil, Urban & Isaac (2018) aplicaram o SIG para o gerenciamento de lodo com o método de programação linear na região de Campinas, com o objetivo de minimizar os custos de tratamento, transporte e destino ao selecionar a localização ótima, considerando a produção e recepção de lodo para cada uma das plantas de tratamento.

### **2.5.2. Localização de Armazéns**

Os problemas de localização de armazéns surgiram nos anos 30, em que os modelos simples de armazéns foram desenvolvidos para minimizar as distâncias entre os armazéns e os diferentes locais a serem servidos (BASSOU *et al.*, 2016). Adicionalmente, Teo & Shu (2003) argumentaram que quando aumentam os números de armazéns, os custos de transporte tendem a diminuir, sendo estes chamados de problemas de transporte.

Os estudos sobre localização de instalações remontam-se ao século XX com autores como Scott (1970), Tansel *et al.* (1983) e Narula (1986). Entretanto, desde os anos 2000, teve um aumento importante sobre o tema, em particular, Abdel-Basset *et al.* (2018) os relacionaram com tipos de problemas de atribuição quadrática, suas formulações e aplicações (TURKOGLU & GENEVOIS, 2019).

Estudos têm sido realizados sobre a localização de armazéns com respeito à capacidade e demanda dos mesmos, sem considerar os aspectos de custo mínimo de transporte e de construção. Estudos recentes também têm, ainda, proposto modelos *multi-objetivos*, implantando modelo de localização de armazém baseado, por exemplo, em função de qualidade (QFD), processo analítico de hierarquia (AHP) e processo analítico de rede (ANP) (TZENG & CHEN, 1999; PARTOVI, 2006).

A maioria dos estudos e trabalhos desenvolvidos na área da pesquisa operacional sobre problemas de localização são aplicados ao setor automobilístico, químico, de alimentos, de silvicultura, de *hardware*, militar, de serviços bancários, comércio de *retail*, cuidado da saúde e assistência médica e em contextos industriais. Entretanto, poucos são os estudos que analisam a localização de estações de tratamento de água, apesar de ser um dos temas e recursos mais importantes do mundo (MELO *et al.*, 2008; TURKOGLU & GENEVOIS, 2019).

#### 2.5.2.1. Localização de armazéns de água

Para a localização de Estações de Tratamento de Água (ETAs), devido suas propriedades de demanda e capacidade, alguns dos modelos gerais de localização já mencionados podem ser utilizados (CHOUDHURY *et al.*, 2019). Geralmente, diferentes abordagens têm sido implantadas baseadas na modelagem matemática, tais como decisão multicritério e modelagem *fuzzy* (KLOSE & DREXL, 2003; TURKOGLU & GENEVOIS, 2019). Trabalhos de localização de ETAs também têm levado em consideração o fato de terem que estar próximas a rios ou açudes (MASSOUD *et al.*, 2009; MUGA & MIHELICIC, 2008). Além disso, alguns trabalhos abordam o fato de as ETAs terem que lidar com materiais contaminados (MÜLLER *et al.*, 2014; DE OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Por outro lado, os estudos sobre modelos de localização de água iniciaram no século XX e foram aumentando devido às crises de água mundiais. Os primeiros trabalhos aplicaram modelos de otimização simples para um só objetivo, levando em conta a localização dos recursos hídricos (ROOZBAHANI *et al.*, 2015; CAI *et al.*, 2004). Mais recentemente, foram combinados os modelos de objetivo simples com modelagens *multi-objetiva*, baseados em simulação e otimização para necessidades do meio ambiente, assim como para setores industriais e agrícolas (AZIZIFARD *et al.*, 2020). Ressalta-se que a maioria dos modelos de objetivos simples visam maximizar os benefícios econômicos, entretanto, Ahmadi *et al.* (2012), apresentaram um modelo não-linear para estender os ganhos obtidos a partir dos custos de transporte e de cultivo no problema analisado. Além disso, Li *et al.* (2006) e Tabari & Yazdi (2014) desenvolveram modelos *multi-objetivos* para gerenciar os recursos hídricos, sendo que os primeiros autores consideraram os benefícios econômicos e ambientais para localizar armazéns de água. Já Tabari & Yazdi (2014), criaram um

modelo para minimizar a quantidade de água fornecida entre o Irã e o Iraque, maximizando as entregas de água para o lago de Urmia.

Outros estudos mais recentes consideram modelos para o desenvolvimento sustentável. Anghileri *et al.* (2013) desenvolveram um modelo para a alocação de água a fim de satisfazer a demanda da mesma nos setores de agricultura e instalações das usinas; Oxley *et al.* (2016) apresentaram um modelo linear para alocação de recursos hídricos em 12 períodos para maximizar o lucro da alocação de água considerando diferentes cenários de tempo. Devido ao incremento na poluição, autores como Zhao *et al.* (2009) realizaram modelos para a localização de Estações de Tratamento de Águas residuais aplicando modelagens matemática *multi-critério* e análise de processo hierárquico, determinando as localizações destas estações utilizando o SIG.

Quanto ao modelo desenvolvido, não foi encontrado na literatura nenhum aplicado à localização ETA, em que a decisão a ser tomada é aquela que minimize as distâncias dos reservatórios para as comunidades. E não menos importante, cada Prefeitura Administrativa, lugar que recebe água, deve ser atendida por uma única ETA, sendo outra particularidade deste trabalho.

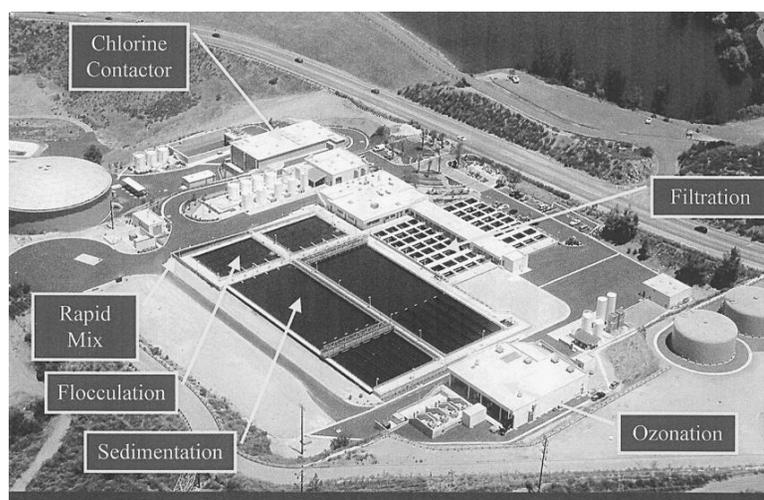
## **2.6. ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (PLANTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA)**

Segundo Mcgivney & Kawamura (2008), a demanda de água no século XXI exigiu novos esquemas de plantas de tratamento de água que sejam eficazes, confiáveis e econômicas para construir e operar. Além disso, estas plantas devem ser amigáveis com o meio ambiente, já que em um futuro, o tratamento de água vai consumir mais energia que os processos atuais (processos de tratamento de água convencionais). A fim de atingir essa grande demanda, será necessário obter processos mais rigorosos em relação à qualidade da água, gerando impactos econômicos e ambientais e grandes desafios para a construção de plantas de tratamento de água para o consumo humano.

A água bruta que é fornecida pelos mananciais, geralmente tem uma cor escura, com um gosto ruim ou partículas, e a converte em água não potável. Portanto, é necessário que seu destino seja uma Estação de Tratamento de Água para ser transformada em água potável, após vários processos, tais como remoção do material grosseiro, clarificação, filtragem e desinfecção que

removem os microrganismos causadores de doenças. Depois desse processo, a água é armazenada em reservatórios e distribuída usando as redes de distribuição definidas (HAMÚ *et al.*, 2006).

Uma planta de tratamento de água convencional compreende diferentes etapas, tais como coagulação com mistura rápida, floculação, sedimentação, filtração média granular e, finalmente, desinfecção por cloro. Este tipo de processo é padronizado por meio do Departamento de Serviços da Saúde (DHS) para tratamento municipal de água, como pode observar na figura 11.



**Figura 11:** Processo de uma planta de tratamento de água convencional

**Fonte:** *Cost Estimating Manual for water Treatment Facilities*, W. McGivney and S.Kawamura, 2008.

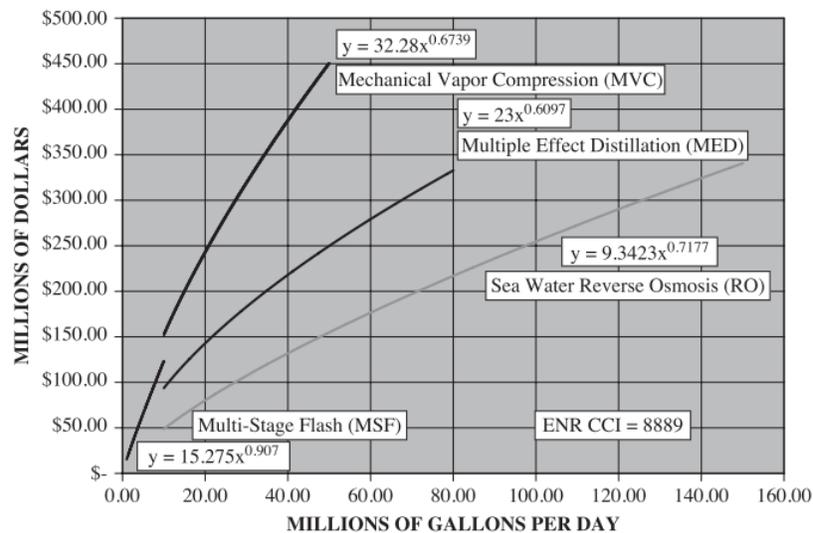
Para construir uma planta de tratamento de água, é necessário, inicialmente, a estimativa dos custos de construção das instalações, considerando um orçamento razoável durante o trabalho do *pré-design* para poder dar direção e integridade ao processo de desenho do projeto, já que cada um dos processos de construção da planta têm diferentes custos. Entende-se como custos de construção a soma de todos os itens do contrato adquirido, assim como o progresso do trabalho e a finalização do projeto, incluindo os custos de mudanças do mesmo (McGIVNEY & KAWAMURA, 2008).

Para uma planta de tratamento de dessalinização de água, se devem considerar quatro estratégias principais:

- Osmose Reversa (RO)

- Multi-estágio Flash (MSF)
- Compressão mecânica de vapor (MVC)
- Destilação de efeitos múltiplos (MED)

Na figura 12, há os custos de construção para cada uma das estratégias anteriormente mencionadas para a construção de plantas de tratamento de água de mar, em que a melhor alternativa, considerando o custo-benefício, seria a estratégia OR, dentro de uma faixa entre 10 MGD e 150 MDG (*Millions of Gallons per Day*) de produção de água a um custo razoável.



**Figura 12:** Exemplos de custos de construção de plantas de tratamento de água de mar avançadas

**Fonte:** *Cost Estimating Manual for water Treatment Facilities*, W. McGivney and S. Kawamura, 2008.

Para a construção de uma planta de tratamento, é importante considerar diferentes elementos, tais como as taxas de juros, os custos administrativos e legais, os custos de engenharia do projeto, o uso do solo e as considerações políticas e locais, no momento de tomadas de decisão, cujos custos devem ser revisados e verificados de maneira constante (MCGIVNEY & KAWAMURA, 2008). As implementações tecnológicas são necessárias e muito importantes para a construção de plantas de tratamento avançadas e para o abastecimento adequado de água em todo o mundo.

Por outro lado, os custos aproximados de construção de uma planta de tratamento de água convencional (em dólares) para uma capacidade de 100 MGD (*Millions Of Gallons per Day*) são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2:** Custos aproximados de construção de uma planta de tratamento de água para uma capacidade de 100 MGD

<b>ITEM</b>	<b>CUSTO (US DÓLAR)</b>
Custo de processo	
Subtotal	\$ 74.588.312
Metros de tubo	\$ 7.458.831
Paisagem local	\$ 3.729.416
Instalação Elétrica e Controle (20%)	\$ 14.917.662
<b>Custo Total de construção</b>	<b>\$ 100.694.222</b>
Custos de Engenharia, Legais, Administrativos (35%)	\$ 35.242.978
<b>CUSTO TOTAL PROJETO</b>	<b>\$ 135.937.199</b>

**Fonte:** *Cost Estimating Manual for water Treatment Facilities*, W. McGivney and S. Kawamura, 2008.

Os custos mencionados na tabela 2 são uma guia de custos padronizados pela AACEi (*Association for the Advancement of Cost Engineering*), que forneceu relatórios em inglês em unidades incluindo em galões e toneladas. Os dados fornecidos foram tomados de plantas e processos de construção de plantas de tratamento de água utilizados desde o ano de 1970. Os custos de construção são padronizados e normalizados aos índices de custos publicados mensalmente pela *Engineering News Record*, com o Índice de Custo de Construção (CCI).

Além disso, é importante ressaltar que cada um dos custos deve ser multiplicado pelo número de módulos para cada processo. Por último, categorizados segundo a porcentagem designada para os custos operacionais de engenharia, administrativos e legais (35% do custo de construção) e somados ao total de custos de construção de uma planta de tratamento de água (MCGIVNEY & KAWAMURA, 2008).

### 3. MÉTODOS E MATERIAIS

Neste capítulo, serão apresentadas a coleta de dados, assim como o tratamento e geoprocessamento dos dados para cada um dos 8 estados do Nordeste.

#### 3.1 GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS

O geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação ou bases de dados geográficas, e tem influenciado de maneira crescente as áreas da cartografia, transportes, comunicações, energia, planejamento urbano e regional, entre outras áreas. A técnica de geoprocessamento de dados é chamada, também, de Sistemas de Informação Geográfica, em que sua função é integrar dados de diversas fontes para criar dados georreferenciados (RIBEIRO, 2020). Os paradigmas dos quatro universos são utilizados por esta técnica:

- a) O universo do mundo real: inclui as entidades da realidade modelada no sistema.
- b) O universo matemático (conceitual): inclui uma definição matemática (forma) das entidades a serem representadas.
- c) O universo de representação: diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas e alfanuméricas no computador.
- d) O universo de implementação: estruturas de dados e algoritmos são escolhidos em consideração com o desempenho e capacidades do equipamento.

Ainda, o geoprocessamento realiza coleta informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas, entre outros. Inclui, também, um conjunto de geotecnologias, tais como Sensoriamento Remoto e os Sistemas de Posicionamento Global (GPS) (DA SILVA, 2009).

No geoprocessamento, são tratados volumes de dados robustos, precisando de técnicas computacionais e atributos geotopológicos para fins de análises, sínteses e utilização imediata da informação. Os tipos de dados mais utilizados são os dados de vetores, imagens ou *rasters*, matrizes e banco de dados. Dentro dos programas computacionais principais, encontram-se o *QGIS* e o *ArcGIS*.

Para o presente trabalho, foi utilizado o software de *ArcGIS* para o geoprocessamento do banco de dados, devido sua adequada facilidade e funcionalidade.

### **3.2 BANCO DE DADOS**

O banco de dados aplicado no geoprocessamento, em geral, corresponde a dados espaciais ou geográficos que estão vinculados ao entorno espacial. Estes dados descrevem qualitativa e quantitativamente uma entidade geográfica ou atributos não espaciais, sendo os atributos espaciais que determinam a localização e a representação do objeto geográfico por intermédio de geometria ou um sistema de coordenadas.

Um banco de dados pode ser convencional ou geográfico, e o primeiro contém dados com atributos alfanuméricos que descrevem as suas características (atributos convencionais), e o segundo descreve a sua forma, indicando a sua localização na terra e a sua validade.

O banco de dados permite tornar as consultas mais eficientes, além de realizar a chamada modelagem de dados tradicional (modelo entidade-relacionamento). Uma entidade é um objeto real, no qual se deseja fazer as análises e contém informações específicas, mapeadas como classes, classificadas como composição ou agregação. Por último, o banco de dados permite realizar modelagem de dados espaciais que agregam informação espacial (RIBEIRO, 2020).

Para este trabalho, foi necessário criar um banco de dados robusto, a partir de três diferentes fontes para tratamento e processamento da informação relevante da seguinte forma:

- Base de dados do CENAD;
- Malha municipal do IGBE;
- Malha viária do DIVA-GIS.

#### **3.2.1. Base de dados do CENAD**

O Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) foi criado em 2005, com o objetivo de gerenciar, com agilidade, ações estratégicas de preparação e resposta a desastres em território nacional, e se for necessário, no âmbito internacional também. Vale ressaltar, que o

Centro é coordenado pela SEDEC, a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil do Ministério do Desenvolvimento Regional.

Dentro de suas funções, encontram-se a gestão de crises e monitoramento das operações 24 horas por dia, capacitados para responder a desastres, mobilização para atendimentos às vítimas, assim como ao monitoramento constante de informações sobre possíveis desastres em áreas de risco, com o objetivo de reduzir os impactos (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019). A base de dados fornecida pelo CENAD corresponde ao mês de outubro de 2017 da OCP, com as seguintes informações:

- a) Atual: corresponde aos dados das Prefeituras Administrativas (PAs) e dos Mananciais (MAN) que os servem. As PAs são os pontos de recebimento da água e os MANs correspondem aos pontos de coleta da água.
- b) Demanda: descreve a demanda de cada PA, em número de entregas do carro-pipa.
- c) Oferta: refere-se à capacidade de cada MAN em número de entregas.
- d) Distâncias: contém uma matriz de distâncias, em metros, desde os MANs até cada PA.
- e) Coordenadas Geográficas: contém as coordenadas geográficas X e Y para referenciar a localização dos pontos de cada PA.

A tabela 3, mostra um exemplo da base de dados fornecida pelo CENAD. Tais dados foram fornecidos para os 8 estados da pesquisa, referenciados com códigos especificados pela empresa.

**Tabela 3:** Exemplos das matrizes fornecidas pelo CENAD

Atual		Demanda		Oferta		Distâncias				
PA	MAN	PA	Entregas	MAN	Entregas	PA	201	2595	2597	2633
10267	2597	10267	2	201	320	10267	167724	186217	16183	103189
10272	2597	10272	3	2595	1171	10272	151860	170352	20832	87324
10275	2597	10275	2	2597	1501	10275	150132	168624	22560	85596

**Fonte:** Elaboração própria com informações do CENAD.

Cabe ressaltar que para cada um dos estados, o número de PAs e de MANs varia de acordo com a oferta e demanda da OCP estabelecida e são resumidos na tabela 4.

**Tabela 4:** Número de PAs e MAN dos 8 estados da pesquisa

ESTADO	PAs	MAN
<b>ALAGOAS</b>	993	4
<b>SERGIPE</b>	1.091	8
<b>PARAÍBA</b>	9.695	22
<b>CEARÁ</b>	4.566	36
<b>PERNAMBUCO</b>	10.160	73
<b>PIAUI</b>	5.672	61
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>	6.496	37
<b>BAHIA</b>	8.587	142

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados do CENAD.

### *3.2.1.1 Sistema de Coordenadas Geográficas*

Para localizar um ponto na Terra, foi necessário criar um sistema de linhas imaginárias chamadas de Sistema de Coordenadas Geográficas. A coordenada geográfica de determinado ponto é dada pela interseção de um meridiano e um paralelo<sup>1</sup>.

Os paralelos indicam a distância em graus desde a linha do Equador até o paralelo de um determinado lugar e os valores da latitude variam de 0° a 90° e deve-se indicar se é Hemisfério Sul (S) ou Hemisfério Norte (N). A longitude, por sua vez, indica a distância em graus, entre o meridiano origem ao meridiano local e, universalmente, adotou-se o meridiano de origem como o Meridiano de Greenwich (IBGE, 2021).

Dentro do sistema de coordenadas geográficas, encontram-se as projeções cilíndricas, cônicas e planas. Para o presente trabalho, foram utilizadas o sistema de coordenadas planas.

---

<sup>1</sup> Os meridianos são linhas imaginárias no sentido Norte-Sul desde um ponto a outro, e os paralelos são linhas imaginárias no sentido Leste-Oeste. Tanto os meridianos quanto os paralelos são chamados, comumente, de longitude e latitude, respectivamente (IBGE, 2021).

### 3.2.1.2 Sistema de Coordenadas Planas

O sistema de coordenadas planas é um sistema bidimensional que tem o eixo  $X$  e o eixo  $Y$ , e podem ser utilizados em metros ou quilômetros (GEOMETRÍA ANALÍTICA, 2021). Este sistema de coordenadas utiliza a projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) e ele está dividido em 69 fusos de 6 graus de amplitude em longitude na direção Leste-Oeste. Este sistema tem a sua origem na linha do Equador em uma determinada longitude.

As zonas UTM estão enumeradas desde 1 a 60, onde começa na linha internacional de data (Zona 1 aos 180° Oeste de longitude) e continua para o Leste de volta à linha internacional de data (Zona 1 aos 180° Leste de longitude) (QGIS, 2021). Para a pesquisa, foram utilizadas as coordenadas geográficas UTM em formato de  $X$  e  $Y$ , já que foram as coordenadas fornecidas pela base de dados do CENAD para cada uma das Prefeituras Administrativas (PAs) e dos mananciais (MAN).

Posteriormente, as coordenadas geográficas  $X$  e  $Y$  foram plotadas no mapa, para cada um dos estados da pesquisa. A tabela 5, apresenta um exemplo dos arquivos fornecidos pelo CENAD com a informação do código da PA, o nome e as coordenadas  $X$  e  $Y$ .

**Tabela 5:** Exemplo de coordenadas geográficas  $X$  e  $Y$  para localização das PAs

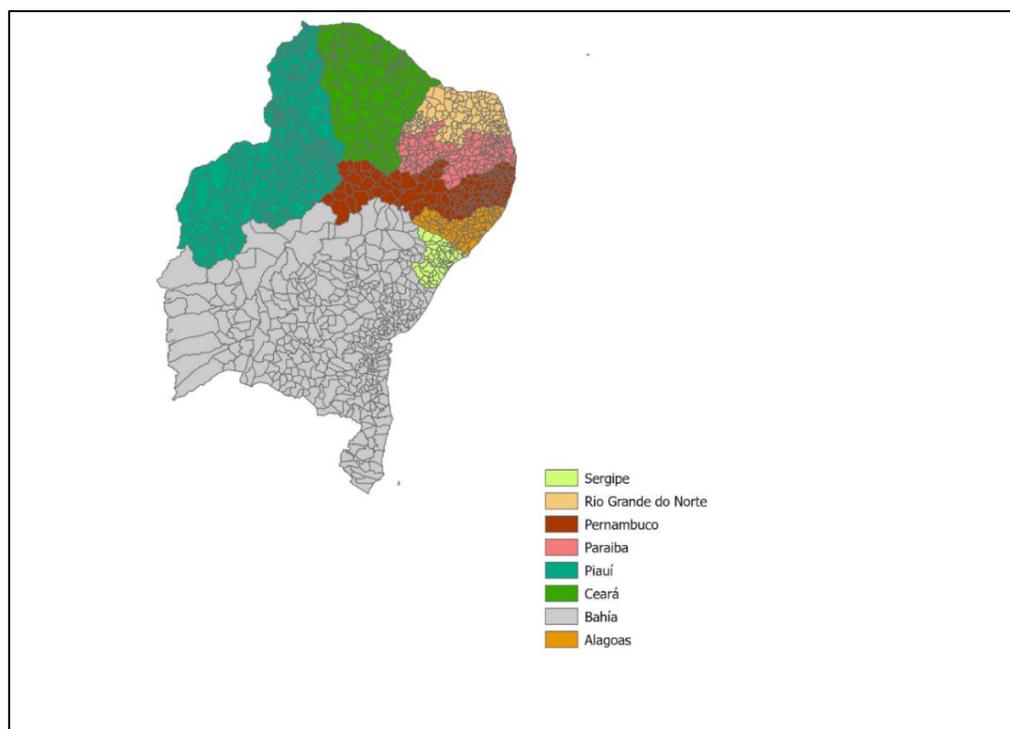
PA	NOME	Y	X
10267	ADSON DE BRITO DIAS	-9.245425	-37.91881
10272	REGINALDO RODRIGUES DA SILVA	-9.308678	-37.83608
10275	JANICLEIDE DOS SANTOS	-9.288826	-37.82414
10277	MARIA JERONIMA DA SILVA	-9.313353	-37.82231
10279	GILMARA NÓIA DA SILVA GOES	-9.300098	-37.80156
10281	DOMÍCIO BISPO DOS SANTOS	-9.286678	-37.78035
10283	QUITÉRIA DA SILVA	-9.282406	-37.77533
10286	MARIA DE LOURDES SÁ MARINHEIRO	-9.282354	-37.94801
10288	MARIA SOLANGE DA SILVA NASCIMENTO	-9.305967	-37.83121
10291	MARIA JOSÉ DE SOUZA BEZERRA	-9.251676	-37.7994
10294	NOEMIA GONÇALVES DA SILVA	-9.325716	-37.7894
10297	MARIA CIDÁLIA BARROS DE OLIVEIRA	-9.3053	-37.97464
10300	MARIA DAS GRAÇAS DOS SANTOS	-9.147973	-37.93891

Fonte: CENAD, 2017.

### 3.2.2. Malha Municipal do IBGE

O IBGE foi criado em 1936, sendo uma entidade administrativa pública federal vinculada ao Ministério da Economia. A principal função do IBGE é fornecer dados e informações do país que atendam as necessidades de diferentes segmentos da sociedade civil, como também de órgãos federais, estaduais e municipais. Dentro de suas funções, encontram-se principalmente a de produção e análise de informações estatísticas, coordenação e consolidação das informações estatísticas, produção e análise de informações geográficas, estruturação e implantação de um sistema de informações ambientais, documentação e disseminação de informações e coordenação dos sistemas estatísticos e cartográfico nacionais (IBGE, 2021).

O IBGE está composto por 27 unidades estaduais, 27 supervisões de disseminação de informações e 564 agências de coleta de dados nos principais municípios. Da base de dados geográfica do IBGE, foi utilizada a malha municipal para cada um dos estados com as divisões regionais, como mostra a figura 13.



**Figura 13:** Malha Municipal dos estados da pesquisa no nordeste brasileiro.

**Fonte:** Elaboração própria a partir da base de dados do IBGE.

### 3.3.3. Malha Viária

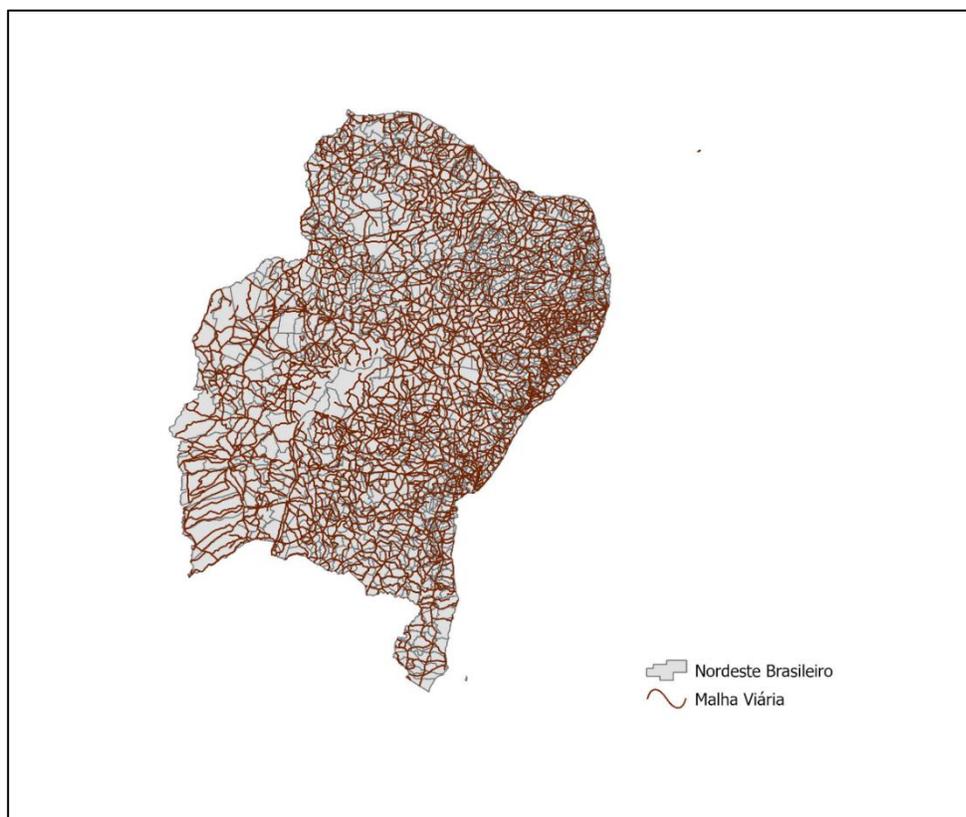
A malha viária do Brasil é caracterizada pelo conjunto de vias classificadas e hierarquizadas de acordo com a sua função específica e com o padrão urbanístico. Sua principal função é da mobilização dos modais de transporte rodoviário e de tráfego veicular. Segundo a agência CNT, é pavimentada apenas 12,4% da malha rodoviária no Brasil, sendo na sua maioria de pista simples (92,7%) (FERREIRA, 2019).

A malha rodoviária brasileira move mais de 60% das mercadorias e mais do 90% dos passageiros. Porém, os investimentos e manutenção têm diminuído bastante durante os últimos anos, o que dificultou a gestão do transporte rodoviário no país, além dos problemas da insegurança das estradas que obrigam a investir em seguros de cargas que são geralmente custosos para os empresários logísticos (CNT, 2018; FERRERIA, 2019).

Por outro lado, as vias que estão em melhor estado são as administradas pela iniciativa privada que cobram pedágios. Deve-se, ainda, mencionar que a malha federal pavimentada é classificada como regular, ruim ou péssima e com uma sinalização deficiente (CNT, 2018).

Para a pesquisa foi utilizada a malha viária fornecida pelo *software Diva-GIS*, sendo este um programa de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) gratuito. O *Diva-Gis* é utilizado para a análise de dados geográficos e obtenção de mapas do mundo ou de uma área específica, tais como os limites dos estados, rios, imagens de satélite ou localização de locais onde uma espécie animal foi observada. Além disso, fornece informação gratuita de todo o mundo para a sua análise ou utilização em outros programas (DIVA-GIS, 2021).

Neste caso, os recursos utilizados foram os de dados espaciais. Para a pesquisa, foi utilizada a malha viária fornecida pelo *software Diva-GIS*, gratuitos e correspondentes às rodovias do Brasil e, posteriormente, selecionadas somente as rodovias dos 8 estados da pesquisa, como observa-se na figura 14.



**Figura 14:** Malha viária do Nordeste

**Fonte:** Elaboração própria com as bases de dados do DIVA-GIS.

### 3.3. TRATAMENTO DOS DADOS

Após obter o banco de dados, foi necessário o tratamento dos dados para observar se faltava alguma coordenada ou distância entre as PAs e mananciais, por exemplo. Durante esta análise, aplicou-se os dados e ferramentas do CENAD, IBGE e *Diva-Gis*.

Ressalta-se que a base de dados de “resultado” foi fornecida pelo CENAD em parceria com o Laboratório de Pesquisa Operacional do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade de Brasília. Este primeiro trabalho realizou a otimização de quais mananciais deveriam suprir quais PAs, mas sem as novas variáveis e cenários analisados nesta pesquisa, ao inserir novas ETAs.

**Tabela 6:** Resumo por estado da distância atual em metros, a distância otimizada e a economia (%)

ESTADO	CUSTO ATUAL (m)	CUSTO OTIMIZADO (m)	ECONOMIA (%)
ALAGOAS	288.999	276.693	4,26%
SERGIPE	96.647	93.392	3,37%
CEARÁ	1.085.601	1.018.318	6,20%
BAHIA	1.055.000	918.000	12,99%
PIAUI	1.192.298	1.098.078	7,90%
RIO GRANDE DO NORTE	1.038.331	1.003.252	3,38%
PARAIBA	1.969.359	1.820.794	7,54%
PERNAMBUCO	2.275.627	2.112.529	7,17%

**Fonte:** Elaboração própria

A tabela 6 mostra o resumo de cada um dos estados com a distância atual total e a distância total otimizada em metros, e a porcentagem de ganho ou economia ao comparar a distância atual com a distância otimizada. Portanto, foi necessário utilizar as bases de dados de “atual”, “resultado” e “distâncias” para cada um dos estados analisados do Nordeste, a fim de obter a porcentagem de ganho em termos de distância percorrida desde cada um dos MANs às PAs já existentes. Aplicou-se, então, a seguinte fórmula:

$$Ganho (\%) = \frac{D_i - D_o}{D_i} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$D_i$  = distância atual, que é a distância entre o MAN que estava originalmente fornecendo água para a PA.

$D_o$  = distância otimizada, entre o novo MAN obtido pela otimização para a PA.

O cálculo do ganho foi adicionado a uma nova coluna no arquivo de coordenadas geográficas para depois plotar os dados, sendo este o arquivo principal para o geoprocessamento no *ArcGIS*.

### 3.5 GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS NO ARCGIS

*ArcGIS* é um programa de representação cartográfica e análises que disponibilizam ferramentas para o mapeio espacial. Este programa oferece, ainda, um conjunto de capacidades

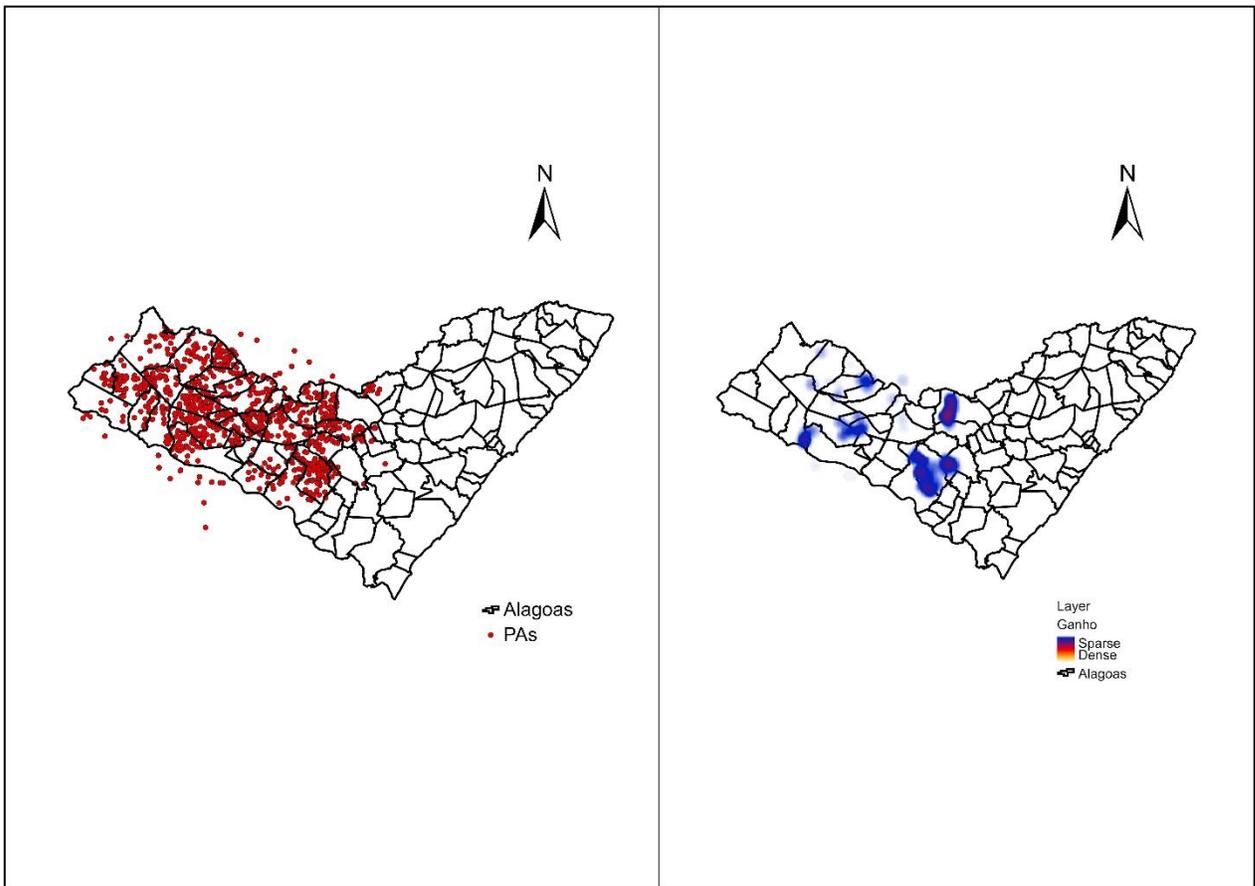
para aplicar informações analíticas baseadas na localização, assim como visualizar e analisar os dados (ESRI, 2021). No *ArcGIS*, é possível realizar e compartilhar mapas, aplicativos, colaborar, analisar dados e trabalhar com bases de dados (ARCGIS, 2021).

Adicionalmente, o *ArcGIS* tem ferramentas para realizar análise espacial, gestão das imagens e sensoriamento remoto, detectar padrões para melhorar a tomada de decisão, monitorar o SIG em tempo real, em 3D realizando, também, a recompilação de dados (ESRI, 2021).

Nesta etapa do trabalho, quando aplicando o *ArcGis*, a base de dados de coordenadas geográficas foi plotada por meio da ferramenta de *DataXY* com o sistema de referência geocêntrico SIRGAS 2000 para cada um dos estados analisados. Os dados usados neste trabalho, tanto da demanda das PAs quanto da disponibilidade das ETAs, foram para o mês de outubro de 2017 para todos os estados.

### **3.5.1. Geoprocessamento para Alagoas**

As PAs foram plotadas diretamente no *ArcGIS* para depois realizar um mapa de calor ou densidade com a ajuda da ferramenta de *Heat Map*, identificando os pontos de maior ganho em termos de distância percorrida, como observa-se na figura 15.



**Figura 15:** PAs localizadas e mapa de calor com as zonas de maior ganho para o estado de Alagoas

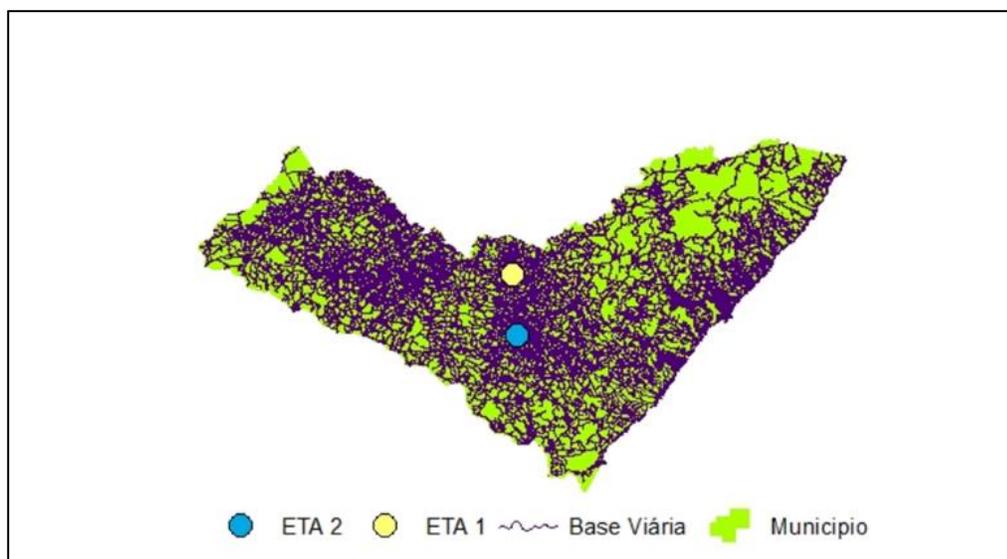
**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Neste caso, foram plotados 993 PAs identificando as zonas de maior ganho representadas com a cor vermelha mais escura, onde serão os pontos de localização das novas ETAs. Estes pontos foram os escolhidos porque sem perdas de generalidades, observa-se que são localizações que estão recebendo água de mananciais localizados mais distantes do que aqueles propostos pela otimização. Portanto, eles são ótimos candidatos para receberem novas ETAs, uma vez que assim estas novas ETAs serão, muito provavelmente, as escolhidas para fornecer água para estas localizações.

Além disso, quando observa-se os mapas de calor, pode haver várias áreas escuras que serão candidatas para a construção das novas ETAs. A fim de limitar o escopo do trabalho, permitindo a sua conclusão em tempo hábil, limitou-se a considerar sempre duas áreas para a construção das novas ETAs. Entretanto, deve-se mencionar que quando analisados os resultados obtidos, não

apenas dos mapas de calor, mas também do número de áreas escuras, a escolha de duas áreas para as novas ETAs já resolve de modo bem satisfatório os objetivos propostos deste trabalho. A análise aqui descrita para a localização das novas ETAs é estendida para todos os outros estados deste trabalho.

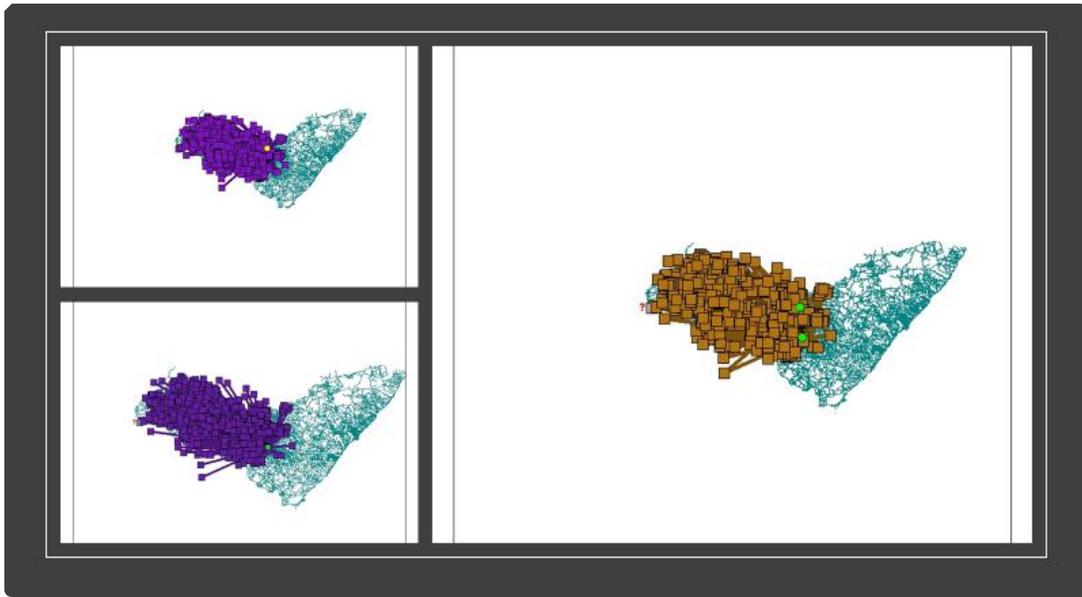
Na figura 16, observa-se os dois pontos com maior ganho em termos de distância percorrida correspondentes a ETA 1 (código de AL-10407) na cor amarela e ETA 2 (código AL-161348) com a cor azul.



**Figura 16:** Mapa com a localização das novas ETAs

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

A partir destas duas novas ETAs mencionadas, foi construída uma matriz de origem-destino utilizando a ferramenta de *Network Analyst* do *ArcGIS*, assim como a ferramenta de *Origin-destination Cost Matrix* para obter o menor custo em termos de distância percorrida desde a ETA 1, ETA 2 e ETA 1 junto com a ETA 2 até as PAs já existentes, como mostra a figura 17 a seguir. No total, para o estado de Alagoas, há 993 PAs.

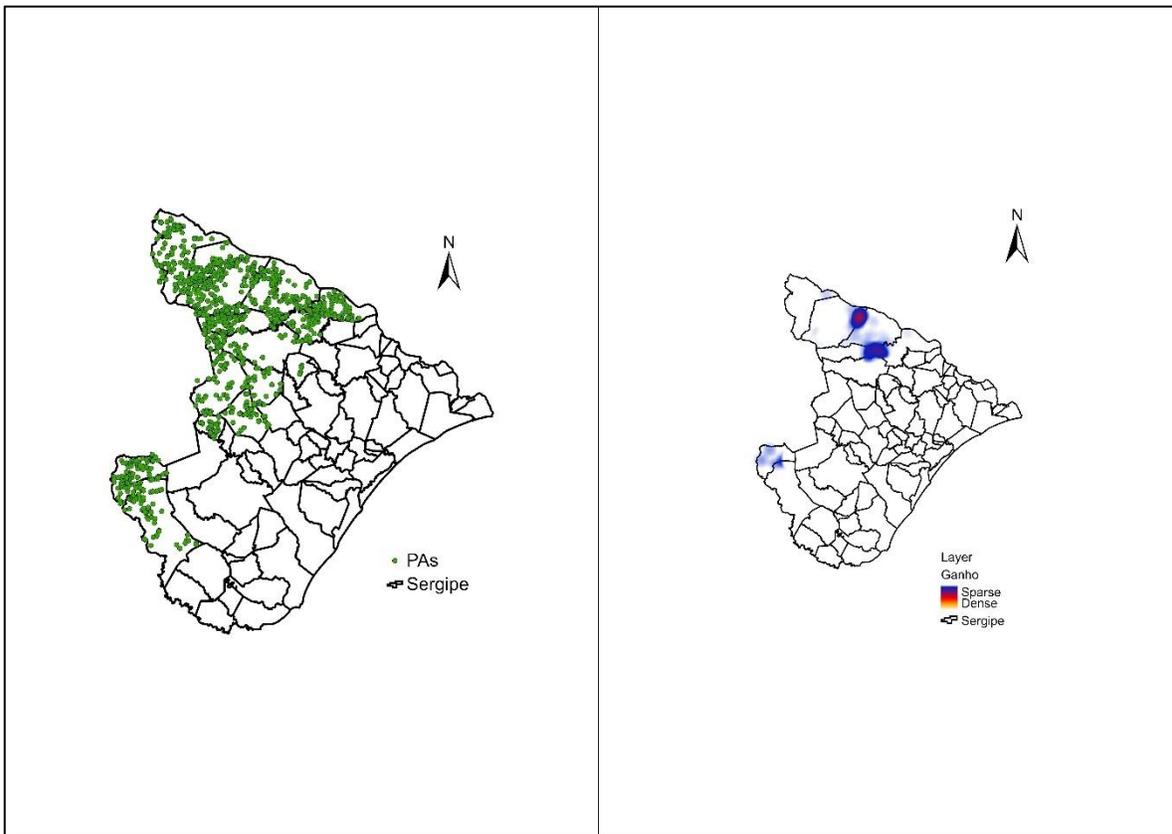


**Figura 17:** Matriz de origem-destino de Alagoas desde as novas ETAs para as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

### 3.5.2. Geoprocessamento para Sergipe

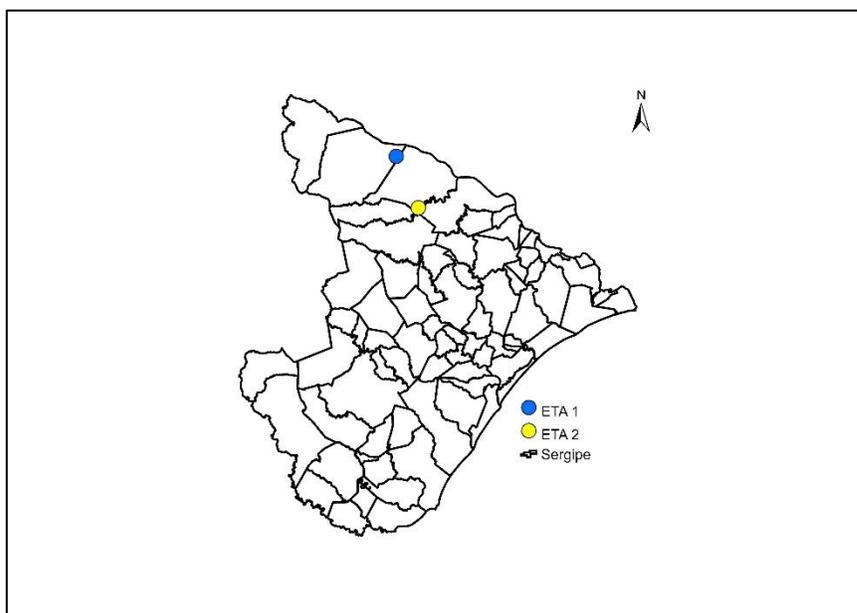
O Sergipe tem 1.091 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas *X* e *Y* com o sistema de SIRGAS 2000. Após plotá-las, as PAs e seus ganhos, respectivamente, obtiveram um mapa de calor ou mapa de densidade por meio da ferramenta *Heat Map* do *ArcGIS*, para identificar as zonas de maior ganho, como mostra a figura 18.



**Figura 18:** PAs localizadas e mapa de calor com as zonas de maior ganho para o estado de Sergipe

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

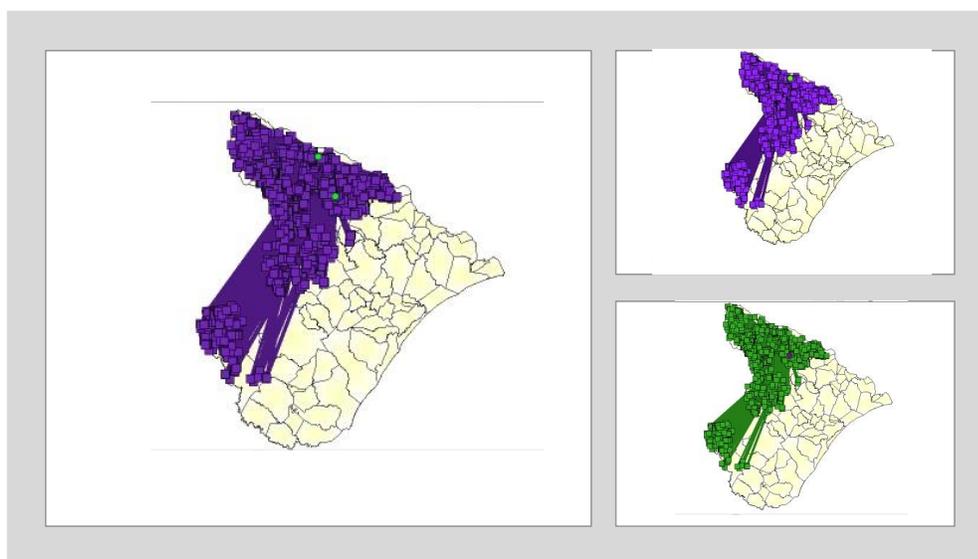
Observa-se que há duas zonas de maior ganho na cor vermelha mais escura, onde serão construídas as novas ETAs, que foram identificadas como ETA 1 (código SE-129108) com a cor azul e ETA 2 (código SE-125010) com a cor amarela, como mostra a figura 19.



**Figura 19:** Mapa com a localização das novas ETAs para o estado de Sergipe

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Ao identificar as duas zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, foi criada uma matriz de origem-destino com a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* a partir do *Network Analyst*, realizado desde a ETA 1, ETA 2 e ETA 1 junto com a ETA 2 até as PAs já existentes (Figura 20). Para o estado de Sergipe, foram localizadas no total 1.091 PAs.

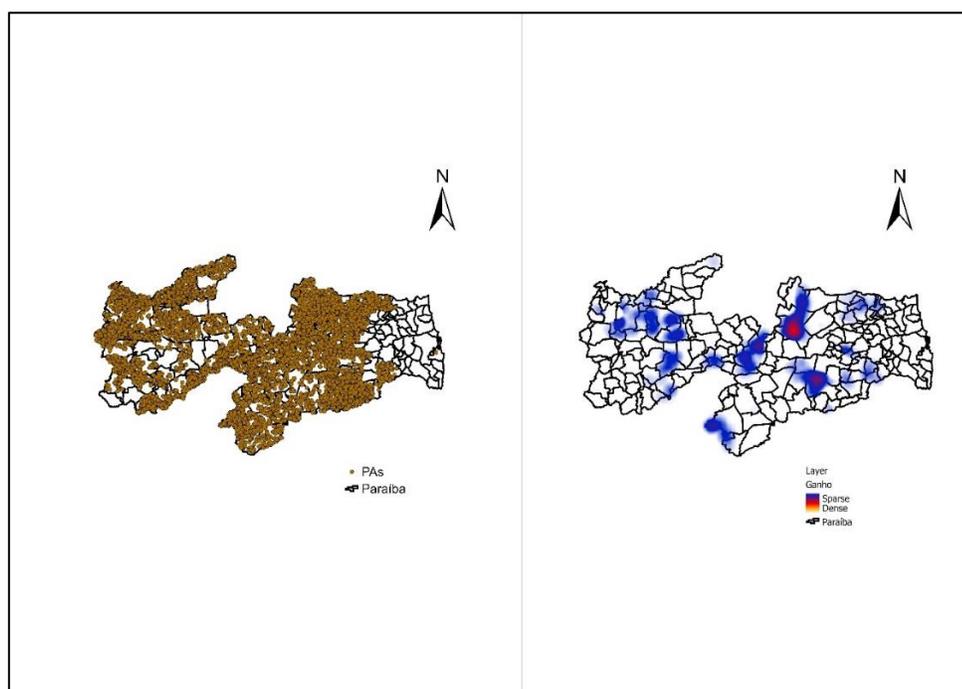


**Figura 20:** Matriz de origem-destino de Sergipe desde as novas ETAs para as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

### 3.5.3. Geoprocessamento para Paraíba

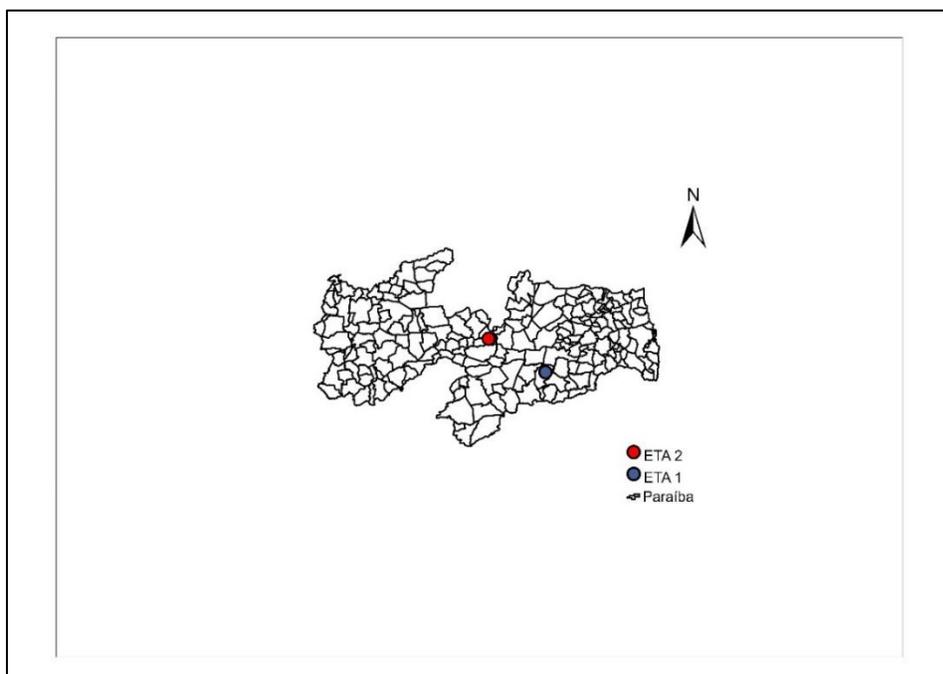
O estado da Paraíba conta com 9.695 PAs, que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas  $X$  e  $Y$  com o sistema SIRGAS 2000. Como nos estados de Alagoas e Sergipe já descritos, obteve-se um mapa de calor ou densidade mediante ferramenta do ArcGIS *heat map*, a fim de identificar as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, de acordo com a figura 21.



**Figura 21:** Localização das PAs e identificação das zonas de maior ganho para o estado da Paraíba

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

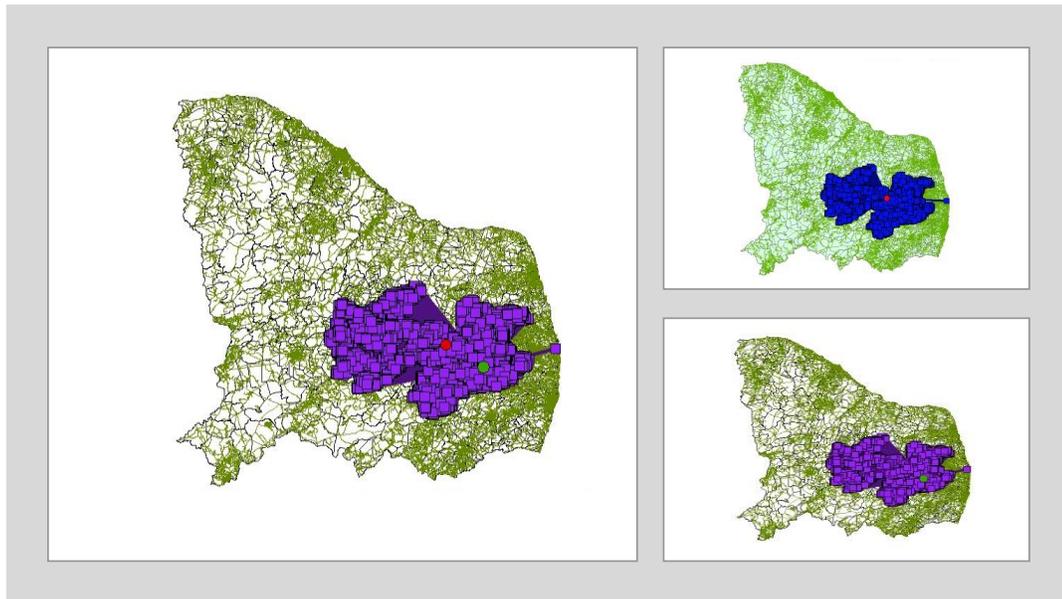
As duas zonas de maior ganho identificadas foram designadas como ETA 1 (código PB-41473) da cor azul e ETA 2 (código PB-109881) com a cor vermelha (figura 22).



**Figura 22:** Mapa com a localização das novas ETAs para o estado da Paraíba

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Adicionalmente, ao identificar as duas zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, conforme já descrito Alagoas e Sergipe, foi criada a matriz de origem-destino com a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* a partir do *Network Analyst* realizado desde as novas ETAs 1 e 2 até as PAs já existentes (figura 23).



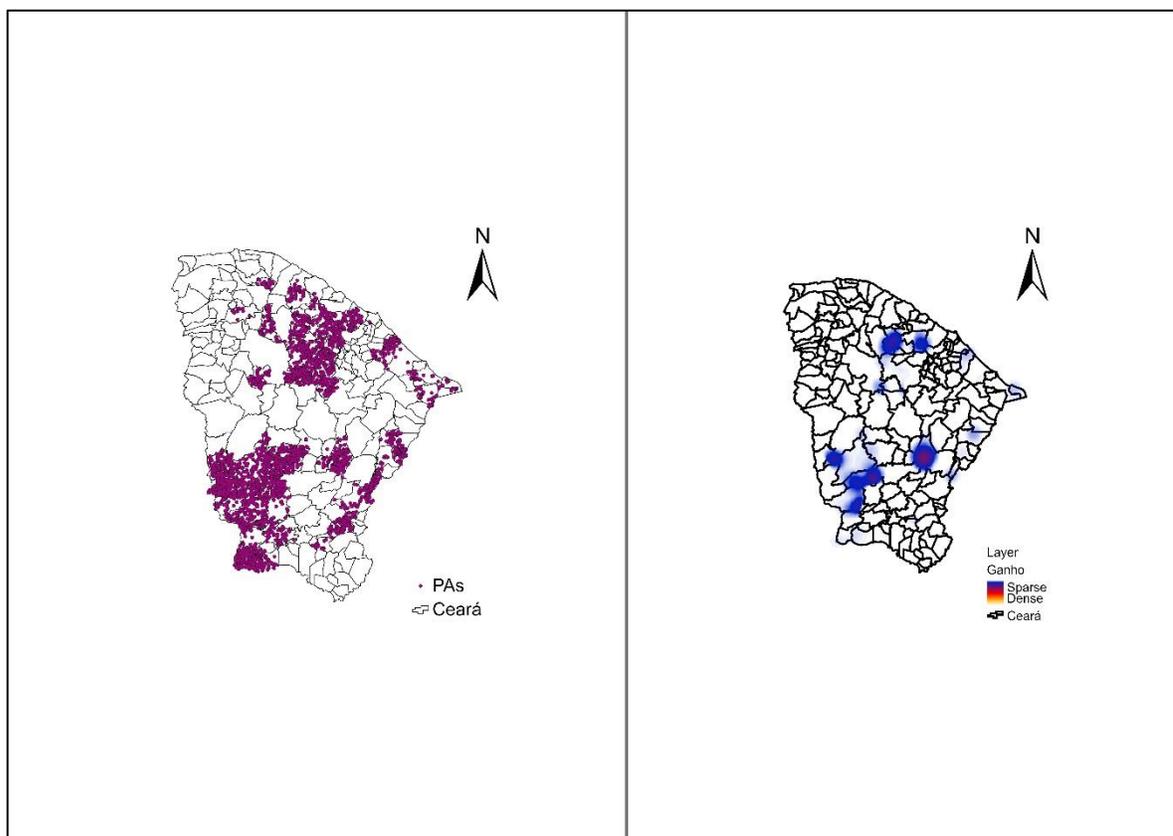
**Figura 23:** Matriz origem-destino da Paraíba desde as novas ETAs até as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Para o estado da Paraíba, foram localizadas 9.695 PAs que demandavam abastecimento.

#### **3.5.4. Geoprocessamento para Ceará**

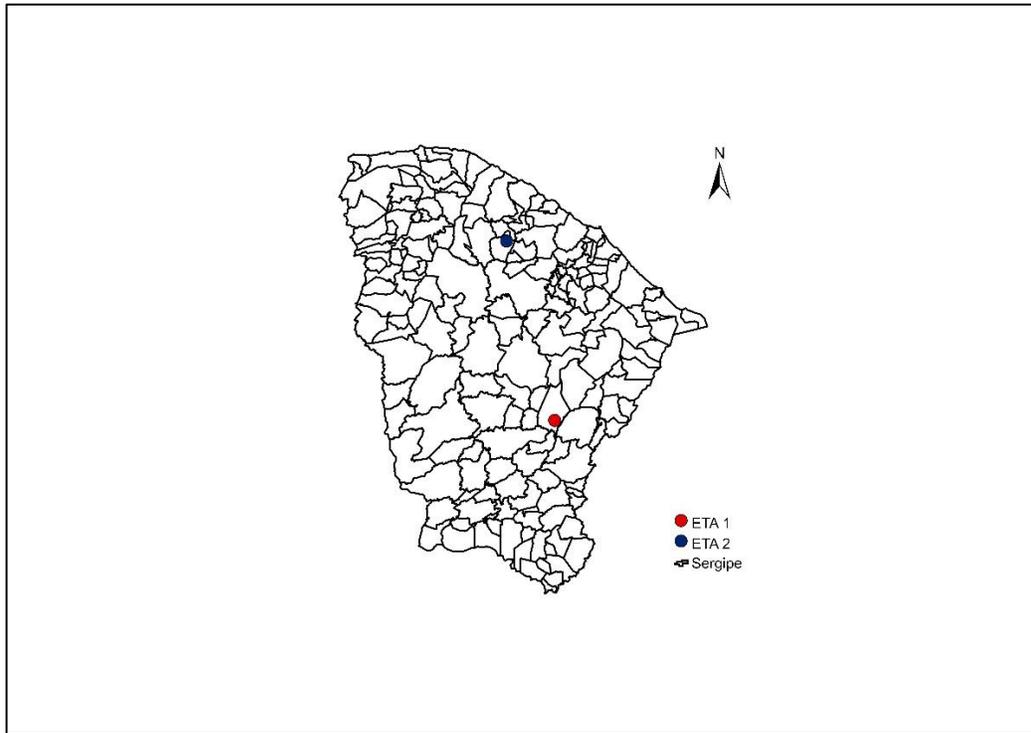
O estado do Ceará tem 4.566 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas *X* e *Y* com o sistema SIRGAS 2000. Posteriormente, realizou-se um mapa de calor ou densidade através da ferramenta do ArcGIS *Heat Map*, para identificar as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida (figura 24).



**Figura 24:** Localização das PAs e mapa de calor do estado de Ceará

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

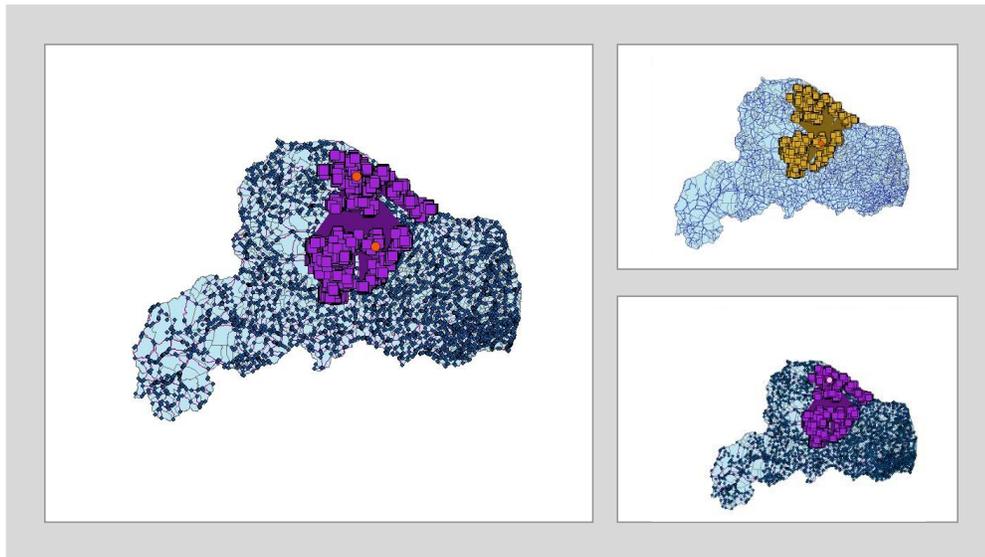
Dois zonas de maior ganho foram identificadas e designadas como ETA 1 (código CE-65230) da cor vermelha e ETA 2 (código CE-113534) com a cor azul, conforme mostra a figura 25.



**Figura 25:** Mapa com a localização das novas ETAs para o estado do Ceará

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

As duas zonas de maior ganho em termos de distância percorrida foram então identificadas, obtendo a matriz de origem-destino com a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix*. O *Network Analyst* foi aplicado determinando as distâncias entre as novas ETAs 1 e 2 para todas as PAs já existentes (figura 26).



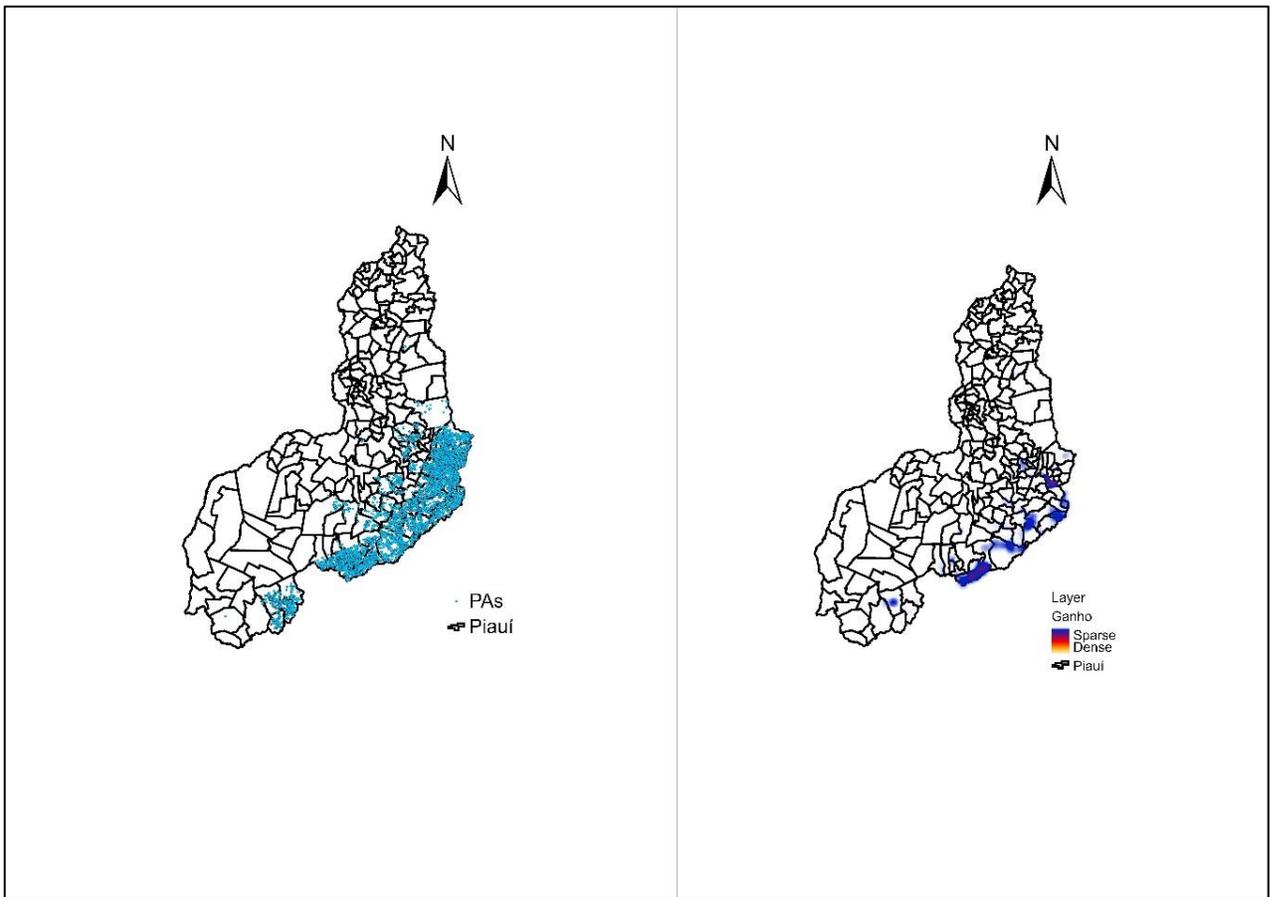
**Figura 26:** Matriz origem-destino do Ceará desde as novas ETAs até as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Para o Ceará, há um total de 4.566 PAs e 38 mananciais, considerando os dois novos mananciais ETAS 1 e 2.

### 3.5.5. Geoprocessamento para Piauí

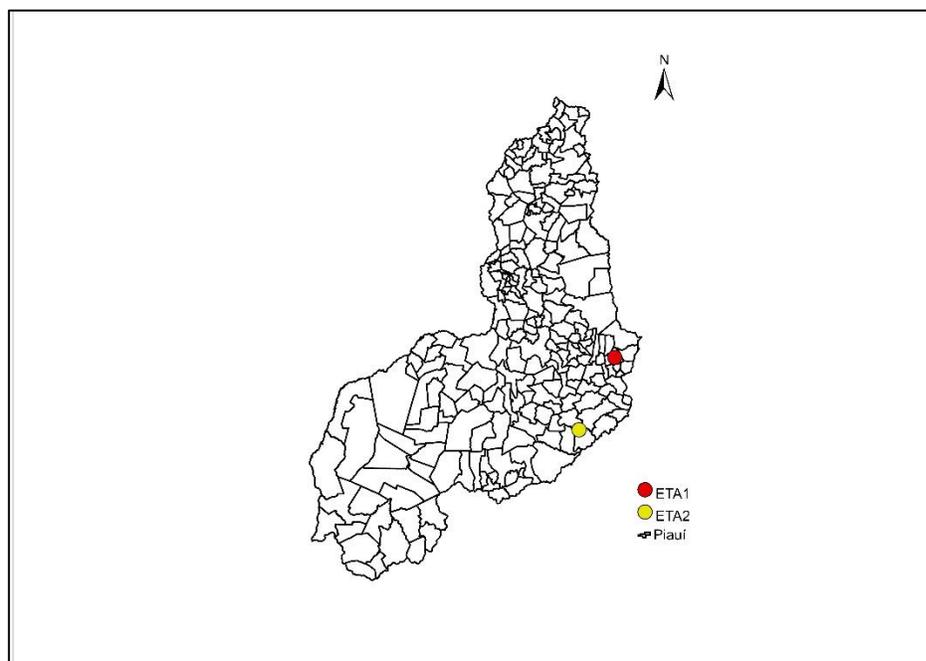
O Piauí tem 5.672 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas *X* e *Y* com o sistema SIRGAS 2000. Um mapa de calor ou densidade foi obtido da mesma maneira que para os outros estados já mencionados, aplicando a ferramenta do *ArcGIS Heat Map*, identificando as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, segundo figura 27.



**Figura 27:** Localização das PAs e mapa de calor do estado do Piauí

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

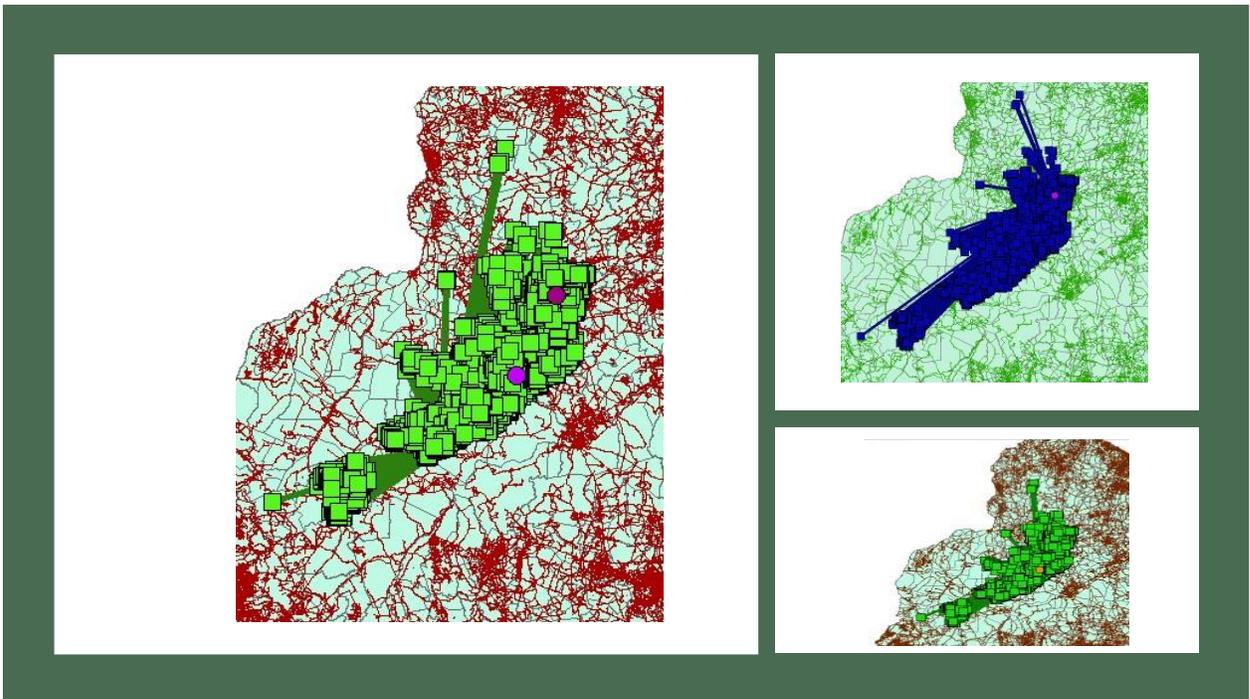
As duas zonas de maior ganho em termos da otimização da distância percorrida foram obtidas e designadas como ETA 1 (código PI-113825) da cor vermelha e ETA 2 (código PI-158699) com a cor amarela (figura 28).



**Figura 28:** Mapa com a localização das novas ETAs para o estado do Piauí

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Ao identificar as duas zonas de maior ganho, a nova matriz de origem-destino foi de novo obtida aplicando a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* a partir do *Network Analyst* realizado, conforme figura 29.



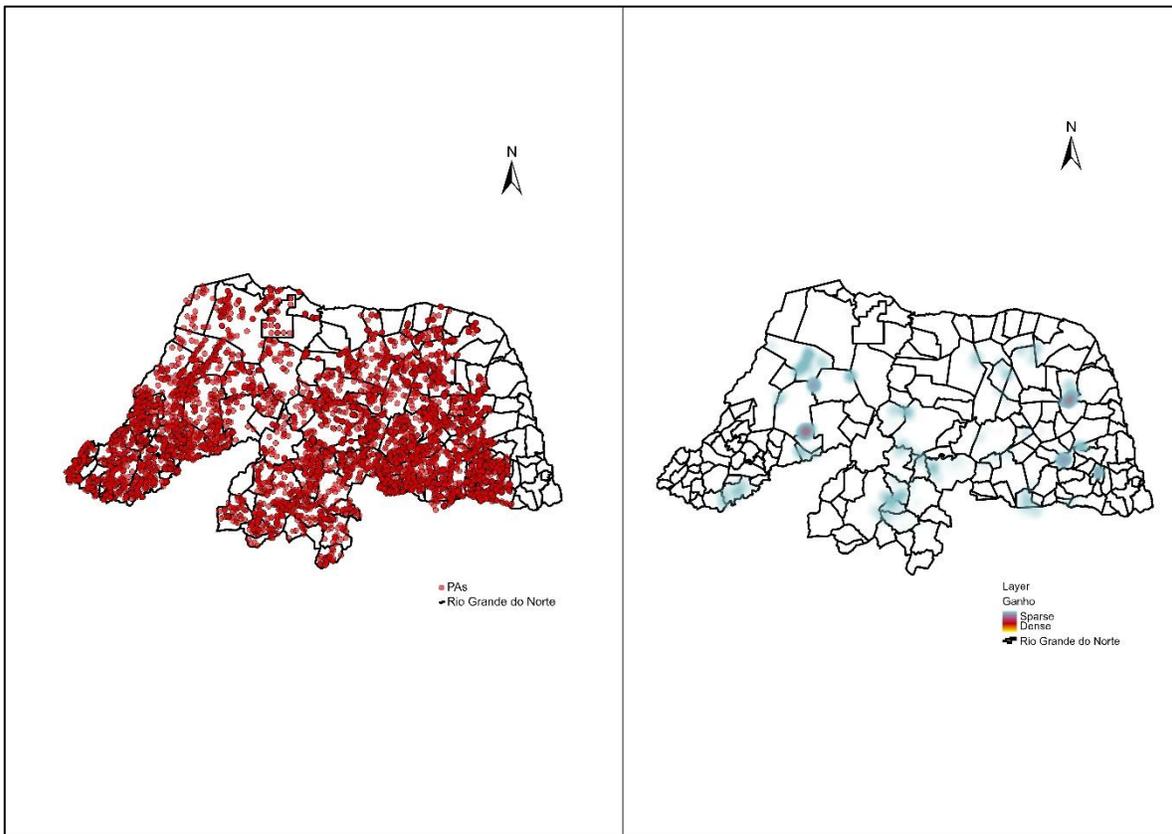
**Figura 29:** Matriz origem-destino do Piauí desde as novas ETAs até as PAs já existentes.

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Para o estado do Piauí, há um total de 5.672 PAs e 63 ETAs, ao adicionar as duas novas ETAs, a 1 e a 2.

### 3.5.6. Geoprocessamento para Rio Grande do Norte

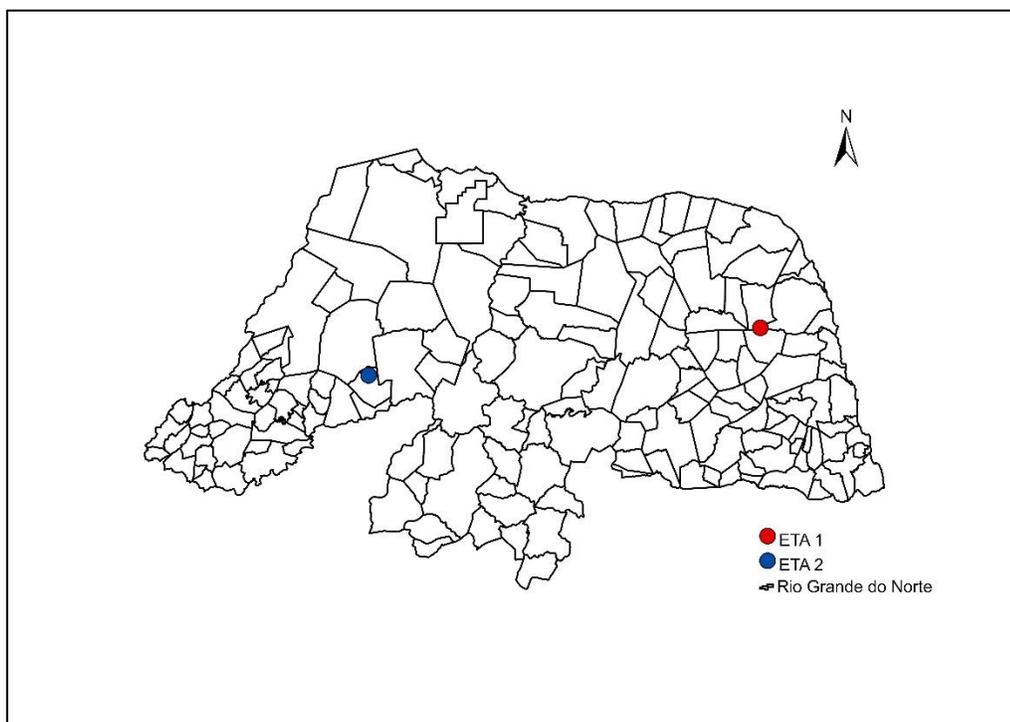
O estado RN tem 6.496 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas *X* e *Y* com o sistema SIRGAS 2000. O mapa de calor ou densidade foi obtido aplicando a ferramenta do *ArcGIS Heat Map*, para identificar as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida. Vide figura 30.



**Figura 30:** Localização das PAs e mapa de calor do estado do Rio Grande do Norte

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

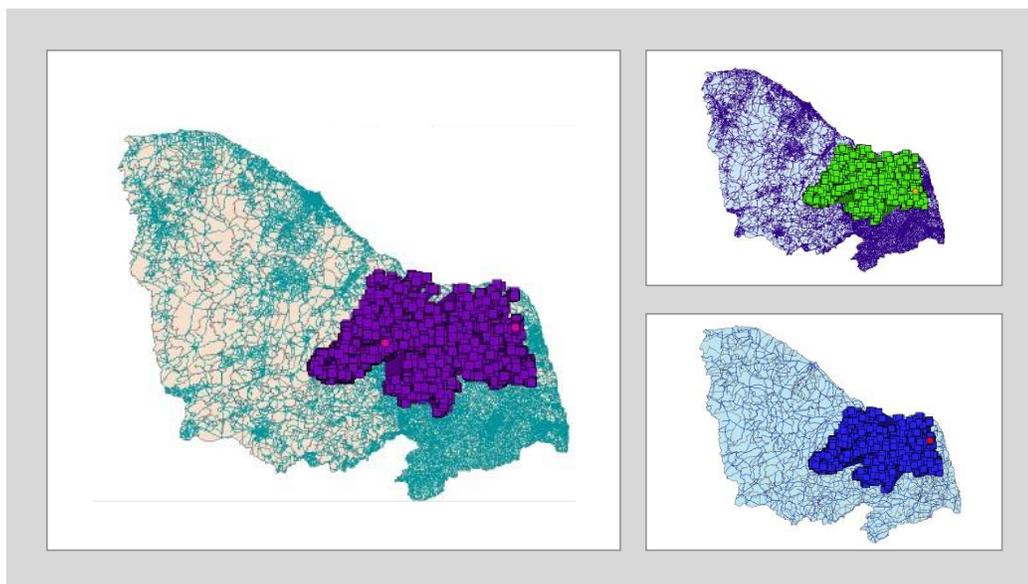
As duas zonas de maior ganho foram mais uma vez identificadas para o Rio Grande do Norte e designadas como ETA 1 (código RG-148650) da cor vermelha e ETA 2 (código RG-63028) com a cor azul (figura 31).



**Figura 31:** Mapa com a localização das novas ETAs do estado do Rio Grande do Norte

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Uma vez identificadas as duas zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, a nova matriz de origem-destino foi obtida pela ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* aplicando o *Network Analyst*, como mostra a figura 32.



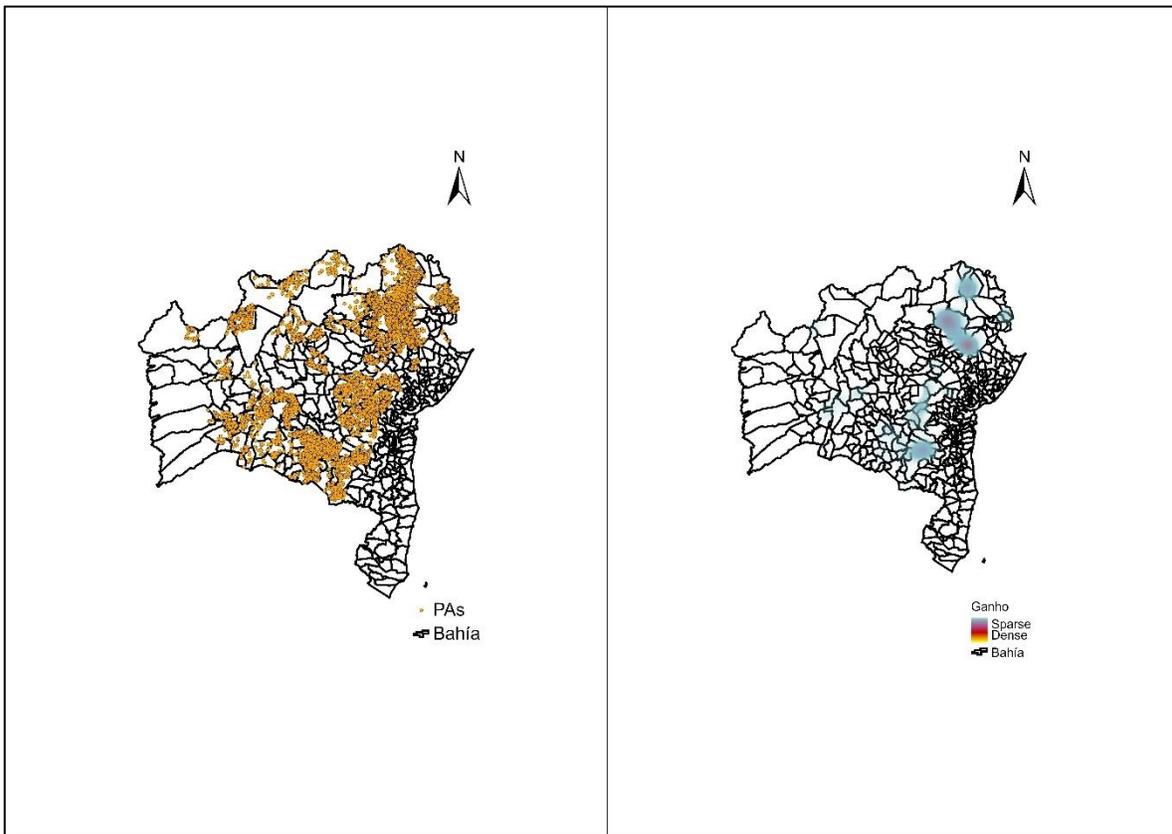
**Figura 32:** Matriz origem-destino do Rio Grande do Norte desde as novas ETAs até as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

No total, foram localizadas 6.496 PAs e 39 MAN para o Rio Grande do Norte.

### 3.5.7. Geoprocessamento para Bahia

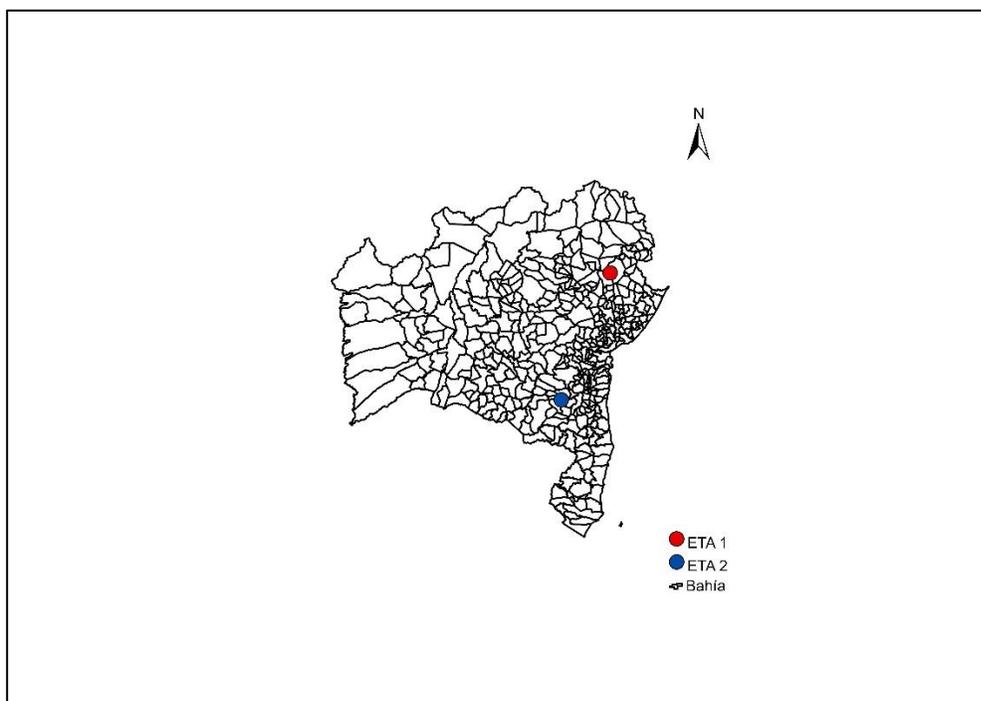
A Bahia tem 8.587 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas *X* e *Y* com o sistema SIRGAS 2000. Um mapa de calor ou densidade aplicado a ferramenta do *ArcGIS Heat Map* foi mais uma vez obtido, identificando as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, segundo a figura 33.



**Figura 33:** Localização das PAs e mapa de calor do estado da Bahia

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

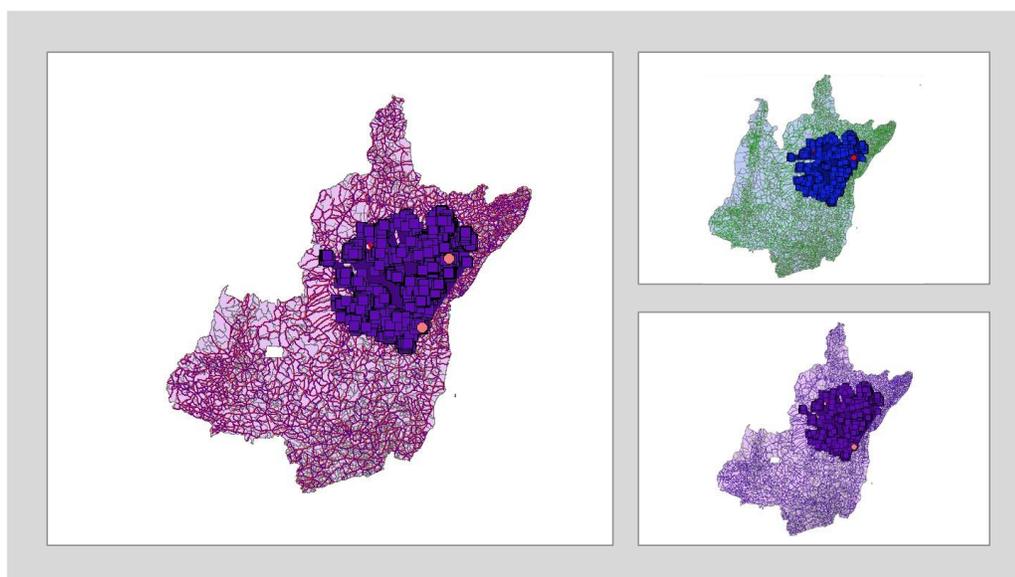
As duas zonas de maior ganho foram identificadas e designadas como ETA 1 (código BA-167375) da cor vermelha e ETA 2 (código BA-83129) com a cor azul, vide figura 34.



**Figura 34:** Mapa com a localização das novas ETAs da Bahia

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Finalmente, a nova matriz de origem-destino foi obtida aplicando a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* a partir do *Network Analyst* (figura 35).



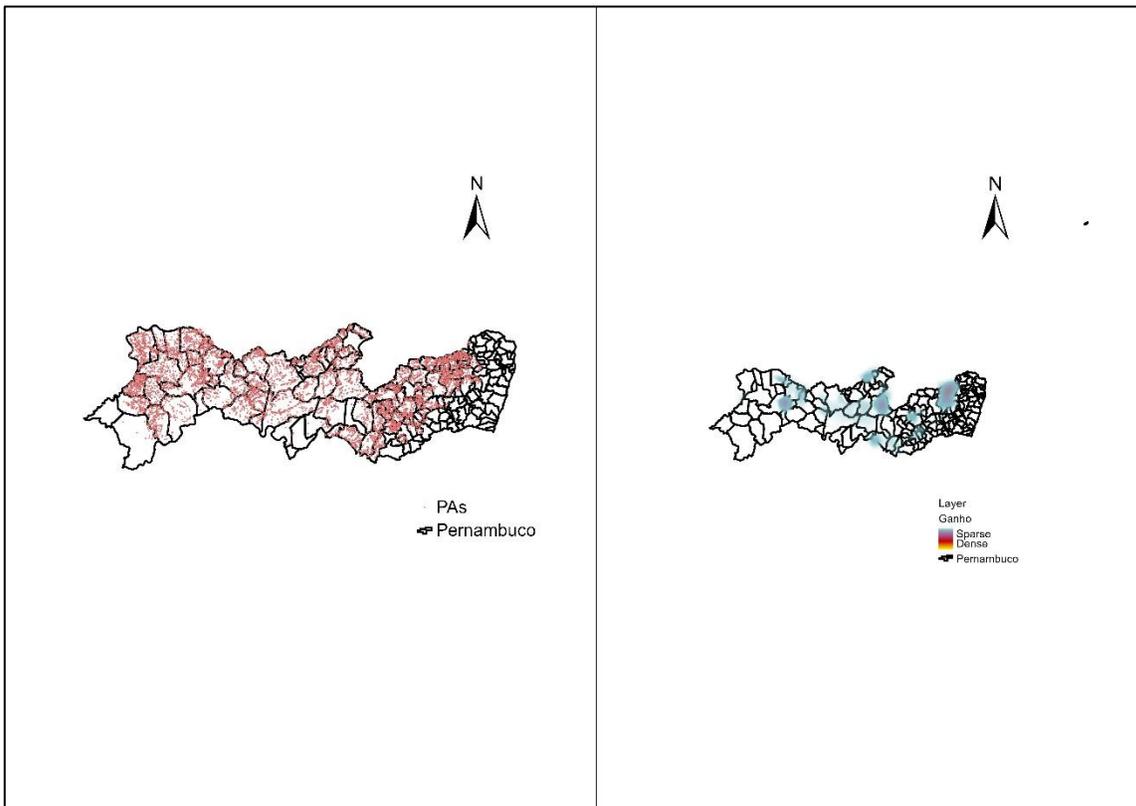
**Figura 35:** Matriz origem-destino da Bahia desde as novas ETAs até as PAs já existentes.

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

No total, há 8.587 PAs e 144 mananciais para este estado.

### 3.5.8. Geoprocessamento para Pernambuco

O estado do Pernambuco tem 10.160 PAs que foram plotadas através do arquivo de coordenadas geográficas  $X$  e  $Y$  com o sistema SIRGAS 2000. O mapa de calor ou densidade também foi obtido aplicando a ferramenta do *ArcGIS Heat Map*, identificando as zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, conforme figura 36.

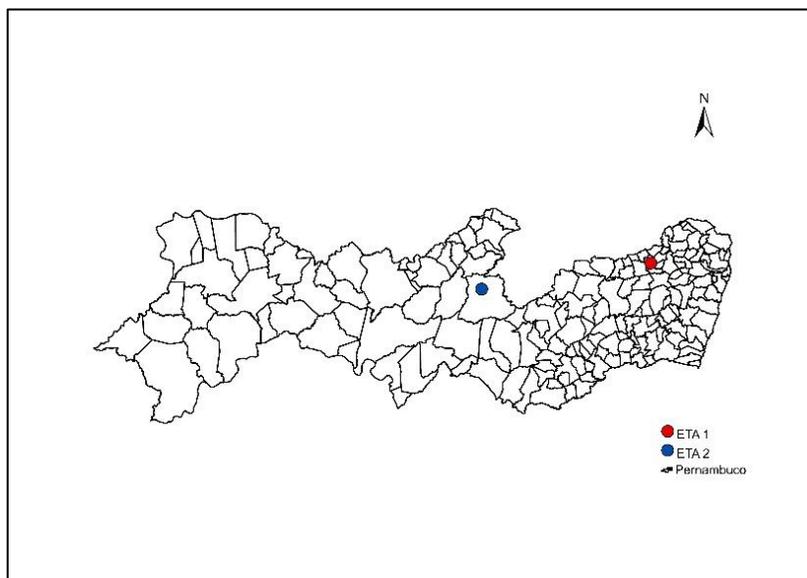


**Figura 36:** Localização das PAs e mapa de calor do estado de Pernambuco

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

As duas zonas de maior ganho foram identificadas e designadas como ETA 1 (código PE-66965) da cor vermelha e ETA 2 (código PE-82960) com a cor azul (figura 37). Uma vez identificadas as duas zonas de maior ganho em termos de distância percorrida, a nova matriz de

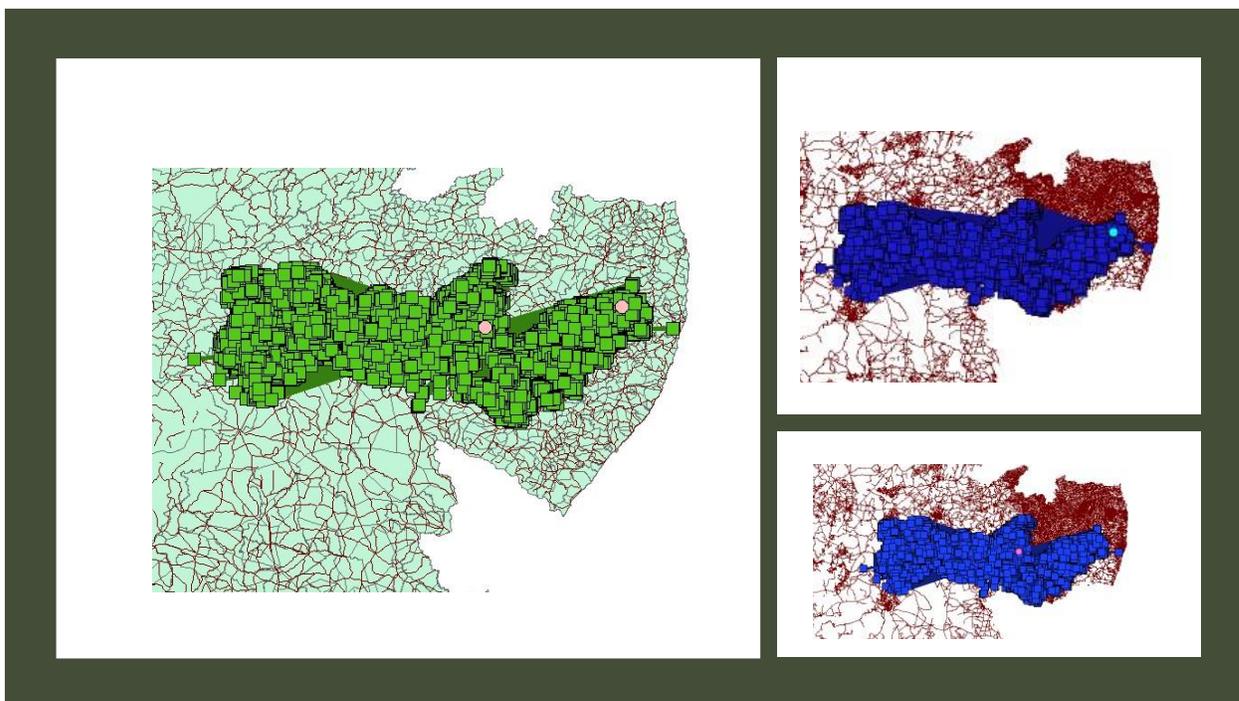
origem-destino foi obtida aplicando a ferramenta do *ArcGIS* chamada de *Origin-destin Cost Matrix* a partir do *Network Analyst* (figura 38).



**Figura 37:** Mapa com a localização das novas ETAs do estado de Pernambuco

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Para Pernambuco, há 10.160 PAs e 75 mananciais em cada matriz.



**Figura 38:** Matriz origem-destino de Pernambuco desde as novas ETAs até as PAs já existentes

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados.

Por fim, cabe ressaltar que para os estados deste estudo foi utilizado um rádio de tolerância de 10.000 metros e 25.000 metros dependendo da dificuldade de localizar algumas PAs pelo *ArcGIS*. Além disso, foi necessário considerar a malha viária dos estados vizinhos para conseguir uma matriz de origem-destino mais completa para todos.

### 3.6. MODELAGEM MATEMÁTICA

Após realizar o geoprocessamento dos dados, um modelo matemático de otimização foi implementado para minimizar os custos de distribuição em termos de distâncias percorridas. Devido à particularidade do banco de dados usado pelo CENAD, considerou-se que cada PA ( $j$ ) pode receber água de um só manancial ( $i$ ), que estará localizado dentro do mesmo estado da demanda de água, ou seja não será possível realizar uma movimentação de água entre diferentes estados para este trabalho.

Considerando o anterior, foi construído uma função objetivo da seguinte forma:

$$\text{Função objetivo } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_j * D_{ij} * X_{ij} \quad (2)$$

Em que: -  $i$  representa o manancial (MAN);

-  $j$  a Prefeitura Administrativa (PA);

-  $D_{ij}$  a distância entre o manancial ( $i$ ) e a PA ( $j$ );

-  $E_j$  a quantidade de entregas requerida pela PA ( $j$ ).

Além disso, as seguintes restrições de capacidade, de demanda e não negatividade são consideradas:

$$\sum_{j=1}^m E_j X_{ij} \leq C_i \quad \text{para todo } i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \text{para todo } j = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

em que  $C_i$  representa a capacidade do manancial ( $i$ ). Ressalta-se que  $X_{ij}$  é binário, então assume o valor 1 se o manancial ( $i$ ) atende a PA ( $j$ ), ou 0, caso contrário.

O modelo foi implementado em todos os estados da pesquisa, utilizando as bases de dados devidamente tratadas e coletadas, assim como foram definidas nas seções anteriores. Finalmente, utilizou-se o software *MATLAB* para realizar as otimizações a partir do modelo desenvolvido e obter os resultados para cada um dos estados do estudo.

Deve-se mencionar que o *MATLAB* é um *software* que permite realizar programações, cálculos numéricos, análises de dados, desenvolver algoritmos e criar modelos. Este programa é utilizado por milhões de engenheiros e cientistas. Neste caso, o programa foi escolhido devido à sua grande capacidade para solucionar problemas de otimizações, de acordo com uma linguagem de programação específica por meio da manipulação de vetores e matrizes (MATHWORKS, 2021).

Deste modo, os dados de entrada para a otimização são as matrizes chamadas de “atual”, “demanda”, “oferta” e “distâncias”. Os arquivos de saída foram chamados de “resultado” e “economia”. O primeiro arquivo chamado “resultado” consta de duas colunas, em que a primeira

consta as PAs e a segunda com a solução ótima do MAN que serve a referida PA, sendo referenciados pelos respectivos códigos. O segundo arquivo consta da distância de entregas atualmente realizadas ou atuais e, a distância otimizada em metros apresentando, assim a economia obtida em porcentagem.

### **3.7. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS**

No presente trabalho, como já mencionado, diferentes cenários foram considerados, num total de três, do qual as ETAs possuem três capacidades classificadas de porte pequeno (300 entregas), médio (1.500 entregas) e grande (2.600 entregas). Cada entrega corresponde a 1 (um) caminhão-pipa cheio de água.

O cenário 1 refere-se à construção de uma nova ETA na primeira zona mais escura do mapa de calor e corresponde a ETA 1. Para o cenário 2, a construção da nova ETA foi na segunda zona mais escura, correspondendo ao segundo ponto no mapa referenciado como ETA 2. Enfim, para o terceiro cenário, foram adicionadas duas ETAs às localidades definidas nos cenários 1 e 2.

Os cenários foram avaliados para cada um dos estados da pesquisa e serão analisados nas próximas seções. Na tabela 7, mostra um resumo dos cenários por estado com os códigos das ETAs respectivas.

**Tabela 7:** Resumo dos cenários para cada estado da pesquisa

<b>ESTADO</b>	<b>CÉNARIO 1</b>		<b>CÉNARIO 2</b>		<b>CÉNARIO 3</b>	
<b>ALAGOAS</b>	Cap 300	AL- 10407	Cap 300	AL-161348	Cap 300	AL-10407
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	AL-161348
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>SERGIPE</b>	Cap 300	SE-129108	Cap 300	SE-125010	Cap 300	SE-129108
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	SE-125010
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>PARAÍBA</b>	Cap 300	PB-41473	Cap 300	PB-109881	Cap 300	PB-41473
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	PB-109881
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>CEARÁ</b>	Cap 300	CE-65230	Cap 300	CE-113534	Cap 300	CE-65230
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	CE-113534
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>PERNAMBUCO</b>	Cap 300	PE-66965	Cap 300	PE-82960	Cap 300	PE-66965
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	PE-82960
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>PIAUI</b>	Cap 300	PI-113825	Cap 300	PI-158699	Cap 300	PI-113825
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	PI-158699
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>	Cap 300	RG-148650	Cap 300	RG- 63028	Cap 300	RG-148650
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	RG- 63028
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	
<b>BAHIA</b>	Cap 300	BA-167375	Cap 300	BA- 83129	Cap 300	BA-167375
	Cap 1500		Cap 1500		Cap 1500	BA- 83129
	Cap 2600		Cap 2600		Cap 2600	

**Fonte:** Elaboração própria a partir das bases de dados do CENAD.

## **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Uma vez aplicado o modelo de otimização, os resultados comparando o custo atual e o custo otimizado foram realizados obtendo as economias, e após foram calculadas considerando-se o custo total da Operação Carro-Pipa (OCP) de R\$ 1,2 bilhões ao ano, em relação a participação em porcentagem para cada um dos estado analisados. Além disso, foi realizada uma investigação de viabilidade econômica para cada um dos cenários definidos anteriormente.

### **4.1 ANÁLISES DE RESULTADOS POR ESTADO**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de realizar as otimizações para cada um dos estados e suas respectivas análises de viabilidade. Os resultados são apresentados em forma de tabelas, que relacionam o custo atual em metros, o custo otimizado em metros, a economia em porcentagem e em termos monetários, reais.

#### **4.1.1. Análise para o estado de Alagoas**

Segundo os critérios mencionados anteriormente, calculou-se a economia em que Alagoas representa 3,21% da OCP ou aproximadamente R\$ 39 milhões (R\$ 38.525.229) ao ano. Na tabela 8, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 8:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado de Alagoas

<b>Cenário 1- Construção de uma ETA em AL-10407</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	
Pequeno (300)	288.999	251.214	13,07%	R\$	5.036.958
Medio (1500)	288.999	212.346	26,52%	R\$	10.218.286
Grande (2600)	288.999	211.679	26,75%	R\$	10.307.201
<b>Cenário 2 - Construção de uma ETA em AL-161348</b>					
Pequeno (300)	288.999	259.774	10,11%	R\$	3.895.861
Medio (1500)	288.999	237.080	17,97%	R\$	6.921.101
Grande (2600)	288.999	232.453	19,57%	R\$	7.537.907
<b>Cenário 3 - Construção de duas ETAs em AL-10407 e em AL-161348</b>					
Pequeno (300)	288.999	240.563	16,76%	R\$	6.456.797
Medio (1500)	288.999	198.902	31,18%	R\$	12.010.448
Grande (2600)	288.999	198.815	31,21%	R\$	12.022.046

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 8, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma ETA de porte grande (2.600 entregas). Em particular, observa-se que o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de Estações de Tratamento de Água com uma economia de 31,21% (R\$ 12.022.046). Entretanto, deve-se ainda observar que é muito pequena a diferença da economia obtida quando comparando os resultados para as ETAs de médio e grande porte nos três cenários.

#### **4.1.2 Análise para o estado de Sergipe**

O Sergipe representa 1,07% das entregas da OCP ou aproximadamente R\$ 13 milhões (R\$ 12.883.601) ao ano. Na tabela 9, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros para este estado.

**Tabela 9:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado do Sergipe

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em SE-129108</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	
Pequeno (300)	96.647	90.049	6,83%	R\$	879.551
Médio (1500)	96.647	88.756	8,16%	R\$	1.051.916
Grande (2600)	96.647	88.756	8,16%	R\$	1.051.916
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em SE-125010</b>					
Pequeno (300)	96.647	91.184	5,65%	R\$	728.249
Médio (1500)	96.647	91.184	5,65%	R\$	728.249
Grande (2600)	96.647	91.184	5,65%	R\$	728.249
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em SE-129108 e em SE-125010</b>					
Pequeno (300)	96.647	88.038	8,91%	R\$	1.147.629
Médio (1500)	96.647	87.111	9,87%	R\$	1.271.204
Grande (2600)	96.647	87.111	9,87%	R\$	1.271.204

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 9, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma Estação de Tratamento de Água de porte médio ou grande (1.500-2.600 entregas). Portanto, observa-se, ainda, que o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de ETAs com uma economia de 9,87% (R\$1.271.204), sendo como já mencionado, a mesma economia obtida quando comparando os resultados para as ETAs de médio e grande porte.

#### **4.1.3 Análise para o estado do Ceará**

O estado do Ceará representa 12,06% das entregas da OCP ou aproximadamente R\$ 145 milhões (R\$ 144.716.857) ao ano. Na tabela 10, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 10:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado do Ceará

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em CE-65230</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	
Pequeno (300)	1.085.602	1.000.406	7,85%	R\$	11.357.056
Médio (1500)	1.085.602	974.530	10,23%	R\$	14.806.474
Grande (2600)	1.085.602	974.530	10,23%	R\$	14.806.474
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em CE-113534</b>					
Pequeno (300)	1.085.602	985.179	9,25%	R\$	13.386.902
Médio (1500)	1.085.602	917.445	15,49%	R\$	22.416.228
Grande (2600)	1.085.602	908.952	16,27%	R\$	23.548.394
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em CE-65230 e em CE-113534</b>					
Pequeno (300)	1.085.602	968.247	10,81%	R\$	15.644.033
Médio (1500)	1.085.602	874.638	19,43%	R\$	28.122.645
Grande (2600)	1.085.602	866.148	20,21%	R\$	29.254.410

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a tabela 10, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma Estação de Tratamento de Água (ETA) de porte grande (2.600 entregas). Interessante observar que no cenário 1, as economias são iguais para as ETAs de porte médio ou grande, sendo de aproximadamente 10,23%. Além disso, nota-se, mais uma vez, que o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de ETAs, sendo as ETAs de porte grande as que fornecem a maior economia neste cenário que é de 20,21% (R\$29.254.410).

#### 4.1.4 Análise para o estado do Rio Grande do Norte

O estado do Rio Grande do Norte representa 11,53% das entregas totais da OCP ou aproximadamente R\$ 139 milhões (R\$ 138.415.494) ao ano. Na tabela 11, as economias obtidas para este estado são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 11:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado do Rio Grande do Norte

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em RN-148650</b>				
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>
Pequeno (300)	1.038.331	992.443	4,42%	R\$ 6.117.134
Médio (1500)	1.038.331	980.896	5,53%	R\$ 7.656.416
Grande (2600)	1.038.331	979.656	5,65%	R\$ 7.821.715
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em RN-63028</b>				
Pequeno (300)	1.038.331	977.767	5,83%	R\$ 8.073.530
Médio (1500)	1.038.331	944.495	9,04%	R\$ 12.508.878
Grande (2600)	1.038.331	942.016	9,28%	R\$ 12.839.343
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em CE-65230 e em CE-113534</b>				
Pequeno (300)	1.038.331	969.030	6,67%	R\$ 9.238.222
Médio (1500)	1.038.331	929.438	10,49%	R\$ 14.516.063
Grande (2600)	1.038.331	927.177	10,71%	R\$ 14.817.468

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 11, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma ETA de porte grande (2.600 entregas), e assim como para os estados já analisados, o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de ETAs, sendo as de porte grande as mais altas, com uma economia de 10,71% (R\$ 14.817.468).

#### **4.1.5 Análise para o estado da Paraíba**

A Paraíba representa 21,88 % das entregas totais da OCP ou aproximadamente R\$ 263 milhões (R\$ 262.526.881) ao ano. Na tabela 12, as economias obtidas para a Paraíba são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 12:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado da Paraíba

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em PB-41473</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	
Pequeno (300)	1.969.359	1.776.669	9,78%	R\$	25.686.685
Médio (1500)	1.969.359	1.693.374	14,01%	R\$	36.790.388
Grande (2600)	1.969.359	1.646.832	16,38%	R\$	42.994.704
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em PB-109881</b>					
Pequeno (300)	1.969.359	1.763.772	10,44%	R\$	27.405.930
Médio (1500)	1.969.359	1.631.046	17,18%	R\$	45.099.069
Grande (2600)	1.969.359	1.552.750	21,15%	R\$	55.536.376
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em PB-41473 e em PB-109881</b>					
Pequeno (300)	1.969.359	1.730.353	12,14%	R\$	31.860.874
Médio (1500)	1.969.359	1.544.207	21,59%	R\$	56.675.207
Grande (2600)	1.969.359	1.444.201	26,67%	R\$	70.006.582

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a tabela 12, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma Estação de Tratamento de Água de porte grande (2.600 entregas). Além disso, observa-se que o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de ETAs, sendo as de porte grande as mais altas, com uma economia de 26,67% (R\$70.006.582).

#### 4.1.6 Análise para o estado do Piauí

O estado do Piauí representa 13,25% das entregas totais da OCP ou aproximadamente R\$ 159 milhões (R\$ 158.940.197) ao ano. Na tabela 13, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 13:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado do Piauí

<b>Cenário 1- Construção de uma ETA em PI-113525</b>				
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>
Pequeno (300)	1.192.298	1.067.954	10,43%	R\$ 16.575.786
Médio (1500)	1.192.298	1.004.380	15,76%	R\$ 25.050.566
Grande(2600)	1.192.298	974.106	18,30%	R\$ 29.086.264
<b>Cenário 2- Construção de uma ETA em PI-158699</b>				
Pequeno (300)	1.192.298	1.050.660	11,88%	R\$ 18.881.176
Médio (1500)	1.192.298	958.084	19,64%	R\$ 31.222.089
Grande (2600)	1.192.298	943.586	20,86%	R\$ 33.154.756
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em PI-113825 e em PI-158699</b>				
Pequeno (300)	1.192.298	1.025.523	13,99%	R\$ 22.232.082
Médio (1500)	1.192.298	870.602	26,98%	R\$ 42.883.943
Grande (2600)	1.192.298	835.631	29,91%	R\$ 47.545.778

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 13, conclui-se que para os três cenários, a maior economia é obtida construindo uma ETA de porte grande (2.600 entregas). Mais uma vez, observa-se que o cenário 3 obtém a maior economia nos três cenários de capacidades de ETAs, em que a ETA de porte grande fornece a maior destas economias que é de 29,91% (R\$ 47.545.778).

#### **4.1.7 Análise para o estado da Bahia**

O estado da Bahia representa 11,72% das entregas da OCP ou aproximadamente R\$ 141 milhões (R\$ 140.637.568) ao ano. Na tabela 14, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 14:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado da Bahia

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em BA-167375</b>				
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>
Pequeno (300)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
Médio (1500)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
Grande (2600)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em BA-83129</b>				
Pequeno (300)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
Médio (1500)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
Grande (2600)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em BA-167375 e em BA-83129</b>				
Pequeno (300)	1.055.000	921.000	12,70%	R\$ 17.862.971
Médio (1500)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665
Grande (2600)	1.055.000	922.000	12,61%	R\$ 17.729.665

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 14, conclui-se que para todos os cenários e cada uma das capacidades das ETAs, as economias obtidas são bem semelhantes, embora obteve-se economias significativas de 12,70% (R\$ 17.862.971) correspondente a ETAs de porte pequeno no cenário 3. Entretanto, é necessário avaliar suas viabilidades, uma vez que as ETAs possuem custos de construção diferentes para encontrar o melhor cenário.

#### **4.1.8 Análise para o estado do Pernambuco**

O estado do Pernambuco corresponde a 25,28% da OCP ou aproximadamente R\$ 304 milhões (R\$ 303.354.173) ao ano. Na tabela 15, as economias obtidas são apresentadas a partir do custo atual e o custo otimizado em metros.

**Tabela 15:** Custo otimizado (m) e economia percentual para os três cenários do estado de Pernambuco

<b>Cenário 1-Construção de uma ETA em PE-66965</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Custo Atual (m)</b>	<b>Custo Otimizado (m)</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	
Pequeno (300)	2.275.627	2.034.690	10,59%	R\$	32.118.293
Médio (1500)	2.275.627	1.952.555	14,20%	R\$	43.067.361
Grande (2600)	2.275.627	1.912.726	15,95%	R\$	48.376.796
<b>Cenário 2-Construção de uma ETA em PE-82960</b>					
Pequeno (300)	2.275.627	2.032.239	10,70%	R\$	32.445.026
Médio (1500)	2.275.627	1.941.481	14,68%	R\$	44.543.589
Grande (2600)	2.275.627	1.936.305	14,91%	R\$	45.233.580
<b>Cenário 3- Construção de uma ETA em PE-66965 e em PE-82960</b>					
Pequeno (300)	2.275.627	1.987.059	12,68%	R\$	38.467.780
Médio (1500)	2.275.627	1.850.545	18,68%	R\$	56.665.881
Grande (2600)	2.275.627	1.820.531	20,00%	R\$	60.666.920

**Fonte:** Elaboração própria

De acordo com a tabela 15, conclui-se que para os três cenários, a maior economia obtida é construindo uma Estação de Tratamento de Água de porte grande (2.600 entregas). Além disso, observa-se que o cenário 3 obtém a maior economia dos três cenários, sendo a maior economia obtida com a ETA de grande porte de aproximadamente 20% (R\$ 60.666.920).

Em geral, conclui-se que apesar de todos os cenários considerados em cada estado da pesquisa terem proporcionado economias consideráveis em termos monetários, é válido avaliar as suas viabilidades, uma vez que as ETAs possuem custos de construção diferentes.

#### **4.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE CONSTRUÇÃO DAS NOVAS ETAS**

A viabilidade econômica é um estudo de um projeto a ser executado, considerando aspectos jurídicos, administrativos, financeiros, comerciais e técnicos a fim de avaliar sua importância e justificativa. Portanto, deve-se avaliar a eficiência econômica e financeira para demonstrar que o projeto a ser implantado seja viável (HIRSCHFELD, 2000; ROCHA *et al.*, 2016).

Para realizar a viabilidade econômica de um projeto, é necessário realizar uma avaliação financeira, em que geralmente são medidos indicadores como o valor presente líquido (VPL), a

taxa interna do retorno (TIR), o período de retorno do investimento (*payback*) e a relação custo benefício (B/C), entre os mais relevantes. O primeiro, mede o ganho real do investimento ou determina o valor presente dos fluxos de caixa futuros acima do custo inicial do investimento, a considerar alguns aspectos, tais como o investimento inicial, taxa de desconto, número de períodos e fluxo de caixa. O segundo indicador (TIR), é o de rentabilidade mais utilizado, que considera uma taxa de retorno, segundo a qual determina se é rejeitado ou aceitado o projeto, calculando o valor presente líquido com a taxa que seja igual a zero. O terceiro indicador (*payback*) é também um dos mais utilizados e define o tempo para recuperar o investimento realizado e será aceito se o tempo de recuperação é inferior ao estimado. Por último, no quarto indicador (B/C), é gerada uma comparação entre as receitas e despesas ao valor atualizado para determinar quanto custa o investimento e pode ter resultados positivos (ESAN, 2020; FERNANDO, J, 2021).

É importante mencionar que cada indicador tem suas limitações, pois, por exemplo, o indicador VPL depende muito de suposições e estimativas, o que pode gerar algum risco ou uma margem de erro considerável. O indicador da TIR, é um indicador útil, semelhante ao VPL, porém faz muitas suposições sobre o risco do investimento e a alocação de capital. Dentro do *payback*, há também limitações para projetos de um período muito grande, já que não considera os fluxos de caixa produzidos após um ano de recuperação do investimento. Além disso, o *payback*, assim como o B/C, não considera a magnitude dos projetos e pode ser enviesado ao tomar uma decisão, manipulando o fluxo de um projeto. Portanto, cada um dos indicadores conta com algum tipo de limitação e a escolha vai depender em grande medida do tipo de projeto e das pessoas que o lideram (FERNANDO, J., 2021; MESQUITA, R., 2017; MORÍN & ALVARADO, 2017). Neste caso específico, foi utilizado o indicador de viabilidade econômica chamado de *payback*, que permite determinar o tempo de recuperação do investimento. Este indicador é útil para a tomada de decisão entre diferentes alternativas (ROCHA *et al.*, 2016).

Assume-se, neste trabalho, que a construção de uma Estação de Tratamento de Água custa cerca de R\$ 300 milhões com a capacidade de 53 milhões de litros por dia, o que representa uma capacidade de 1.060 milhões de litros ao mês, considerando um mês como 20 dias úteis (DE OLIVEIRA, 2019). Portanto, para uma ETA de capacidade pequena, haveria 300 carros-pipa com carga média de 30 mil litros por dia, a produzir 9 milhões de litros ao mês. Estas mesmas avaliações

para as construções das ETAs com capacidades médias (1.500 carro-pipa) e grandes (2.600 carro-pipa) foram realizadas, obtendo-se os custos de construção, explanados na tabela 16.

**Tabela 16:** Resumo de produção requerida (em milhões de litros de água) e custo de construção da ETA (em reais)

Capacidade	Produção Total (milhões de litros de água) ao mês	Custo de Construção da ETA (R\$)
Pequeno	9	\$ 2.547.169,81
Médio	45	\$ 12.735.849,06
Grande	78	\$ 22.075.471,70

**Fonte:** Elaboração própria

A partir das economias obtidas na seção 4.1 e os possíveis custos de construção para as novas ETAs, pode-se obter o *payback* para estes investimentos. A análise de *payback* foi realizada para o cálculo do retorno do investimento em meses para cada um dos estados da pesquisa, aplicando-se a seguinte expressão:

$$Retorno \text{ (em meses)} = \frac{Custo \text{ da construção} (\$R)}{Economia \text{ anual obtida} (\$R)} * 12 \quad (6)$$

#### 4.2.1. Análise de viabilidade econômica para o estado de Alagoas

Aplicando os cálculos definidos anteriormente, obteve-se os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado de Alagoas, conforme a tabela 17.

**Tabela 17:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Alagoas

<b>Cenário 1</b>						
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>		<b>Custo de Construção da ETA</b>		<b>Retorno (meses)</b>
Pequeno	13,07%	R\$	5.036.958	R\$	2.547.170	6
Médio	26,52%	R\$	10.218.286	R\$	12.735.849	15
Grande	26,75%	R\$	10.307.201	R\$	22.075.472	26
<b>Cenário 2</b>						
Pequeno	10,11%	R\$	3.895.861	R\$	2.547.170	8
Médio	17,97%	R\$	6.921.101	R\$	12.735.849	22
Grande	19,57%	R\$	7.537.907	R\$	22.075.472	35
<b>Cenário 3</b>						
Pequeno	16,76%	R\$	6.456.797	R\$	5.094.340	9
Médio	31,18%	R\$	12.010.448	R\$	25.471.698	25
Grande	31,21%	R\$	12.022.046	R\$	44.150.943	44

**Fonte:** Elaboração própria

Analisando a tabela 17, observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é relativamente rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno porte. Portanto, o cenário que tem o retorno mais rápido em meses é o cenário 1, em que construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 6 meses. O cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, porém é inferior a 4 anos.

Além disso, se a escolha for de construir duas ETAs de médio porte, os ganhos de 31,18% são praticamente os mesmos obtidos com a construção das ETAs de grande porte, que são de 31,21% com um retorno de 44 meses.

#### **4.2.2. Análise de viabilidade econômica para o estado de Sergipe**

Ao aplicar os cálculos definidos anteriormente, obteve-se os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado de Sergipe, como observa-se na tabela 18.

**Tabela 18:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Sergipe

<b>Cenário 1</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>	
Pequeno	6,83%	R\$ 879.551	R\$ 2.547.170	35	
Médio	8,16%	R\$ 1.051.916	R\$ 12.735.849	145	
Grande	8,16%	R\$ 1.051.916	R\$ 22.075.472	252	
<b>Cenário 2</b>					
Pequeno	5,65%	R\$ 728.249	R\$ 2.547.170	42	
Médio	5,65%	R\$ 728.249	R\$ 12.735.849	210	
Grande	5,65%	R\$ 728.249	R\$ 22.075.472	364	
<b>Cenário 3</b>					
Pequeno	8,91%	R\$ 1.147.629	R\$ 5.094.340	53	
Médio	9,87%	R\$ 1.271.204	R\$ 25.471.698	240	
Grande	9,87%	R\$ 1.271.204	R\$ 44.150.943	417	

**Fonte:** Elaboração própria

Segundo a tabela 18, nota-se que para os três cenários, o retorno em meses é relativamente rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno porte. Porém, deve-se salientar que para ETAs de porte médio e grande o retorno é mais lento.

O cenário que tem o retorno mais rápido em meses é o cenário 1, o qual construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 35 meses. O cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, sendo de 35 anos aproximadamente. No entanto, um ponto interessante, é que se a escolha for de construir duas ETAs de médio porte, os ganhos de 9,87% são os mesmos obtidos com a construção das ETAs de grande porte, mas o retorno em meses varia de 240 e 417 meses, respectivamente.

#### **4.2.3. Análise de viabilidade econômica para o estado do Ceará**

Os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado do Ceará são apresentados na tabela 19. Observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é relativamente rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno porte.

**Tabela 19:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado do Ceará

<b>Cenário 1</b>						
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>		<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>	
Pequeno	7,85%	R\$	11.357.056	R\$	2.547.170	3
Médio	10,23%	R\$	14.806.474	R\$	12.735.849	10
Grande	10,23%	R\$	14.806.474	R\$	22.075.472	18
<b>Cenário 2</b>						
Pequeno	9,25%	R\$	13.386.902	R\$	2.547.170	2
Médio	15,49%	R\$	22.416.228	R\$	12.735.849	7
Grande	16,27%	R\$	23.548.394	R\$	22.075.472	11
<b>Cenário 3</b>						
Pequeno	10,81%	R\$	15.644.033	R\$	5.094.340	4
Médio	19,43%	R\$	28.122.645	R\$	25.471.698	11
Grande	20,21%	R\$	29.254.410	R\$	44.150.943	18

**Fonte:** Elaboração própria

O cenário que tem o retorno mais rápido em meses é o cenário 2, em que construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 2 meses. Por sua vez, o cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, porém ele é inferior a 2 anos. No entanto, se a escolha for de construir duas ETAs de médio porte, os ganhos de 19,43% são praticamente os mesmos obtidos com a construção das ETAs de grande porte (20,21%), mas com um retorno em 18 meses.

#### **4.2.4. Análise de viabilidade econômica para o estado de Rio Grande do Norte**

Os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado do Rio Grande do Norte são apresentados na tabela 20. Analisando a referida tabela, observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é relativamente rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno ou médio porte.

**Tabela 20:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Rio grande do Norte

<b>Cenário 1</b>						
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>		<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>	
Pequeno	4,42%	R\$	6.117.134	R\$	2.547.170	5
Médio	5,53%	R\$	7.656.416	R\$	12.735.849	20
Grande	5,65%	R\$	7.821.715	R\$	22.075.472	34
<b>Cenário 2</b>						
Pequeno	5,83%	R\$	8.073.530	R\$	2.547.170	4
Médio	9,04%	R\$	12.508.878	R\$	12.735.849	12
Grande	9,28%	R\$	12.839.343	R\$	22.075.472	21
<b>Cenário 3</b>						
Pequeno	6,67%	R\$	9.238.222	R\$	5.094.340	7
Médio	10,49%	R\$	14.516.063	R\$	25.471.698	21
Grande	10,71%	R\$	14.817.468	R\$	44.150.943	36

**Fonte:** Elaboração própria

O cenário que tem o retorno mais rápido em meses é o cenário 2, em que para uma ETA de pequeno porte, o retorno do investimento é de 4 meses. O cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, porém igual a 3 anos. Importante mencionar que, se a escolha for de construir duas ETAs de médio porte, os ganhos de 10,49% são praticamente os mesmos obtidos com a construção das ETAs de grande porte de 10,71%, e um retorno em meses de aproximadamente 36 meses.

#### **4.2.5. Análise de viabilidade econômica para o estado da Paraíba**

Os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado da Paraíba são apresentados na tabela 21, que de acordo, observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno ou médio porte.

**Tabela 21:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado da Paraíba

<b>Cenário 1</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>	
Pequeno	9,78%	R\$ 25.686.685	R\$ 2.547.170		1
Médio	14,01%	R\$ 36.790.388	R\$ 12.735.849		4
Grande	16,38%	R\$ 42.994.704	R\$ 22.075.472		6
<b>Cenário 2</b>					
Pequeno	10,44%	R\$ 27.405.930	R\$ 2.547.170		1
Médio	17,18%	R\$ 45.099.069	R\$ 12.735.849		3
Grande	21,15%	R\$ 55.536.376	R\$ 22.075.472		5
<b>Cenário 3</b>					
Pequeno	12,14%	R\$ 31.860.874	R\$ 5.094.340		2
Médio	21,59%	R\$ 56.675.207	R\$ 25.471.698		5
Grande	26,67%	R\$ 70.006.582	R\$ 44.150.943		8

**Fonte:** Elaboração própria

Os cenários que têm o retorno mais rápido em meses são os cenários 1 e 2, dos quais construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 1 mês. O cenário 3 é o que leva mais tempo para obter o retorno do investimento, porém inferior a 1 ano.

#### **4.2.6. Análise de viabilidade econômica para o estado de Piauí**

Os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondente ao estado do Piauí são apresentados na tabela 22. Observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno ou médio porte.

**Tabela 22:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado de Piauí

<b>Cenário 1</b>				
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>	<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>
Pequeno	10,43%	R\$ 16.575.786	R\$ 2.547.170	2
Médio	15,76%	R\$ 25.050.566	R\$ 12.735.849	6
Grande	18,30%	R\$ 29.086.264	R\$ 22.075.472	9
<b>Cenário 2</b>				
Pequeno	11,88%	R\$ 18.881.176	R\$ 2.547.170	2
Médio	19,64%	R\$ 31.222.089	R\$ 12.735.849	5
Grande	20,86%	R\$ 33.154.756	R\$ 22.075.472	8
<b>Cenário 3</b>				
Pequeno	13,99%	R\$ 22.232.082	R\$ 5.094.340	3
Médio	26,98%	R\$ 42.883.943	R\$ 25.471.698	7
Grande	29,91%	R\$ 47.545.778	R\$ 44.150.943	11

**Fonte:** Elaboração própria

Os cenários que têm o retorno mais rápido em meses são os cenários 1 e 2, em que construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 2 meses. O cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, sendo inferior a 1 ano.

#### **4.2.7. Análise de viabilidade econômica para o estado de Pernambuco**

Obteve-se os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado do Pernambuco, como são apresentados na tabela 23. De acordo com a tabela 23, observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é rápido quando as ETAs a serem construídas são principalmente de pequeno ou médio porte.

**Tabela 23:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado do Pernambuco

<b>Cenário 1</b>						
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>		<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>	
Pequeno	10,59%	R\$	32.118.293	R\$	2.547.170	1
Médio	14,20%	R\$	43.067.361	R\$	12.735.849	4
Grande	15,95%	R\$	48.376.796	R\$	22.075.472	5
<b>Cenário 2</b>						
Pequeno	10,70%	R\$	32.445.026	R\$	2.547.170	1
Médio	14,68%	R\$	44.543.589	R\$	12.735.849	3
Grande	14,91%	R\$	45.233.580	R\$	22.075.472	6
<b>Cenário 3</b>						
Pequeno	12,68%	R\$	38.467.780	R\$	5.094.340	2
Médio	18,68%	R\$	56.665.881	R\$	25.471.698	5
Grande	20,00%	R\$	60.666.920	R\$	44.150.943	9

**Fonte:** Elaboração própria

Os cenários que têm o retorno mais rápido em meses são os cenários 1 e 2, dos quais construindo a ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno em 1 mês. O cenário 3 é o que leva mais tempo para obter o retorno do investimento, porém ainda é inferior a 1 ano.

#### **4.2.8. Análise de viabilidade econômica para o estado da Bahia**

Os custos de construção da ETA para cada um dos cenários correspondentes ao estado da Bahia são apresentados na tabela 24. Observa-se que para os três cenários, o retorno em meses é rápido para as diferentes capacidades das ETAs.

**Tabela 24:** Resumo dos retornos em meses para cada cenário para o estado da Bahia

<b>Cenário 1</b>					
<b>Capacidade</b>	<b>Economia (%)</b>	<b>Economia (R\$)</b>		<b>Custo de Construção da ETA</b>	<b>Retorno(meses)</b>
Pequeno	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 2.547.170	2
Médio	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 12.735.849	9
Grande	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 22.075.472	15
<b>Cenário 2</b>					
Pequeno	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 2.547.170	2
Médio	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 12.735.849	9
Grande	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 22.075.472	15
<b>Cenário 3</b>					
Pequeno	12,70%	R\$	17.862.971	R\$ 5.094.340	3
Médio	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 25.471.698	17
Grande	12,61%	R\$	17.729.665	R\$ 44.150.943	30

**Fonte:** Elaboração própria

Os cenários que têm o retorno mais rápido em meses são mais uma vez os cenários 1 e 2, em que construindo uma ETA de pequeno porte, obtém-se o retorno do investimento em 2 meses. O cenário que leva mais tempo para obter o retorno do investimento é o 3, levando menos de 3 anos.

Por fim, deve-se salientar que uma análise mais rigorosa destes valores de construção será realizada numa extensão deste projeto, pois dependendo do tipo do terreno ou das distâncias dos mananciais que fornecerão água para estas novas ETAs, estes custos de construção devem variar.

Os custos adicionais, como os da operação e manutenção das plantas de tratamento de água, devem ser também considerados em estudos futuros. Esta primeira análise realizada neste trabalho é extremamente importante, pois já demonstra que há um limite dos ganhos a serem obtidos, mesmo com ETAs com grandes capacidades para cada um dos estados da pesquisa, assim como o retorno esperado do investimento no momento de construção das novas ETAs.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação foi propor um modelo de otimização para minimizar os custos de transporte e distribuição de água da Operação Carro-Pipa (OCP). Neste modelo de otimização, foi analisada a inclusão de novas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

Após a implementação e desenvolvimento do modelo de otimização, foram obtidos resultados relevantes em termos de minimização de custos e economias em distâncias percorridas para cada um dos estados da pesquisa, que incluem Alagoas, Sergipe, Paraíba, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará. Além disso, três cenários diferentes foram considerados, os quais as ETAs têm capacidade de porte pequena (300 entregas), médio (1500 entregas) e grande (2600 entregas).

As economias obtidas para os estados analisados variaram de 9,87% a 31,21%. Em particular, Alagoas proporciona uma maior economia de 31,21% e Sergipe a menor economia de 9,87%. As maiores economias foram obtidas para o cenário 3, com a construção de duas novas ETAs com capacidades de grande porte, com exceção da Bahia, que obteve a maior economia quando construindo duas ETAs de pequeno porte. Entretanto, o retorno mais rápido do investimento ocorre com a construção de ETAs de pequeno porte em todos os estados referidos, onde este retorno varia de 1 a 35 meses.

Para concluir, o modelo proposto é relevante e obteve resultados positivos para todos os estados, a beneficiar e otimizar a OCP e reduzir os custos consideravelmente. Ressalta-se que um estudo mais detalhado dos custos da construção das ETAs de diferentes portes considerando onde elas serão construídas deve também ser realizado.

Além disso, esta pesquisa tem impactos favoráveis, tanto econômicos quanto sociais, e, sobretudo, na saúde das comunidades, pela diminuição de doenças causadas devido ao atual fornecimento inadequado da qualidade da água.

### 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Dentro das limitações do trabalho, encontram-se a falta de dados atualizados relacionados com a OCP. Além disso, algumas das limitações dão encontradas no momento de rodar os dados

no *MATLAB*, pois às vezes para obter a solução ótima e os dados de saída, o tempo de processamento é muito elevado dependendo da quantidade de dados das matrizes de entrada e o número das PAs.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

Pesquisas para estudos futuros incluem implementar o modelo em outros estados ou segundo a necessidade em outras regiões do Brasil, com a possibilidade de retirada ou adição de vários pontos de abastecimento, e não somente da adição de no máximo dois pontos de abastecimento, como nesta pesquisa. Além disso, outros custos como os de manutenção e operação das plantas de tratamento de água podem ser considerados para pesquisas futuras.

Por último, para a localização das novas ETAs, poder-se-ia considerar fatores como a localização próxima de mananciais ou a precipitação de chuvas nas regiões. Estes são fatores importantes, uma vez que podem fazer com que as novas ETAs construídas sejam sustentáveis quanto ao fornecimento de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2018). *Conjuntura Recursos Hídricos Brasil*. Informe Anual. Agencia Nacional de Águas. Brasília-DF, Brasil.72 p.
- ANA (2020). *Divisões hidrográficas do Brasil*. Disponível em: > <https://www.gov.br/ana/pt-br> > Acesso em: 28 de Dez de 2020.
- ABDEL-BASSET, M., MANOGARAN, G., RASHAD, H. & ZAIED, A. (2018). *A comprehensive review of quadratic assignment problem: variants, hybrids and applications*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. Doi:10.1007/s12652-018-0917-x.
- AHMADI, A., KARAMOUZ, M., MORIDI, A. & HAN, D. (2012). *Integrated planning of land use and water allocation on a watershed scale considering social and water quality issues*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 138. 671-681. Doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000212.
- ARCGIS (2021). *ArcGIS Online*. Disponível em: ><https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview> > Acesso em: 24 de Fevereiro de 2021.
- AZIZIFARD A., ARKAT, J & FARUGHI, H. (2020). *Sustainable Surface Water Management and Wastewater Treatment Plant Location: A Case Study of Urmia Lake*. International Journal of Engineering (IJE), IJE TRANSACTIONS A: Basics Vol. 33, No. 4, (April 2020) 621-630.Doi: 10.5829/ije.2020.33.04a.13.
- ANGHILERI, D., CASTELLETTI, A., PIANOSI, F., SONCINI-SESSA, R. & WEBER, E. (2013). *Optimizing watershed management by coordinated operation of storing facilities*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 139, No. 5, 492-500. Doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000313.
- BARDINE, R. (2020). *Polígono das Secas. Geografia do Brasil*. Disponível em: > <https://www.coladaweb.com/geografia-do-brasil/poligono-das-secas> >. Acesso em: 8 de Janeiro de 2021.
- BASSOU, A., HLYAL, M., SOULHI, J. & ALAMI, J. (2016). *New variable neighborhood search method for a two level capacitated location allocation problem*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 83(3), 442–451. ISSN: 1992-8645.
- BENDER, T., HENNES, H., KALCSICS, J., MELO, M.T. & NICKEL, S. (2002). *Location software and interface with GIS and supply chain management*. Facility Location: Applications and Theory. Doi: 10.1007/978-3-642-56082-8\_8.
- CAI, X., LASDON, L. AND MICHELSEN, A.M. (2004). *Group decision making in water resources planning using multiple objective analysis"*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 130. 4-14 p. Doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(4).

- CAMPOS, M. (2020). *Ceará*. Disponível em: < <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/ceara.htm> >. Acesso em: 18 de Dezembro de 2020.
- CAMPOS, M. (2020). *Sergipe*. Disponível em: < <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/sergipe.htm> > Acesso em: 17 de Dezembro de 2020.
- CARMUÇA, C.E., BRAGA, A., CARMUÇA, E. & MORAIS, V. (2016). *Implicações psicossociais da seca na vida de moradores de um município da zona rural do nordeste do Brasil*. Universidade Federal do Ceará, Brasil. Vol. 34 Núm.1(2016). Doi: dx.doi.org/10.12804/apl34.1.2016.08.
- CEARÁ TRANSPARENTE (2020). *Transparência*. Disponível em: <<https://ceartransparente.ce.gov.br/portal-da-transparencia/paginas/o-estado-do-ceara?locale=pt-BR> > Acesso em: 18 de dezembro de 2020.
- CEMADEN (2017). *Situação Atual da Seca no Semiárido e Impactos – Março de 2017*. Disponível em: < <http://www2.cemaden.gov.br/situacao-atual-da-seca-no-semiarido-e-impactos-marco-de-2017/> > Acesso em: 8 de maio de 2020.
- COLSON, G. & DORIGO, F. (2004). *A public warehouses selection support system*. European Journal of Operational Research. Vol. 153, No. 2, pp. 332-349. Doi: 10.1016/S0377-2217(03)00156-5.
- CHOUDHURY (2019). *Optimal location selection for installation of surface water treatment plant by Gini coefficient-based analytical hierarchy process*. Environment, Development and Sustainability. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00373-w>.
- CHURCH, R.L. & MURRAY, A.T. (2009). *Business Site Selection, Location Analysis and GIS*. Wiley, New York. 320 p.
- CNT (2018). *Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada*. Disponível em: <<https://bit.ly/3uomNco> > Acesso em: 22 de Fevereiro de 2021.
- DA SILVA, J.X. (2009). *O que é Geoprocessamento?. Conceito não pode ser confundido com todo o conjunto das geotecnologias, como o Sensoriamento Remoto, a Cartografia e os Sistemas de Posicionamento Global (GPS)*. Revista do Crea-RJ. Coordenador do Laboratório de Geoprocessamento. Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- DA SILVA, A.J., FONTES, D. & IRANILDO, T. (2017). *Particularidades da região Nordeste do Brasil: revisão de Literatura*. Nutritime Revista Eletrônica, on-line, Viçosa, v.14, n.5, p.7015-7018, set/out, 2017. ISSN: 1983-9006.

- DE OLIVEIRA, G. (2019). *Aplicação de modelo de otimização para distribuição de água por meio de carros-pipa com a construção de novas estações de tratamento de água*. Trabalho de graduação. Universidade de Brasília. Distrito Federal. 51 p.
- DE OLIVEIRA, M., FARIAS, B., VELASQUES, J., CORRÊA, F., MAGALHÃOES, F., CAVALHERI, P. & MIGLIOLO, L. (2020). *Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment*. *Science of the total environment*. Vol.705.m Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135568.
- DELIVAND, M.K., CAMMERINO, A.R., GAROFALO, P. & MONTELEONE, M. (2015). *Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: a case study on electricity productions in South Italy*. *Journal of Cleaner Production*. 129-139 p. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.018.
- DIVA-GIS (2021). *Diva-GIS*. Disponível em: > <https://www.diva-gis.org/> > Acesso em: 22 de Fevereiro de 2021.
- DURMAZ, Y.G & BILGEN, B. (2020). *Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design*. *Applied Energy*. Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115259.
- EOS (2017). *As grandes dificuldades da Distribuição da água no Brasil*. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/dificuldades-distribuicao-da-agua-no-brasil/>> Acesso em: 28 de Dezembro de 2020.
- ESAN (2020). *Profitability indicators in investment projects, what are they?*(In Spanish). Disponível em: < <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2020/02/indicadores-de-rentabilidad-en-proyectos-de-inversion-cuales-son/> > Acesso em: 16 de novembro de 2021.
- ESCOBAR, J., LINFATI, R. & TOTH, P. (2013). *A two-phase hybrid algorithm for the capacitated location-routing problem*. *COR*, 40(1), 70-79 p. Doi:10.1016/j.cor.2012.05.008.
- ESRI (2021). *Acerca de ArcGIS*. Disponível em: < <https://www.esri.co/es-co/productos/arcgis/inicio> > Acesso em: 24 de Fevereiro de 2021.
- FERREIRA, D. (2019). *Tudo o que você precisa saber sobre a malha rodoviária brasileira*. Disponível em: > <https://academiadalogistica.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-a-malha-rodoviaria-brasileira/> > Acesso em: 22 de Fevereiro de 2021.
- FERNANDO, J. (2021). *Net Present Value (NPV)*. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp> > Acesso em: 16 de novembro de 2021.
- FORMAGGIA, D.M. & GARCIA, R.M. (2021). *Legislação brasileira de potabilidade de água para consumo humano: evolução e involução*. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/legislacao-brasileira-potabilidade-agua-evolucao/>> Acesso em: 15 de novembro de 2021.

- GASPAR, L. (2009). *El Nordeste de Brasil*. Pesquisa Escolar Online, Fundação Joaquim Nabuco, Recife. Disponível em: <[http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar\\_es/](http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar_es/)>. Acesso em: 13 Fevereiro 2020.
- GEOMETRÍA ANALÍTICA (2021). *Sistema de Coordenadas*. Disponível em: ><https://www.geometriaanalitica.info/sistema-de-coordenadas-cartesianas-polares-cilindricas-esfericas/#sistema-de-coordenadas-cartesianas-en-el-plano> > Acesso em: 17 de Fevereiro de 2021.
- GOLDMAN, A.J. (1969). *Optimal location for centers in a network*. Transportation Science. Vo.3(4):352–360. Doi.org/10.1287/trsc.3.4.352.
- GOVERNO DO BRASIL (2019). *Operação Carro-Pipa federal garante abastecimento a mais de dois milhões de pessoas*. Disponível em: < <https://www.gov.br/pt-br/noticias/assistencia-social/2019/12/operacao-carro-pipa-federal-garante-abastecimento-a-mais-de-2-milhoes-de-pessoas> > Acesso em: 16 de Fevereiro de 2021.
- GOVERNO DO ESTADO (2020). *Geografia de Pernambuco*. Disponível em: <<https://bit.ly/3h0U86C>> Acesso em: 18 de dezembro de 2020.
- GUITARRARA, P. (2020). *Bahia*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/bahia.htm> > Acesso em: 21 de Dezembro de 2020.
- GUZMÁN, B., BEVILACQUA, P. & NAVA, G. (2015). *Local contexts of drinking-water quality surveillance: Brazil and Colombia* (In Spanish). Revista de Salud publica. 1-15 p. Doi: 10.15446/rsap.v17n6.40977.
- HALE, T. & MOBERG, C. (2003). *Location Science Research: A Review*. Annals of Operations Research 123, 21–35, 2003. Doi: 10.1023/A:1026110926707.
- HAMÚ, D., COSTA, L. & ROIPHE, S. (2006). *Água para a vida, Água para todos*. Cadernos de Educação Ambiental Água para Vida, Água para Todos. Livro das Águas. SBN - 85-86440-18-3. Brasília: WWF-Brasil. 68 p.
- HIDAKA, K.K. & OKANO, H. (1997). Simulation based approach to the warehouse location problem for a large-scale real instance. In Proceedings of the 1997 winter simulation conference. Kanagawa, Japan. 1-8 p.
- HILLIER, S. & LIEBERMAN, J. (2013). *Introdução á pesquisa operacional*. AMGH Editora. 9a edição. São Paulo. 989 p.
- HIRSCHFELD, H (2000). *Engenharia econômica e Análise de Custos*. 7a edição. São Paulo: Atlas 2000.
- IGBE (2011). *Censo demográfico população de habitantes*. Disponível em: < <https://bit.ly/38wPg4Y> >. Acesso em: 6 Julho de 2020.

- IBGE (2020). *Paraíba*. Disponível em > <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb.html> > Acesso em: 18 de Dezembro de 2020.
- IBGE (2020). *Piauí*. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/panorama> > Acesso em 18 de Dezembro de 2020.
- IBGE (2020). *Bahía*. Disponível em: > <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba.html>> Acesso em 21 de Dezembro de 2020.
- IBGE (2021). *O IBGE*. Disponível em: > <https://www.ibge.gov.br/aceso-informacao/institucional/o-ibge.html> > Acesso em: 22 de Fevereiro de 2021.
- IBGE (2021). *O que é cartografia, Coordenadas geográficas*. Disponível em: ><https://atlascolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/coordenadas-geogra-ficas.html> > Acesso em: 17 de Fevereiro de 2021.
- JADE, L. (2020). *Onde está a água no Brasil*. Disponível em: < <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/> > Acesso em 28 de Dezembro de 2020.
- JAYARATHNA, L., KENT, G., O'HARA, I. & HOBSON, P (2020). *A Geographical Information System based framework to identify optimal location and size of biomass energy plants using single or multiple biomass types*. *Applied Energy, Elsevier*. Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115398.
- KLOSE, A. & DREXL, A. (2003). *Facility location models for distribution system design*. *European Journal of Operational Research* 162 (2005) 4–29. Doi: 10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- LEMOS, S. (2020). *Dados da ONU mostram que 15 mil pessoas morrem por doenças ligadas à falta de saneamento*. Disponível em: < <https://jornal.usp.br/atualidades/dados-da-onu-mostram-que-15-mil-pessoas-morrem-anualmente-por-doencas-ligadas-a-falta-de-saneamento/>> Acesso em: 15 de novembro de 2021.
- LI, Y.P., HUANG, G.H. & NIE, S.L. (2006). *An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty*. *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 5, 776-789. Doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.07.008.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F, MAQUIRE, D.J. & RHIND, D.W (2005) *Geographic Information Systems and Science*. Jhon Wiley. New York, USA. pp 4-33.
- MAHTO, D. (2012). *Essentials of Operations Research*. Introduction to Operation Research. Chapter 1. Academia. 1 Dezembro de 2021.

- MARTEL, A. & VANKATADRI, U. (1999). *Optimizing supply network structures under economies of scales*. IEPM Conference Proceedings. Québec, Canada. 1-10 p.
- MASSOUD, M., TARHINI, A. & NASR, J. (2009). *Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries*. Journal of environmental management. Doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.001.
- MATHWORKS (2021). *MATLAB*. Disponível em: ><https://la.mathworks.com/products/matlab.html> > Acesso em: 9 de março de 2021.
- MELO, T., NICKEL, S. & SALDANHA-DA-GAMA, F. (2008). *Facility location and supply chain management – A review*. European Journal of Operational Research. 196(2):401-412. Doi: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- MESQUITA, R. (2017). *What is Payback and how to calculate your company's payback?*. Disponível em: < <https://rockcontent.com/es/blog/payback/> > Acesso em: 16 de novembro de 2021.
- MICHEL, L & VAN HENTERNYCK, P (2004). *A simple tabú search for warehouse location*. European Journal of Operation Research. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00247-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00247-9).
- MINISTERIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (2019). *Defesa Civil Nacional atende mais de 700 municípios com Operação Carro Pipa*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/defesa-civil-nacional-atende-mais-de-700-municipios-com-operacao-carro-pipa>> Acesso em: 16 de Fevereiro de 2021.
- MINISTERIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (2019). *Governo Federal estuda otimização da Operação Carro-Pipa para ampliar abastecimento*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/governo-federal-estuda-otimizacao-da-operacao-carro-pipa-para-ampliar-abastecimento> > Acesso em: 16 de Fevereiro de 2021.
- MINISTÉRIO DA DEFESA (2019). *Operação carro-pipa beneficia quase 2 milhões de pessoas*. Disponível em: < <https://www.gov.br/defesa/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/ultimas-noticias/operacao-carro-pipa-beneficia-quase-2-milhoes-de-pessoas> > Acesso em: 17 de Fevereiro de 2020.
- MINISTÉRIO DA DEFESA (2020). *Operação Carro Pipa*. Disponível em: <<https://www.6rm.eb.mil.br/index.php/operacao-pipa> > Acesso em: 15 de maio de 2020
- MINISTERIO DO DESENVOLVIMNTO REGIONAL (2019). *Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD*. Disponível em: > <https://antigo.mdr.gov.br/protecao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad> > Acesso em: 17 de Fevereiro de 2021.

- MOARSE, P. & KIMBAL, G.E. (1949). *Methods of Operation Research*. National Defense Committee. Summary technical report of the National Defense Research Committee. Office of Scientific Research and Development, National Defense Research Committee, Division 6, 1946. Washington, D.C.
- MOCAYO, L. (2014). *Algoritmos especiales: el problema de transporte*. Investigación de operaciones. Martínez, I.A., Vértiz, C.G., López, P.J., Jiménez, L.G. & Moncayo, M.L. (eds). México, D.F.149-188 p.
- MORÍN, E. & ALVARADO, M.L (2017). *Profitability indicato*. Centro de Estudios para la preparación y Evaluación Socioeconómica de proyectos (CEPEP). Boletín Numero V. 1-10 p. México, D,F.
- MOYA, M. (1998). *Transporte y Asignación*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 17-19 pg. ISBBN: 9977-64-544-2.
- MUGA, H. & MIHELICIC, J. (2008). *Sustainability of Wastewater treatment technologies*. Journal of Environmental Management. 437-447 p. Doi: 10.1016/j.jenvman.2007.03.008.
- MÜLLER, S., & HAASE, K. (2014). *Customer segmentation in retail facility location planning*. Business Research, 7(2). 235–261 p. Doi: /10.1007/s4068 5-014-0008-6.
- MURAWSKI, L. & CHURCH, R.L (2009). *Improving accessibility to rural health services: the maximal covering network improvement problem*. Socio-Economic Planning Sciences. 102–110 p. Doi: 10.1016/j.seps.2008.02.012.
- MURRAY, A.T & TONG, D. (2009). *GIS and spatial analysis in the media*. Applied Geography 29:250–259. Doi:10.1016/j.apgeog.2008.09.002.
- MCGIVNEY, W., & KAWAMURA, S. (2008). *Cost Estimating Manual for Water Treatment Facilities*. Jhon Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey/Canada. 205 p. Doi.org/10.1002/9780470260036.
- NARULA, S. C. (1986). *Minisum hierarchical location-allocation problems on a network: A survey*. Annals of Operations Research. 255–272 p. Doi: 10.1007/BF020 23745.
- NOVAES, A. (2007). *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Editorial Elsevier Ltda. Rio de Janeiro: 2007. 303-327 Pg. ISBN 978-85-352-2415-3.

- O'KELLY, M.E (1987). *A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities*. European Journal of Operational Research. 32, 393–404. Doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3.
- OXLEY R.L., MAYS, L.W. & MURRAY, A. (2016). *Optimization model for the sustainable water resource management of river basins*. Water Resources Management. Vol. 30, No. 9, 3247- 3264. Doi: 10.1007/s11269-016-1345-3.
- OZSEN, L., Coullard, C. & DASKIN, M. (2008). *Capacited warehouse location model with risk polling*. Naval Research Logistics (NRL), Vol. 55, pp. 295–312. Doi:10.1002/nav.2028.
- PARTYKA, J. G. & HALL, R. W. (2000). *On the Road to Service*. Disponível em: <<https://bit.ly/3ntq59o>> Acesso em: 7 de Janeiro, 2020.
- PARTOVI, F. (2006). *An analytic model for locating facilities strategically*. Omega. Vol. 34, No. 1, pp. 41-44. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.018>
- PENA, R. (2020). *Por que no Nordeste há seca?*. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/por-que-nordeste-seco.htm> > Acesso em: 17 de fevereiro de 2020.
- PRINS, C., PRODHON, C., RUIZ, A., SORIANO, P. & WOLFLER, R. (2007). *Solving the capacitated Location-Routing Problem by a Cooperative Lagrangean Relaxation-Granular Tabu Search Heuristic*. Transportation Science. 41(4), 470-483. Doi 10.1287/trsc.1060.0187.
- QGIS (2021). *Sistemas de Referencia de Coordenadas*. Disponível em: >[https://docs.qgis.org/2.14/pt\\_BR/docs/gentle\\_gis\\_introduction/coordinate\\_reference\\_systems.html](https://docs.qgis.org/2.14/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/coordinate_reference_systems.html) > Acesso em: 17 de Fevereiro de 2021.
- RIBEIRO, A. (2003). *Geografia do Piauí*. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/geografia/geografia-do-piaui/> > Acesso em: 18 de Dezembro de 2020.
- RIBEIRO, R. (2020). *Introdução a conceitos de geoprocessamento e sensoramento remoto*. Disciplina de Geoprocessamento. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 1 de setembro de 2020.
- ROCHA, E., DE SOUZA, C. & OLIVEIRA, V. (2016). *Estudo de viabilidade econômica financeira caso modelo – edificação em São João Del Rei – Minas Gerais*. XIII Simpósio de Excelência em gestão e Tecnologia. Brasil.1-16p.

- ROOZBAHANI, R., SCHREIDER, S. & ABBASI, B (2015). *Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences*. Environmental Modelling & Software, Vol. 64. 18-30 p. Doi: 10.1016/j.envsoft.2014.11.001.
- SETUR (2020). *O Rio Grande do Norte*. Disponível em: < <https://setur.rn.gov.br> > Acesso em: 17 de Dezembro de 2020.
- SINGH, R., CHAUDHARY, N. & SAXENA, N. (2018). *Selection of warehouse location for a global supply chain: A case study*. IIMB Management Review. Doi: 10.1016/j.iimb.2018.08.009.
- SÓ GEOGRAFIA (2020). *Paraíba*. Disponível em: <<https://www.sogeografia.com.br/Conteudos/Estados/Paraiba/>> Acesso em 17 de Dezembro de 2020.
- SULTANA, A. & KUMAR, A. (2012). *Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system*. Applied Energy. 192-201p. Doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.052.
- SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (2017). *Delimitação do Semiárido*. Disponível em: < <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido> > Acesso em: 8 de Janeiro de 2021.
- SCOTT, A. J. (1970). *Location-Allocation Systems: A Review*. Geographical Analysis. 95-119 p. Doi: 10.1111/j.1538-4632.1970.tb00149.x.
- SHARMA, R. R. K. & BERRY, V. (2007). *Developing new formulations and relaxations of single stage capacitated warehouse location problem (SSCWLP): Empirical investigation for assessing relative strengths and computational effort*. European Journal of Operational Research, Vol. 177, No. 2, pp. 803-812. Doi: org/10.1016/j.ejor.2005.11.028.
- TABARI, M.M & YAZDI, A. (2014). *Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: case study Piranshahr*. Water Resources Management, Vol. 28, No. 7, 1887-1906. Doi:10.1007/s11269-014-0578-2.
- TANSEL, B., FRANCIS, R.L. & LOWE, T.J. (1983). *State of the Art—Location on Networks: A Survey. Part II: Exploiting Tree Network Structure*. Management Science. 498-511. Doi: 10.1287/mnsc.29.4.498.
- TEO, C. & SHU, J. (2003). *Warehouse-Retailer Network Design Problem*. Operations Research 52 (2003) 396–408. Doi: 10.1287/opre.1030.0096.

- TORO, E.M., ESCOBAR, A.H. & GRANADA, M. (2016). *Literature review on the vehicle routing problem in the green transportation context*. Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Luna Azul. ISSN 1909-2474. Doi: 10.17151/luaz.2016.42.21.
- TURKOGLU, D. & GENEVOIS, M. (1989). *A comparative survey of service facility location problems*. Annals of Operations Research. Doi:10.1007/s10479-019-03385-x.
- TZENG, G. & CHEN, Y. (1999). The optimal location of airport fire stations: a fuzzy multi-objective programming and revised genetic algorithm approach. *Transportation Planning and Technology Journal*. Doi:10.1080/03081069908717638.
- ZHAO, Y.W., QIN, Y., CHEN, B., ZHAO, X., LI, Y., YIN, X.A. & CHEN, G.Q. (2009). *GIS-based optimization for the locations of sewage treatment plants and sewage outfalls—A case study of Nansha District in Guangzhou City, China*. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. Vol. 14, No. 4, 1746-1757. Doi:10.1016/j.cnsns.2007.12.016.

## APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS

	Autores	Área de pesquisa	Objetivos da pesquisa	Método	Abordagem	Variáveis
Localização e capacidade de armazéns	Jayaraman, V; Pirkul, H	<i>Decision-making problems</i>	Implementação de um modelo integral logístico para tomada de decisões	Algoritmo de relaxação Lagrangian	Procedimento Heurístico	O armazém, planta e consumidor
	Jayaraman, V; Ross, A	<i>Decision-making problems</i>	Encontrar a melhor estratégia para selecionar os melhores centros de distribuição e quantidade do produto	Simulação Annealing (SA)	Procedimento Heurístico	Consumidor, Cross-dock; Armazém
	Cordeau, Jean-Francois; Pasin, Federico; Solomon, Marius M.	<i>Decision-making problems</i>	Formulação que integra as opções de localização e capacidade de plantas e armazéns	Descomposição de Bender; Modelo Algoritmico de relaxação de LP	Determinístico	Comodities, Origens, Destinos para cada commodity, Armazéns, Fornecedores, Pantas, Localização de armazens
	Ozcan, Tuncay; Celebi, Numan; Esnaf, Sakir	<i>Decision-making problems</i>	Como escolher a melhor localização de armazém num caso aplicado no setor de retail	AHP, TOPSIS, ELECTRE, GREY THEORY	Teoria de decisão	Capacidade de stock, Promedio de distancias, Distância até os fornecedores, Movimento Flexível
	Ozsen, Leyla; Coullard, Collette R.; Daskin, Mark S.	<i>Decision-making problems</i>	Modelo de localização de armazém com agrupação de riscos que determina a localização de armazéns, quantidades de entregas desde a planta para o armazém, inventario, etc.	Algoritmo de relaxação Lagrangian	Modelo EOQ	Localização de Centro de Distribuição, Demanda do consumidor e Asignação do Centro de Distribuição
Otimização de localização de depósitos	Zhang, Ying; Qi, Mingyao; Lin, Wei-Hua; Miao, Lixin	<i>Location-routing problem</i>	Modelo baseado em cenários para otimização da ubicação do depósito	Problema de relaxação Lagrangian CLRPMB(Capacitated Location-Routing Problem with Mixed Backhauls)	Metaheurístico	Depósito, Consumidores, Nó
	Karaoglan, Ismail; Altiparmak, Fulya	<i>Location-routing problem</i>	Localização dos depósitos e também rotas simultaneamente	Location-Routing Problem with Mixed Backhauls)	Algoritmo Memética	Rota do veículo, Depósito, Consumidor
	Yang, Jun; Sun, Hao	<i>Location-routing problem</i>	Localização estrategica de estações de baterias para veículos eletricos	SIGALNS	Procedimento Heurístico	Estações de baterias são localizadas em nó, veículo de um nó para outro
Logística & Management	Jahre, Marianne; Kembro, Joakim; Rezvanian, Tina; Ergun, Ozlem; Hapnes, Svein J.; Berling, Peter	<i>Operation-management</i>	Modelo de localização de armazéns que inclui política e segurança -expandir os armazéns e diminuir os custos e tempo de resposta	FLP	Modelo de otimização com programação matemática	Armazém, Containers, Fornecedores, Ponto da demanda, Armazém global.
	Vanajakumari, Manoj; Kumar, Subodha; Gupta, Sushil	<i>Operation-Human management</i>	Localização de armazéns, inventario, selecionar tamanho, número de caminhões e rotas desde os pontos de distribuição para desastres	Programação Inteira mista-Entrevista	Modelo de otimização para 3 cenários	Localização de armazéns temporais, Inventario para os armazéns, Seleção de tamanho e número de caminhões, Roteamento de caminhos desde os armazéns para pontos de distribuição e tempo

Cadeia de Suprimentos	Hiassat, Abdelhalim; Diabat, Ali; Rahwan, Iyad	<i>Decision-making problem/Supply Chain</i>	Modelo de localização, inventário e roteamento para produtos perecíveis. Determina a localização e o número de armazéns, o nível de inventário e as rotas dos veículos	NP-hard	Procedimento Heurístico	Nível de inventário, Consumidor, um intervalo de tempo, Quantidade a ser enviada utilizando rota e tempo, Rota, Localização do Armazém
	Chibeles-Martins, Nelson; Pinto-Varela, Tania; Barbosa-Povoa, Ana P.; Novais, Augusto Q.	<i>Decision-making problem/Supply Chain</i>	Um problema de multi-planta, produção e distribuição relacionado com otimização, demanda e distribuição. O objetivo é minimizar os custos dos mesmos	Simulação Annealing (SA)	Metaheurístico MBSA	Quantidade de material, Capacidade dos recursos tecnológicos, Excesso de recursos, Quantidade total de utilidade consumida, Produção, Tamanho do armazém tecnológico, Seleção de processo tecnológico Capacidade de produção, Capacidade de extensão do depósito, Fluxo de caixa, Demanda do produto, Termo de depreciação, Capital fixo de investimento, Capital depreciação, Inventário do produto, Fluxo de reserva
	Cardoso S.R	<i>Supply chain amagement</i>	Desenhar e planejar a cadeia de suprimentos com fluxos reversos considerando produção, distribuição e logística reversa	Programação lineal inteira (MILP)	Determinístico	Número e localização de centro de distribuição regionais, Planejamento de tempo, Fluxo ótimo de produtos ao longo da cadeia de suprimentos, Nível ótimo de inventário
	Gebennini, E	<i>Supply chain amagement</i>	Problema de alocação dinâmica de local com controle do nível de serviço ao cliente e otimização de estoque e segurança	Modelo single commodity multi-period 2-stage (SCMP2S)	Estocástico	Centro de distribuição potencial, Capacidade instalada, Capacidade usada, Fluxo do produto, Fluxo de saída do produto, Quantidade de produto, Inventário do produto Armazenado
	Vila, D	<i>Supply chain amagement</i>	Metodologia genérica para projetar a rede de produção e distribuição das empresas num contexto multinacional	CPLEX 9.0	Modelo genérico	
Logística Humanitária	Salmerón, J	<i>logística humanitaria</i>	Modelo de otimização estocástica para orientar a alocação de orçamento para adquirir e posicionar elementos de socorro	PO(modelo multi-objetivo)	Estocástico	Desembarque das pessoas, Expansão de mercadorias, Área afetada, Variáveis de decisão, População crítica, Commodities, Número de viagens
	Rath, S	<i>logística humanitaria</i>	Sistema de suprimentos com armazém intermediário para fornecer as pessoas afetadas de um desastre natural	Restrição Epsilon- MILP	Heurístico	Depósito potencial, Quantidade enviada da planta para o depósito, Orçamento disponível, Localização dos veículos
	Tofighi, S	<i>logística humanitaria</i>	Abordagem de um problema de logística humanitaria em dois escalões envolvendo varios armazéns centrais e centros de distribuição	Scenario-based stochastic programming (SBSP)	Estocástico baseada em cenários	Armazém central potencial, Centro de distribuição potencial, Nível de inventário do armazém, Nível de inventário de centro de distribuição.
	Bozorgi-amiri, A	<i>logística humanitaria</i>	Problema de desenho da cadeia de socorro considerando demandas, suprimentos, custos de aquisição e transporte	Programação não lineal	Modelo misto de programação não lineal	Quantidade de mercadoria fornecida, Quantidade de mercadoria transferida para o centro de distribuição, Quantidade de mercadoria enviada para o centro de distribuição para cada cenário, Estoque armazenado

Localização-Roteamento	Belenguer,J	<i>Location-Routing Problem</i>	Propor abordagem exata com base no algoritmo Branch-and-cut para resolver o LRP com restrições de capacidades em depósitos e veículos	Método linear zero	Branch-cut	Custo de abrir um novo depósito, Restrições para nós de clientes, Capacidade dos veículos, Capacidade do depósito,
	Lin, C.k.y	<i>Location-Routing Problem</i>	Sistema logístico integrado em que as decisões de localização do depósito, roteamento de veículos e atribuição de rotas aos veículos são consideradas simultaneamente.	Problema multi-objetivo resolvido com Compaq Visual Fortran Professional Edition	Metaheurístico	Depósito, Demanda do nó, Veículo, Tempo de viagem.
Tomada de Decisão	Awasthi,A	<i>Decision-making</i>	Abordagem de tomada de decisão para o planejamento da localização de centros de distribuição urbana com incerteza	TOPSIS	Multi-criteria	Acessibilidade, Modos de transporte,Segurança, Benefício, Custos, Impacto ambiental, Proximidade com os clientes, Distância
	Demirel, T	<i>Decision-making</i>	Localização de um armazém considerando alguns critérios tais como custos, características de mão de obra, infraestrutura e mercados, incentivos e estruturas tributariam	Choquet Integral	Hierárquica	Custo demanda, lucro e ambiente
	Farahani, R.Z.	<i>Decision-making</i>	Encontrar o número adequado de armazéns e a melhor localização possível para os mesmos para minimizar custos	TOPSIS and ELECTRE	Heurístico e Metaheurístico	Centros de localização, Critério de localização, Distância crítica

Fonte: Elaboração Propria com as bases de dados da *Web of Science* e *Scopus*

## APÊNDICE B- ARTIGOS RELACIONADOS COM LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS DE ÁGUA NA WEB OF SCIENCE E NA SCOPUS

Nome do Artigo	Autor	Ano	Número de Citações	Tema da Pesquisa
<i>RFID Tag Readability Issues with Palletized Loads of Consumer Goods</i>	Singh, J.; Olsen, E.; Vorst, K.; Tripp, K.	2009	10	Problemas de Legibilidade de códigos de produtos de consumo paletizado
<i>Supply chain planning for water distribution in Central Asia</i>	Ahmed, Shamsuddin	2009	2	Cadeia de suprimentos responsiva para distribuição de água na Ásia Central
<i>The dynamic lines of collaboration model: Collaborative disruption response in cyber-physical systems</i>	Zhong, Hao; Nof, Shimon Y.	2015	11	Teste de alocação de depósitos sobre um modelo de Linhas Dinâmicas de colaboração para resposta de interrupção colaborativa segundo um estudo de caso de sistema de água
<i>Logistics system for drinking water distribution in post disaster humanitarian relief, Al-Za'atari camp</i>	Smadi, Hazem; Al Theeb, Nader; Bawa'neh, Haneen	2018	1	Metodologia de otimização que ajude na distribuição de água potável em situações pós-desastre
<i>Intelligent Storage Location Allocation with Multiple Objectives for Flood Control Materials</i>	Wang, Wei; Yang, Jing; Huang, Li; Proverbs, David; Wei, Jianbin	2019	1	Alocação de armazém inteligente de material de controle de inundação

Fonte: Elaboração própria com dados da *Web Of Science*

Título	Autores	Ano	Número de Citações	Tema da Pesquisa
<i>Bi-objective intelligent water drops algorithm to a practical multi-echelon supply chain optimization problem</i>	Kayvanfar V., Hussein S.M.M., Karimi B., Sajadieh M.S.	2017	10	Algoritmo inteligente de gotas de água com um abordagem multi-objetiva para a otimização para minimizar os custos logísticos

<i>Network configuration of a bottled water closed-loop supply chain with green supplier selection</i>	Papen P., Amin S.H.	2019	3	Otimização de uma cadeia de suprimentos em circuito fechado para reduzir o impacto da produção de água engarrafada no meio ambiente e maximizar o lucro total
<i>Supply chain planning for water distribution in Central Asia</i>	Ahmed S.	2009	3	Cadeia de suprimentos responsiva para distribuição de água na Ásia Central

---

Fonte: Elaboração própria com dados da *Scopus*

## APÊNDICE C – MODELAGEM UTILIZADA NO MATLAB

```
function otimizar_rota_v4
```

```
%Matriz de distâncias total e os identificadores gerais de demanda e oferta
```

```
distanciasparcial = dlmread('distancias.txt');
```

```
for i = 1:(size(distanciasparcial,1)-1)
```

```
    total_demanda_name(i,1) = int32(distanciasparcial(i+1,1));
```

```
end
```

```
for i = 1:(size(distanciasparcial,2)-1)
```

```
    total_oferta_name(i,1) = int32(distanciasparcial(1,i));
```

```
end
```

```
for i = 1:(size(distanciasparcial,1)-1)
```

```
    for j = 1:(size(distanciasparcial,2)-1)
```

```
        total_distancias(i,j) = double(distanciasparcial(i+1,j+1));
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Matriz de demanda e seu identificador
```

```
demandaparcial = dlmread('demanda.txt');
```

```
n_demanda = size(demandaparcial,1);
```

```
for i = 1:n_demanda
```

```
    demanda_name(i,1) = int32(demandaparcial(i,1));
```

```
    demanda(i,1) = double(demandaparcial(i,2));
```

```
end
```

```
%Matriz de oferta e seu identificador
```

```
ofertaparcial = dlmread('oferta.txt');
```

```
n_oferta = size(ofertaparcial,1);
```

```
for i = 1:n_oferta
```

```
    oferta_name(i,1) = int32(ofertaparcial(i,1));
```

```
    oferta(i,1) = double(ofertaparcial(i,2));
```

```
end
```

```
%Matriz de distâncias do caso específico
```

```
for i = 1:n_demanda
```

```
    for j = 1:n_oferta
```

```
        distancias(i,j) = total_distancias(find(total_demanda_name ==  
demanda_name(i,1)),find(total_oferta_name == oferta_name(j,1)));
```

```
    end
```

```
end
```

```
teste1=1
```

```
%f
```

```
for i = 1:n_demanda
```

```
    for j = 1:n_oferta
```

```
        f(j+(i-1)*n_oferta,1)=distancias(i,j)*demanda(i,1);
```

```
    end
```

```
en
```

```
%intcon
```

```

intcon = [1:n_oferta*n_demanda];

%A
%for i = 1:n_oferta
%  i;
%  for j = 1:n_demanda
%    A(i,i+(j-1)*n_oferta)=demanda(j,1);
%  end
% end

count=1;
count_demanda=1;
j=1;
teste2=1
for i=1:(n_demanda*n_oferta)
  if i <= (n_demanda*j)
    v_i(i)=j;
    v_j(i)=count;
    count=count+n_oferta;
    v(i)=demanda(count_demanda,1);
    count_demanda=count_demanda+1;
  else
    v_i(i)=j+1;
    v_j(i)=j+1;
    j=j+1;
    count=j+n_oferta;
    count_demanda= 1;
  end
end

```

```

    v(i)=demanda(count_demanda,1);
    count_demanda=count_demanda+1;
end
end;
%v=ones(1,n_oferta*n_demanda);
S_1 = sparse(v_i,v_j,v,n_oferta,n_oferta*n_demanda);
%S_checking=S_1-A;
%sum1=sum(sum(S_checking))
A=S_1;
teste3=1

%b
for i = 1:n_oferta
    b(i,1) = oferta(i,1);
end

teste=5

clear total_distancias;
%clear distanciasparcial;
clear demandaparcial;
clear ofertaparcial;

%Aeq
%for i = 1:n_demanda
% i;

```

```

% for j = 1:n_oferta
%   Aeq(i,j+(i-1)*n_oferta)=1;
%end
%end

count=1;
j=1;
for i=1:(n_demanda*n_oferta)
    if i <= (n_oferta*j)
        v_i_Aeq(i)=j;
        v_j_Aeq(i)=count;
        count=count+1;
    else
        count_col=j+1;
        v_i_Aeq(i)=j+1;
        v_j_Aeq(i)=count;
        j=j+1;
        count=count+1;
    end
end;

v_Aeq=ones(1,n_oferta*n_demanda);
S_2 = sparse(v_i_Aeq,v_j_Aeq,v_Aeq,n_demanda,n_oferta*n_demanda);
Aeq=S_2;
S_checking2=S_2-Aeq;
sum2=sum(sum(S_checking2))

```

```

%beq
for i = 1:n_demanda
    beq(i,1) = 1;
end

%lb
for i = 1:n_oferta*n_demanda
    lb(i) = 0;
end

%ub
for i = 1:n_oferta*n_demanda
    ub(i) = 1;
end

%Resultado
[x,fval,exitflag,output] = intlinprog(f,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub);

options = optimoptions('intlinprog','AbsoluteGapTolerance',0.1,'ConstraintTolerance',1e-
3,'IntegerTolerance',1e-3,'MaxTime',26600,'RelativeGapTolerance',1e-2);
[x,fval]=intlinprog(f,intcon,[],[],Aeq,beq,lb,[],options)
teste=1
%Resultado
[x,fval,exitflag,output] = intlinprog(f,intcon,A,b,Aeq,beq,lb,ub,options);

for i = 1:n_demanda
    for j = 1:n_oferta
        resultadoparc(i,j) = round(x(j+(i-1)*n_oferta,1));
    end
end

```

```

    end
end

resultado = demanda_name;

for i = 1:n_demanda
    resultado(i,2) = oferta_name(find(resultadoparc(i,:)==1));
end

resultadotxt = fopen('resultado.txt','w');
fprintf(resultadotxt,'%s\t%s\r\n','PA','MAN');
for i = 1:n_demanda
    fprintf(resultadotxt,'%u\t%u\r\n',resultado(i,1),resultado(i,2));
end
fclose(resultadotxt);

soma_otimizado=0;
for i = 1:n_demanda
    soma_otimizado = soma_otimizado +
(demanda(i,1)*distancias(i,find(oferta_name==resultado(i,2))))/1000;
end

soma_otimizado

%Matriz de situação atual
atualparcial = dlmread('atual.txt');
n_atual = size(atualparcial,1);

```

```

soma_atual=0;
for i = 1:n_atual
    i
    soma_atual = soma_atual +
(atualparcial(i,3)*distanciasparcial(find(total_demanda_name==int32(atualparcial(i,1))),find(tota
l_oferta_name==int32(atualparcial(i,2)))))/1000;
end

```

```

economiaperc = 100*(1-(soma_otimizado/soma_atual));

```

```

soma_atual = int32(soma_atual);

```

```

soma_otimizado = int32(soma_otimizado);

```

```

economiatxt = fopen('economia.txt','w');

```

```

fprintf(resultadotxt,'ATUAL (km): %d\r\n', soma_atual);

```

```

fprintf(resultadotxt,'OTIMIZADO (km): %d\r\n', soma_otimizado);

```

```

fprintf(resultadotxt,'ECONOMIA: %.2f%%\r\n', economiaperc);

```

```

fclose(economiatxt);

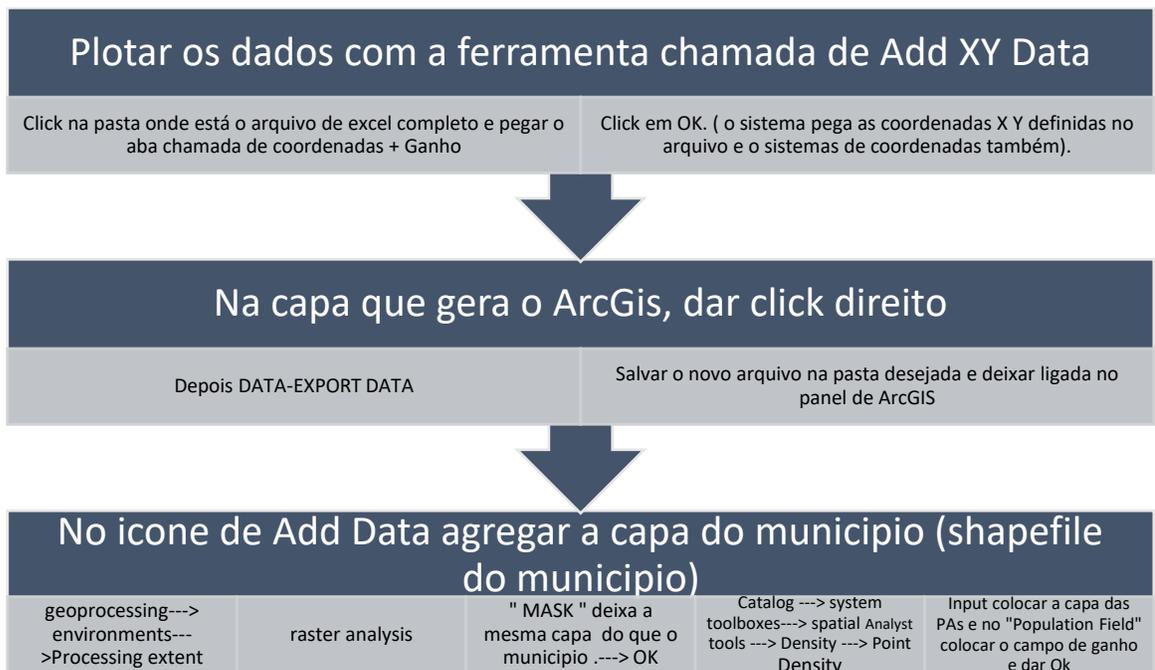
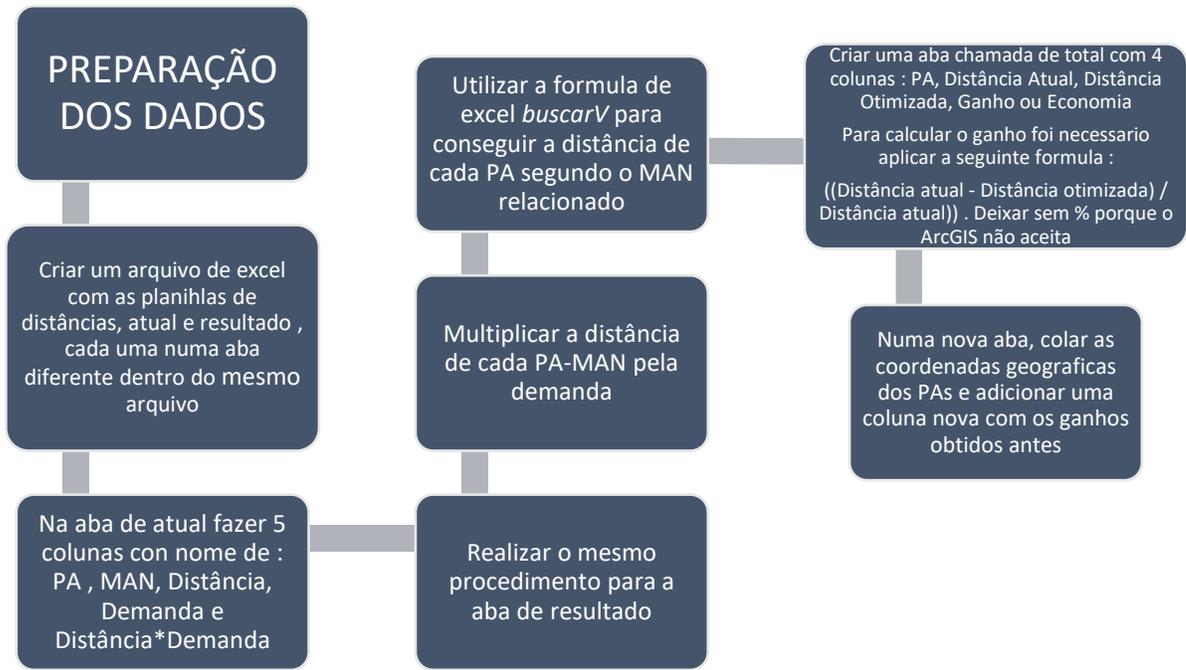
```

```

end

```

## APÊNDICE D: PROCESSAMENTO DOS DADOS EM ARGIS.



### Para realizar a matriz de custo origem-destino:

- i. Guardar o mapa com o nome correspondente
- ii. Click direito no *home* do lado direito, click em *new* → *personal database*.
- iii. Uma vez criada a *personal database* → click direito → *import- feature class (multiple)*
- iv. Abre uma nova aba para importar os arquivos. Dar click na pasta do lado direito e adicionar os arquivos *shapefile* dos MAN, PAs e vias do município.
- v. Selecionar os 3 arquivos e dar OK.
- vi. Na parte de *New personal geodatabase*, click direito → Click em *new* → *feature Dataset*
- vii. Ao abrir a nova aba chamar a *feature database* Ex: rotas → avançar → selecionar o sistema de coordenadas necessitadas → avançar → avançar → *finish*.
- viii. No novo *dataset* criado, dar click direito → *import* → *feature class (single)*.
- ix. Na nova aba que abre, click no ícone de pasta de arquivos → selecionar o *shapefile* de vias → *add* → OK.
- x. No *dataset* de “rotas”, dar click direito → *A new* → *network Dataset*
- xi. Uma nova aba aparece, colocar o nome desejado → avançar → avançar → *yes* → avançar → click em *connectivity* → deixar em *Any vertex* no arquivo criado → Ok → avançar → *None* → avançar → apagar a fila chamada de *Oneway* → avançar → avançar → *Yes* → avançar → *finish* → Sim.
- xii. Na parte de acima dar click em *Customize* → *toolbars* → habilitar a ferramenta de *network analyst*.
- xiii. No canto superior direito, estender a ferramenta de *network analyst* e dar click em *New OD Cost Matrix*
- xiv. Dar click na parte de *layers*, na parte da *OD Cost matrix*. Abre uma nova aba. Click direito em *origins* → *load locations* → *load from: MAN* → *Add* → OK.
- xv. Fazer o mesmo procedimento para os destinos, mas o arquivo que vai se carregar será o corresponde às PAs.
- xvi. Por último dar click em *solve*, no canto superior direito perto do *Network Analyst*.